

# NAUKA, BADANIA I DONIESIENIA NAUKOWE 2019



NAUKI TECHNICZNE  
I ŚCISŁE

Część I

ISBN 978-83-951445-7-8

**Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe**  
**2019**

**Nauki techniczne i ścisłe**  
**Część I**

Idea Knowledge Future  
Świebodzice, 2019

**Redakcja**

Tobiasz Wysoczański

**Opracowanie materiałów**

Katarzyna Dereń

ISBN 978-83-951445-7-8

ISBN (całość kolekcji) 978-83-951445-4-7

**Wydawca:** Idea Knowledge Future

## Spis treści

Kształtowanie relacji między przestrzeniami w obszarach mieszkaniowych	
Martyna Bednarz .....	7
Historia twierdzenia spektralnego	
Lena Caban.....	16
Aspekty techniczne związane z ograniczeniem ilości ubytków naturalnych paliw płynnych	
Tomasz Paweł Filipiuk.....	25
Koncepcja, projekt i wstępna implementacja otwartoźródłowej platformy do automatycznej detekcji, wstępnej klasyfikacji i badania zdarzeń akustycznych	
Konrad Janowski, Maciej Walczyński .....	36
Katalityczna reakcja syntezy amoniaku	
Artur Jurkowski.....	46
Badanie możliwości identyfikacji pomieszczenia w zależności od siły dźwięku	
Alicja Jasińska, Maurycy Kin .....	56
Potencjał odpadów przemysłowych wytworzonych w województwie śląskim jako minerałów antropogenicznych	
Krzysztof Knaś.....	65
Porównanie mocy maksymalnej prawej i lewej kończyny dolnej na różnych wartościach obciążenia zewnętrznego u zawodników trenujących mieszane sztuki walki	
Barbara Koteja, Roksana Krosta, Patryk Matykiewicz, Jakub Jarosz, Alan Langer .....	80
Porównanie siły eksplozywnej prawej i lewej kończyny dolnej w zależności od wielkości obciążenia zewnętrznego, u osób trenujących judo	
Roksana Krosta, Barbara Koteja, Patryk Matykiewicz, Jakub Jarosz, Alan Langer .....	89
Jakościowe porównanie charakterystyk aerodynamicznych modelu bolidu klasy Formuła Student na przykładzie AGH RTC 5.0	
Jolanta Krupa.....	97
Modelowanie numeryczne kompozytu w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych	
Michał Kucewicz.....	116

Przegląd możliwości z zakresu modelowania materiałów skalnych	
Michał Kucewicz.....	129
Metody pozyskiwania wodoru - review	
Marcin Opalski.....	140
Nawierzchnie na przejazdach kolejowo-drogowych	
Maciej Rochel .....	153
Ocena użyteczności przyrządu Lubri-Sensor jako narzędzia do mierzenia zawartości zanieczyszczeń w oleju silnikowym	
Kacper Pawlikowski.....	162
Zasadność stosowania metody ekstrapolacji przepływów w zlewni kontrolowanej na przekroje niekontrolowane	
Martyna Rukat, Ewa Knap, Jeremi Baran, Radosław Stodolak.....	181
Przegląd materiałów kompozytowych typu FML wraz z przykładową analizą MES	
Paweł Stabla, Michał Smolnicki .....	189
Metody wytwarzania sfer węglowych oraz sposób ich formowania	
Piotr Staciwa .....	202
Influence of interpolation and coupling methods on droplet-laden reacting jet	
Jakub Stempka.....	210
Modyfikacje podstawowych przepisów gry w piłkę nożną na przestrzeni wieków	
Łukasz Stępień, Bartosz Zdeb, Patrycja Maciejak.....	221
Sposoby łączenia oraz zabudowy szyn w torze bezстыkowym	
Paulina Szablowska.....	231
Numerical modelling of heat and fluid flow through granular structures	
Ewa Szymanek .....	242
Aula Leopoldina - przykład iluzjonistycznego malarstwa nasklepiennego późnego baroku	
Witold Szymański, Maurycy Kin.....	252
Rozwijanie mikro- i mezoporowatości klinoptylolitu	
Alicja Szymańska.....	261

Węgle aktywne z biomasy do procesu adsorpcji CO <sub>2</sub>	
Alicja Szymańska .....	271
Biologiczne i kulturowe uwarunkowania przeżyć estetycznych	
Witold Szymański .....	280
Pompy wyporowe stosowane w przemyśle spożywczym	
Krzysztof Towarnicki.....	290
Współczesne autonomiczne systemy obsługi magazynowania	
Ewa Tulska, Ariana Omarzai, Justyna Tulska .....	302
Redukcja strat wynikających z przygotowania maszyn produkcyjnych poprzez wprowadzanie technik LM	
Ewa Tulska, Paulina Sobol, Justyna Tulska.....	312
Koncepcja, projekt i badanie zasadności implementacji narzędzia komputerowego do wspomagania procesu edukacji muzycznej	
Maciej Walczyński, Anna Minkus .....	322
Otrzymywanie kompozytów Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -TiO <sub>2</sub> o strukturze core-shell posiadających właściwości fotokatalityczne	
Agnieszka Wojciechowska.....	334
Problematyka zanieczyszczenia środowiska pochodnymi kwasu ftalowego	
Daniel Wolecki, Magda Caban, Piotr Stepnowski, Jolanta Kumirska.....	343
Analiza zbieżności i skuteczności algorytmów filtracji adaptacyjnej w zastosowaniu do redukcji hałasu silników spalinowych stosowanych w samochodach osobowych	
Tomasz Zema, Maciej Walczyński .....	353

# Kształtowanie relacji między przestrzeniami w obszarach mieszkaniowych

Martyna Bednarz <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Instytut Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska  
Martyna Bednarz: martyna.bednarz@gmail.com

## Streszczenie

Tematem pracy jest próba odpowiedzi na pytania badawcze jak kształtują się przestrzenie publiczne, półpubliczne oraz prywatne i jakie są ich wzajemne relacje w obszarach mieszkaniowych. Badania obejmują analizę kompleksów mieszkaniowych zrealizowanych, w tym przypadku, poza granicami kraju (Holandia, Austria) i są próbą odnalezienia odpowiedzi na pytania: w jaki sposób strefy te są od siebie rozgraniczone, czy płynnie się przenikają aktywizując mieszkańców wpływają na zawiązywanie relacji społecznych i sąsiedzkich, czy dają poczucie komfortu, bezpieczeństwa, przywiązania do miejsca? Celem badań jest określenie, jaki rodzaj hierarchizacji w nich występuje oraz jakie narzędzia zostały użyte w celu rozróżnienia poszczególnych stref. W wyniku przeprowadzonej analizy ukazano, iż, kluczowym w tworzeniu stref integrujących mieszkańców, wydaje się być ludzka skala otaczającej przestrzeni urbanistycznej oraz architektury znajdującej się w niej.

**Słowa kluczowe:** zabudowa mieszkaniowa, jakość przestrzeni, przestrzeń publiczna, przestrzeń prywatna

## Shaping the relationship between spaces in residential areas

### Summary

The subject of the thesis is the study of characteristics of the form of public, semi-public and private spaces and their mutual relations in residential areas. The research includes the analysis of completed housing complexes, in this case, outside the country (the Netherlands, Austria) and they are an attempt to find an answer to the question how these zones are separated from each other, whether they penetrate smoothly activating residents affect the establishment of social and neighbourhood relations, or give a sense of comfort, safety, attachment to the place? The aim of the research is to determine what type of hierarchy they appear in and what tools have been used to distinguish individual zones. The study prove that human scale of the surrounding urban space and architecture seems to be the critical factor in creating zones that integrate the inhabitants.

**Keywords:** residential area, quality of space, public space, private space

### 1. Wstęp

Według definicji pochodzącej ze słownika termin „hierarchizacja” oznacza „podporządkowanie zasadzie hierarchii lub klasyfikowanie według hierarchii” (Słownik Języka Polskiego, 2018). Z punktu widzenia niniejszej pracy bliższe Autorce jest drugie znaczenie, spotykane w urbanistyce (Schneider – Skalska, 2012), które oznacza stopień dostępności przestrzeni, dla jej użytkowników, w tym wypadku analizowanej w obszarach mieszkaniowych, dzieląc ją na publiczną, sąsiedzką/półprywatną i prywatną.

Relacje między tymi strefami mogą być kształtowane na kilka różnych sposobów. W Polsce, wciąż jeszcze, najpopularniejszym z nich jest stosowanie twardych barier, takich jak mury, ogrodzenia, które w sposób definitywny rozgraniczają te strefy od siebie, jednocześnie wpływając (zazwyczaj negatywnie), na jakość, estetykę i funkcjonalność przestrzeni.

Tendencja w nowopowstających obszarach mieszkalnych w Polsce charakteryzuje się, co prawda, wyższym standardem estetycznym architektury oraz mieszkań, niż w latach

poprzedzających rok 1990, jednak nie idzie za tym wzrost jakości przestrzeni osiedlowych czy definiowanie stopni jej dostępności bez używania barier fizycznych (Przestrzeń Życia Polaków, 2012). Przykłady przeanalizowanych obszarów mieszkaniowych w Europie pokazują, że strefowanie w miejscach zamieszkania, mogą cechować ciekawe rozwiązania zarówno pod względem funkcjonalnym, jak i wizualnym.

Nie można jednak podchodzić do tematu hierarchizacji przestrzeni w obszarach mieszkaniowych, tylko pod kątem analizy funkcjonalno - przestrzennej. Na równi z nią, istotny jest aspekt społeczny, czyli próba odpowiedzenia na potrzeby mieszkańców dotyczących miejsca zamieszkania. Nierównomierny rozwój przestrzenny, dynamiczne przemiany struktury miejskiej oraz społecznej, powodują wzrost poczucia ryzyka i nieprzewidywalności. Problemy te dotyczą, przede wszystkim, mieszkańców miast, a podtrzymywanie poczucia wspólnoty okazuje się zadaniem szczególnie trudnym. Dom, a wraz z nim środowisko mieszkaniowe, staje się w tych okolicznościach coraz istotniejszym czynnikiem formowania tożsamości, oraz strefą wolną od społeczno – ekonomicznej niepewności (Gądecki, 2009).

Autorka stara się zwrócić uwagę jak istotne jest hierarchizowanie przestrzeni w obszarach mieszkaniowych i badania z tym związane. Uwzględnianie tego czynnika podczas procesu projektowego może znacznie wpłynąć na podniesienie komfortu i jakości życia mieszkańców i użytkowników tych obszarów, aktywizować je oraz inicjować nieformalne stosunki społeczne. Rozplanowanie budynków, brak ostrych granic i barier broniących mieszkania wpływają na więzi sąsiedzkie i mogą pomóc w budowaniu zaufania mieszkańców wobec siebie.

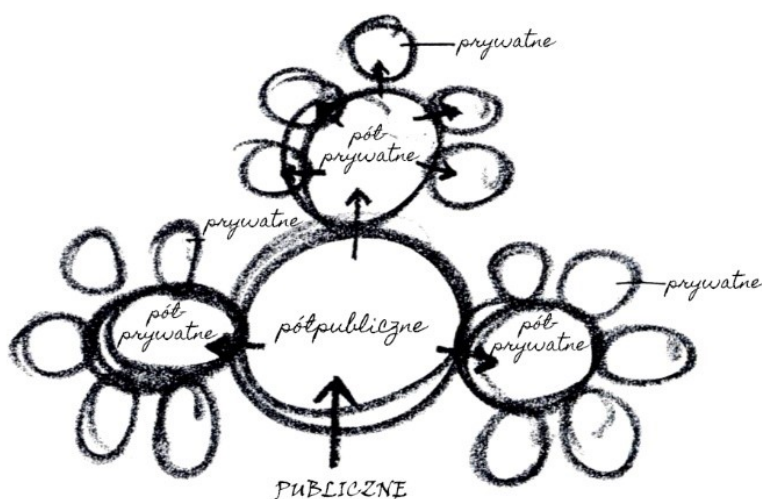
## **2. Społeczne i funkcjonalno - przestrzenne aspekty hierarchizacji przestrzeni – analiza literatury i obserwacje**

### **a) Aspekt społeczny**

Ważnym aspektem zaspakajania potrzeb każdego człowieka jest kontakt z innymi przy jednoczesnej potrzebie odosobnienia. Aby znaleźć złoty środek między tymi sprzecznymi stanami, Ch. Montgomery pisze o „społecznym życiu drzew”, czyli takiej mocy natury, która podnosi poczucie szczęścia i obniża pobudzenie, jednocześnie aktywizując życie społeczne mieszkańców (Montgomery, 2015). Opisuje badania F. Ming Kuo oraz W. Sullivana, którzy spacerując po dzielnicy mieszkaniowej w Chicago zauważyli jak obecność zieleni w podwórkach pomiędzy niskimi blokami wpływa na ich użytkowanie. Te, które wyglądały jak „betonowe pustkowia” były wyludnione, natomiast te, na których występowała jakakolwiek forma zieleni, nawet zaniedbana, tętniły życiem (Bednarz, 2018).



W badaniach uwzględniono także, ze względu na osobiste upodobania Autorki dotyczące psychologii w aspekcie zaspakajania potrzeb człowieka, pojęcia związane z kształtowaniem przestrzeni wpływających na zdrowie i komfort życia mieszkańców. Według M. Rosenberga (Rosenberg, 2016) i stworzonej przez niego listy, w grupę potrzeb związaną ze stosunkami międzyludzkimi wchodzi potrzeby: przynależności, wspólnoty, kontaktu z innymi, siły grupowej oraz współpracy. Z kolei zgodnie z podawanymi przez WHO, uwarunkowaniami wpływającymi na zdrowie jest, między innymi, środowisko społeczne (social environment), w tym sieci wsparcia społecznego - większe wsparcie ze strony rodzin, przyjaciół, społeczności jest powiązane z lepszą kondycją zdrowotną (World Health Organization, 2016). Potrzeba więzi społecznej dotyczy każdego człowieka i może być zaspokajana poprzez przestrzenie służące kontaktom społecznym w skali zespołu mieszkaniowego, ukształtowanej w taki sposób by sprzyjała poczuciu identyfikacji i nawiązywania relacji społecznych (Schneider – Skalska, 2014).



Rys. 1. Źródło: O. Newman, "Defensible space", Diagram pokazujący obszar mieszkaniowy z hierarchiczną organizacją przestrzeni publicznej, półpublicznej/sąsiedzkiej, półprywatnej, prywatnej. Czytelny układ pozwala na ocenę użytkowników i ich „przynależności” do danej przestrzeni

### b) Aspekt urbanistyczno - przestrzenny

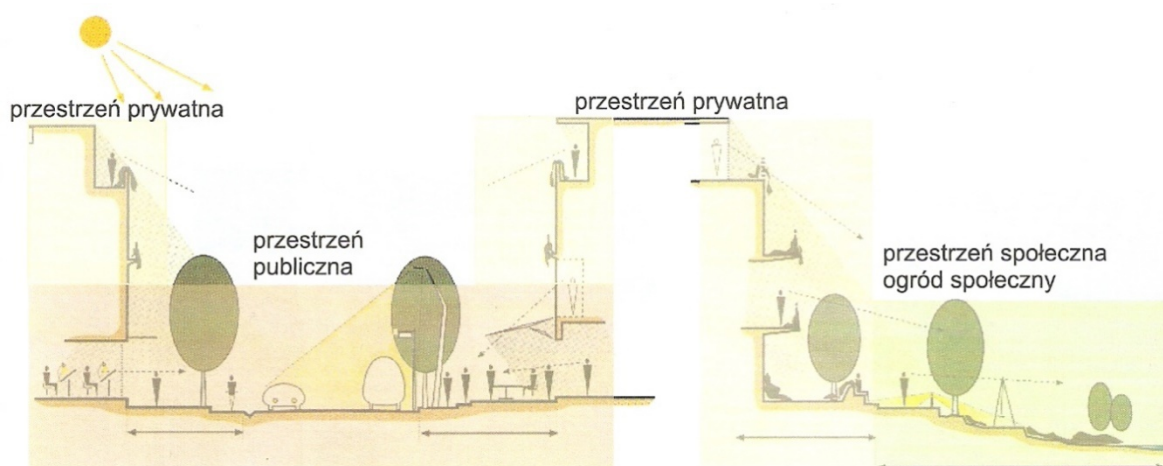
Zgodnie z teorią funkcjonującą w dziedzinie urbanistyki, przestrzenie możemy podzielić na grupy: publiczną, półpubliczną, sąsiedzka/półprywatną oraz prywatną (Rys.1).

Niepodważalnym jest fakt, że (zgodnie z powiedzeniem „mój dom, moją twierdzą”) przestrzeń prywatna jest obszarem, który najtrudniej jest naruszyć w sposób przypadkowy, nieintencjonalny. Trudno byłoby przeoczyć moment, w którym w ową przestrzeń wchodzimy. Zazwyczaj jest ona zamknięta, ogrodzona, spersonalizowana, zaznaczona w sposób niepozostawiający wątpliwości.

Zazwyczaj podobnie postrzegamy przestrzenie publiczne, które poprzez swą ogólnodostępność oraz usługi towarzyszące, są czytelne w swej funkcji. To obszary, które są kontynuacją struktury miejskiej (Schneider – Skalska, 2012) i zazwyczaj takie cechy posiadają. Przestrzeń publiczna klasyfikowana, jako miejsce ogólnodostępne to obszar, o której decydują nie tylko mieszkańcy czy użytkownicy, lecz również władze lokalne lub miejskie. Zaliczyć do niej można place, skwery, parki, ulice, wszystkie te strefy, w których znaleźć może się każdy, kto ma na to ochotę.

Najtrudniejszym do określenia pozostają obszary „pomiędzy” opisywanymi powyżej sferami. Tak zwane strefy półprywatne, zwane też sąsiedzkiemi, to przestrzenie, które w zależności od tego jak są zaprojektowane, mogą spełniać swoją rolę, motywując użytkowników do korzystania z nich, nawiązywania i zacieśniania więzi społecznych lub stać się „martwymi kadrami”, które nie zachęcają do działań czy obecności ludzi. Elementami wchodzącymi w skład tych przestrzeni, mogą być atria, podwórza, dziedzińce, przed – ogródki, zielone skwery, wspólne wejścia do budynków i obszar przed nimi. Wszystkie te miejsca, które otwarte są dla mieszkańców danego obszaru, ale mają ograniczoną dostępność dla przypadkowych użytkowników. Wg Chmielewskiego ważne jest także, aby: „przestrzeń wspólnie użytkowana miała charakter sąsiedzki i była wyraźnie kontrolowana przez mieszkańców” (Chmielewski, 2001).

Dużo miejsca w swych publikacjach poświęca przestrzeniom między budynkami J. Gehl. Szeroko omawia tematykę dotyczącą krawędzi – czyli miejsc spotkania budynku i miasta - w obszarach mieszkaniowych oraz ich wpływu na życie mieszkańców, wskazując jak „ważna [jest] dla jakości zamieszkania i witalności okolicy. Strefa krawędzi to najaktywniejszy obszar zewnętrzny w zabudowie mieszkaniowej.” (Gehl, 2010).



Rys. 2. Prawidłowe relacje przestrzenne wg R. Rogersa (na podst. *Old Labour for New Cities*, New Statesman, July 5, 1999; źródło: G. Schneider – Skalska, „Zrównoważone środowisko mieszkaniowe; społeczne - oszczędne – piękne”, s. 105)

Stopień zgodności dwu, opisywanych powyżej, struktur - przestrzennej i społecznej wpływa na opinie mieszkańców o miejscu zamieszkania, sprzyja kontaktom społecznym lub je utrudnia, poprawia lub pogarsza bezpieczeństwo w obszarach wewnątrz i na zewnątrz miejsca zamieszkania (Rys. 2).

### **3. Typy hierarchizacji**

Metodologia badań zastosowana w europejskich obszarach mieszkaniowych to: analiza przypadku, wizja lokalna, dokumentacja fotograficzna oraz projektowa. Na tej podstawie udało się wyróżnić kilka sposobów hierarchizowania przestrzeni, zastosowanych w przykładach wymienionych poniżej. W pracy omówione zostaną najciekawsze z nich. Są to obszary, w których strefowanie przestrzeni przeprowadzone jest w sposób czytelny, odczuwalny zarówno dla użytkowników jak i mieszkańców tych miejsc.

#### **a) Hierarchizacja pionowa**

To dość specyficzny sposób strefowania przestrzeni, zastosowany głównie w obszarach śródmiejskich takich jak obszar Simmering w Wiedniu, gdzie znajdują się Gazometry, czy w centrach miast – budynek De Citadel w holenderskim Almere. Są to przykłady, w których przestrzenie mieszkalne (prywatne/sąsiedzkie) ułożone są nad przestrzeniami publicznymi, w dość nietypowych formach: funkcje usługowe, parkingi i mieszkania zostały „zamknięte” w budynku.

W skorupach czterech Gazometrów umieszczone zostały przestrzenie mieszkaniowe, biurowe, handlowe, archiwalne, a nawet sala koncertowa. Multi - funkcjonalność wprowadzona do czterech ogromnych budynków, które do 1986 roku służyły jako zbiorniki na paliwo, spowodowała konieczność zastosowania „twardego” podziału dostępności do poszczególnych stref. Funkcje są wyraźnie rozdzielone poziomymi przegrodami (stropami), jednak ład przestrzenny nie jest odczuwalny, a poruszanie się wewnątrz Gazometrów nie jest łatwe i intuicyjne. Trudno jest odszukać wejścia i wyjścia zarówno do stref publicznych, jak i prywatnych. I o ile to drugie jest efektem zamierzonym, o tyle w pierwszym przypadku, nie powinno mieć miejsca, gdyż przestrzeń publiczna z założenia jest miejscem ogólnodostępnym.

De Citadel to kolejna, bardziej udana próba stworzenia wielofunkcyjnej przestrzeni miejskiej, w tym przypadku z jednorodzinną zabudową mieszkaniową na dachu centrum handlowego w Almere. Uporządkowanie strefy publicznej, sąsiedzkiej, prywatnej w pionie zostało zrealizowane w sposób czytelny. Parkingi i drogi zostały ustawione pod poziomem gruntu, częściowo na dwóch piętrach. Na parterze budynku znajdują się punkty usługowe, a na dachu tego obiektu zrealizowano czterdzieści sześć jednostek mieszkaniowych.

De Citadel stanowi kompromis pomiędzy ideami projektowymi Portzamparc'a i Koolhaas'a: otwartej wyspy "îlot ouvert" i gęstości "density" (Portzamparc, 2018). Gęstość osiągnięta została przez „ułożenie w stos” funkcji, takich jak parking, usługi i mieszkanie. „Otwarcie” natomiast uzyskano na poziomie dwóch ulic handlowych, które przecinają blok De Citadel.

Przykłady hierarchizacji pionowej są specyficzne i trudne do jednoznacznej oceny, lecz ze względu na oryginalność pomysłu rozwiązanie strefowania przestrzeni, zasługuje na uwzględnienie w pracy badawczej.

#### **b) Hierarchizacja pozioma**

Przykład, gdzie podział przestrzeni ze względu na dostępność przebiega w sposób uporządkowany i czytelny, strefa publiczna jest wyraźnie zaznaczona i ogólnodostępna, a strefy sąsiedzkie i półprywatne są przez użytkowników odczuwalne intuicyjnie.

Hierarchizacja przestrzeni osiedla Monte Laa w Wiedniu została oparta na linearnym ciągu przestrzeni publicznej i rekreacyjnej (Parku Monte Laa), zaprojektowanej przez M. Schwarz (3:0 Landschaftsarchitektur, 2016) oraz przenikającymi się strefami sąsiedzkimi i półprywatnymi, w formie skwerów, ogródków, zielonych dziedzińców. Same budynki mieszkalne natomiast, to piętnaście zespołów o różnorodnych formach, ukształtowanych w taki sposób, aby ułatwić mieszkańcom zawiązywanie więzi sąsiedzkich, właśnie dzięki dziedzińcom, podcieniom w parterach, mostkom między budynkami czy rozczłonkowaniu brył.

Z całego obszaru osiedla Monte Laa, wyłączony został ruch kołowy, co zwiększyło poczucie bezpieczeństwa mieszkańców. Dzieci mogą się po tym terenie poruszać samodzielnie, bez nadzoru rodziców, zarówno, jeśli chodzi o pokonywanie odległości by dostać się do szkoły jak i możliwości użytkowania przestrzeni publicznej.

#### **c) Hierarchizacja przenikająca**

Jest to typ podziału przestrzeni na publiczną, sąsiedzką oraz prywatną, w której oddzielenie ich od siebie następuje w sposób płynny, często wykorzystujący zielen, różnice terenu, elementy przyrodnicze, takie jak zielen, woda. Ważna jest także strefa krawędzi tzw. „soft edge” definiowany, jako obszar pomiędzy strefą publiczną lub półpubliczną (sąsiedzką, społeczną) a prywatną, przed-ogródki, werandy zmiękczające przejście pomiędzy tym, co prywatne a tym, co publiczne. Dają możliwość regulowania kontaktów i ochrony prywatnego życia, aktywizują przestrzeń zewnętrzną i dają większe poczucie bezpieczeństwa mieszkańcom (Gehl, 2017).

Ecolonia powstała w 1991 w Alphen aan den Rijn, holenderskim miasteczku znajdującym się w obszarze nazywanym „zielonym sercem Holandii”. Autorem założenia jest Lucien Kroll (Ecolonia, 2017) belgijski architekt, któremu bliska była idea promowania partycypacji przyszłych mieszkańców w procesie projektowym.

Każdy dom, powstały w tym osiedlu, posiada przestrzeń półprywatną w postaci przedogródka, czyli skrawka przestrzeni przy strefie wejściowej zagospodarowanego w taki sposób, by umożliwić zawiązywanie kontaktów sąsiedzkich. Przestrzeń „soft edge”, to tutaj komfortowe miejsca przeznaczone do odpoczynku, umiejscowione po publicznej stronie budynku oraz będące w bezpośrednim połączeniu z nim. W omawianym obszarze przyjmuje formy mostków nad mini - kanałami, nawiązującymi do lokalizacji obszaru. W tej strefie pojawiają się ławki, krzesła ogrodowe, stoliki, które mogą pomóc w zawiązywaniu więzi społecznych. Przed domami znajduje się dużo zieleni, głównie prywatnej, pielęgnowanej przez mieszkańców, ale podnoszącej walory estetyczne całej ulicy, służące wszystkim użytkownikom.

Rozwiązanie urbanistyczne uprzywilejowuje pieszych i tereny zielone, przy jednoczesnym zapewnieniu przestrzeni dla ruchu samochodowego. Podlega on samoregulacji, a użytkownicy mają możliwość skorzystania z miejsc parkingowych znajdujących się poza obszarem osiedla, mieszkańcy, natomiast, w pobliżu swoich domów.

Interesującym rozwiązaniem jest aranżacja strefy prywatnej w domach znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika wodnego. Od strony wody, znajdują się ogródki, zatopione w zieleni, posiadające dostęp do zbiornika wodnego. Zieleń jest tutaj naturalną miękką barierą, pomiędzy strefą prywatną (ogórkami) a półpubliczną - placem z fontanną oraz miejscami do siedzenia. Strefowanie ze względu na dostępność jest czytelne. Osiedle sprawia wrażenie bardzo otwartego na użytkowników niebędących mieszkańcami.

#### **d) Typy hierarchizacji a problem integracji mieszkańców**

Na podstawie przeprowadzonych analiz nie wyróżniono rodzaju hierarchizacji przestrzeni, (poza wspomnianymi we wstępie barierami), który szczególnie korzystnie lub niekorzystnie wpływałby na integrację mieszkańców.

Kluczowym w tworzeniu stref integrujących mieszkańców, wydaje się być ludzka skala otaczającej przestrzeni urbanistycznej oraz architektury znajdującej się w niej. Jest to widoczne w wyżej omawianych przykładach Monte Laa czy Ecolonia. Natomiast im skala większa, tym trudniej odnaleźć się w przestrzeni o różnych funkcjach i charakterach (Gazometry).

Miejsca najbardziej „żyjące” i integrujące społeczności lokalne, to te, których skala jest dopasowana do człowieka, w których występuje zieleń oraz uwolnienie od uciążliwości ruchu kołowego. Wg Jana Gehla, poza wzmocnieniem roli pieszych w miastach, ważnym czynnikiem ludzkiego wymiaru miast, jest wzmocnienie społecznej roli przestrzeni miejskiej jako miejsca spotkań (Gehl, 2010) Ważne jest także aby „ośrodki – miejsca” mające jednoczyć mieszkańców czy pogłębiać więzi społeczne, miały ofertę skierowaną nie do poszczególnych jednostek, lecz całych grup. Jeśli uda się ten cel osiągnąć, a atrakcyjność obszaru zyskuje zainteresowanie więcej niż jednej grupy społecznej, to przestrzeń sąsiedzka staje się wartościowym, atrakcyjnym i przyjaznym miejscem spełniającym swą funkcję.

#### **4. Podsumowanie**

Podział przestrzeni opisany we wcześniejszej części pracy na podstawie poszczególnych przykładów, obrazuje jak różne formy przybierać może hierarchizowanie przestrzeni. W obszarach śródmiejskich, centrach miast, gdzie istotnym czynnikiem jest oszczędność powierzchni, forma kształtowania poszczególnych stref może odbywać się w pionie. Należy jednak zaznaczyć, że przestrzenie te, nie wchodzą ze sobą w relacje, nie przenikają się i są bardzo mocno od siebie odgrudzone.

Przeanalizowane przykłady miały na celu ukazanie, jak trudną i ważną sztuką jest dla architektów i urbanistów poszukiwanie balansu między przestrzeniami o różnych funkcjach, szczególnie w środowiskach zamieszkania. Stworzenie czytelnej, bezpiecznej i funkcjonującej prawidłowo strefy półpublicznej służącej jedynie grupom sąsiedzkim staje się, w pewnych okolicznościach niemożliwe, co widać na przykładzie wiedeńskich Gazometrów. Ta właśnie strefa jest miejscem realizacji potrzeb mieszkańców, przestrzenią sąsiedzką oferującą wartości pozamaterialne – więzi sąsiedzkie, zwiększając poczucie bezpieczeństwa. Należy dążyć do takiego hierarchizowania, które umożliwi tworzenie przestrzeni sąsiedzkich z równoczesną możliwością zachowania intymności w przestrzeni prywatnej, przy zachowaniu ludzkiego wymiaru przestrzeni publicznej.

#### **5. Literatura**

3:0 landschaftsarchitektur. 2016. Park Monte Laa, <http://www.3zu0.com/urbanes/detail/park-monte-laa.html>. [dostęp 21.01.2017].

Bednarz M., 2018. Zieleń jako istotny element tworzenia przestrzeni społecznych. *Środowisko Mieszkaniowe=Housing Environment*22/2018: 46-53.

Drapella-Hermansdorfer A., 2015. Gazometry Simmering – miasto z recyklingu w mieście XXI wieku w XII Seminarium z cyklu: Krajobrazy XXI wieku: idee, strategie, realizacje Austria, Włochy 12-18/19 września 2015, Raport serii SPR W1A/S-013/15.

Dziennik Ustaw, 2003. nr 80 poz. 717 [online], [dostęp 12.06.2017].

Ecolonia Alphen aan den Rijn, 2018. <https://patm.home.xs4all.nl/GERWEN.SPECIAAL/---Ecolonia.I.Alphen.text.html> [dostęp: 15.05.2018r.]

Gądecki J., 2009. Za murami – osiedla grodzone w Polsce – analiza dyskursu. Monografie Fundacji Nauki: 90

Gehl J., 2017. Miasta dla ludzi. Wydawnictwo RAM: 82.

Hall E., 2003. Ukryty wymiar. Warszawskie Wydawnictwo Literackie MUZA.

Januszewski W., Łątka J., 2016. Kreowanie przestrzeni społecznej - lekcja Brasillii i Delft. Habitaty: reaktywacja małych społeczności lokalnych: 93.

Kozień-Woźniak M., 2008. Dzieło architektoniczne w przestrzeni ludycznej. Czasopismo Techniczne/Architektura 15 6–A (2008): 386-889.

Miasto2077, 2018. <http://www.miasto2077.pl/przyszlosc-miast-to-partycypacja-2/> [dostęp 12.06.2018].

Montgomery Ch., 2015. Miasto Szczęśliwe. Wysoki Zamek: 153.

Polska Polityka Architektoniczna, 2011. Polska Rada Architektury, SARP, TUP, Izba Architektów RP; SARP: 8-18.

Portzamparc Ch., <http://www.christiandeporzamparc.com/en/projects/de-citadel/> [dostęp 12.05.2018].

Przestrzeń życia Polaków Raport, SARP [online], [http://www.sarp.org.pl/pliki/1908\\_53fdc64bb3140-pzp\\_spistresci\\_1.pdf](http://www.sarp.org.pl/pliki/1908_53fdc64bb3140-pzp_spistresci_1.pdf) [dostęp: 24.05.2017].

Schneider-Skalska G., 2012. Zrównoważone środowisko mieszkaniowe; społeczne - oszczędne – piękne. Wydawnictwo PK: 92.

WHO, World Health Organization. 2016. <https://www.who.int/hia/en/> [dostęp 05.06.2016].

# Historia twierdzenia spektralnego

Lena Caban <sup>(1)</sup>

Instytut Matematyki, Politechnika Częstochowska  
Lena Caban: lenacaban95@gmail.com

## Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie historii twierdzenia spektralnego, którego ogólna wersja jest jednym z najważniejszych wyników teorii operatorów liniowych. Twierdzenie spektralne powstawało na przestrzeni wieków przybierając różne formy. Jego historia zaczyna się w XVII wieku od prostego twierdzenia sformułowanego na płaszczyźnie euklidesowej przez Kartezjusza. w XVIII wieku twierdzenie to zostało uogólnione na  $n$ -wymiarową przestrzeń rzeczywistą. Pod koniec XIX wieku istniały już dwie wersje twierdzenia spektralnego: redukcja rzeczywistej symetrycznej formy kwadratowej do postaci normalnej i diagonalizacja symetrycznej macierzy rzeczywistej. Od XX wieku zaczęto formułować twierdzenia spektralne dla operatorów liniowych określonych na nieskończone wymiarowych przestrzeniach, a ich kolejne wersje stawały się coraz bardziej abstrakcyjne. Ogólna postać twierdzenia spektralnego znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki m.in. w mechanice kwantowej.

**Słowa kluczowe:** twierdzenie spektralne, teoria spektralna

## History of the spectral theorem

### Summary

The aim of this article is to present the history of the spectral theorem, the general version of which is one of the most important results of the operator theory. For centuries, the spectral theorem has been formulated taking various forms. Its history begins in the seventeenth century with a simple theorem formulated on the Euclidean plane by Descartes. In the eighteenth century, this theorem was generalized to the  $n$ -dimensional real space. At the end of the nineteenth century there were already two versions of the spectral theorem: the reduction of the symmetric square form to the normal form and the diagonalization of the real symmetric matrix. From the twentieth century, the spectral theorem was formulated for linear operators defined on infinitely dimensional spaces, and their forms have become more and more abstract. The general version of the spectral theorem is applicable in many fields of science.

**Keywords:** spectral theorem, spectral theory

### 1. Wstęp

W algebrze liniowej i analizie funkcjonalnej mianem twierdzenia spektralnego określa się twierdzenie uogólniające twierdzenie teorii macierzy, które mówi, że dowolna macierz normalna może zostać zdiagonalizowana przy pomocy odpowiedniej macierzy przejścia (Dieudonné 1981). Traktując macierz normalną, jako macierz pewnego endomorfizmu liniowego, jest to równoznaczne ze znalezieniem bazy ortonormalnej przestrzeni euklidesowej, w której macierz ta będzie diagonalna. Teoria spektralna zajmuje się badaniem spektrum operatorów liniowych. Spektrum (inaczej: widmo) operatora liniowego jest uogólnieniem zbioru wartości własnych macierzy (Hall 2013).

### 2. Rys historyczny

Teoria spektralna ma naprawdę bogatą historię, której początki sięgają XVII wieku. Jej rozwój jest wybitnym przykładem „dopełnienia” między matematyką czystą a stosowaną.



Często siłą napędową w toku jej ewolucji była próba dostarczenia odpowiednich matematycznych podstaw do opisu różnych zjawisk fizycznych.

- Twierdzenie o osiach głównych

Za najwcześniejszą wersję współczesnego twierdzenia spektralnego możemy uznać, z perspektywy czasu, twierdzenie o osiach głównych geometrii analitycznej. Najprostsza forma tego twierdzenia jest zawarta w pismach prekursorów geometrii analitycznej René Descartes'a (Kartezjusza) (1596-1650) i Pierre'a de Fermata (1601-1665). Twierdzenie to na płaszczyźnie euklidesowej  $\mathbb{R}^2$  orzeka, że forma kwadratowa  $ax^2 + 2bxy + cy^2$  może być przekształcona przez obrót płaszczyzny do postaci normalnej  $ax^2 + \beta y^2$ , gdzie osie główne postaci normalnej pokrywają się z nowymi osiami współrzędnych. Zasadnicza część tego twierdzenia znajduje się w pracy Kartezjusza *La Geometrie* z 1637 r. i była znana także Fermatowi, ale opublikowana dopiero po jego śmierci w roku 1679. Termin „osie główne” został wprowadzony przez Leonarda Eulera (1707-1783) w jego pracy z 1765 r. o ruchu obrotowym bryły sztywnej. Euler w 1748 r. omówił również redukcję form kwadratowych w dwóch i w trzech wymiarach. Uogólnienie od  $\mathbb{R}^3$  do  $\mathbb{R}^n$  algebraicznej części tego twierdzenia zostało omówione przez Joseph'a Louisa Lagrange'a (1736-1813) w pracy o ekstremach funkcji wielu zmiennych z 1759 r. (Steen 1973). Ogólna postać twierdzenia o osiach głównych jest następująca:

Twierdzenie (sprowadzanie do osi głównych)

Niech  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ ,  $\alpha_{ij} \in \mathbb{R}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ . Każda forma kwadratowa

$$Q(\mathbf{x}) = Q(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i,j=1}^n \alpha_{ij} x_i x_j,$$

określona na  $n$ -wymiarowej przestrzeni rzeczywistej może być zapisana w postaci normalnej

$$Q(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i^2,$$

gdzie  $\lambda_i$  – pewne stałe.

(Kostrikin 2012)

W 1829 r. Augustin Louis Cauchy (1789-1867) wykazał, że współczynniki  $\lambda_i$  postaci normalnej symetrycznej formy kwadratowej muszą być rzeczywiste. Następnie w drugiej połowie XIX w. James Joseph Sylvester (1814-1897) i Arthur Cayley (1821-1895) użyli notacji macierzowej, aby usystematyzować algebraiczny opis  $n$ -wymiarowej przestrzeni. Ponadto w 1852 r. Sylvester wykazał, że współczynniki  $\lambda_i$  postaci normalnej formy  $Q(\mathbf{x}) = (A\mathbf{x}, \mathbf{x}) = \mathbf{x}^T A \mathbf{x}$  są pierwiastkami wielomianu charakterystycznego  $\det(A - \lambda I) = 0$

(gdzie  $\det(\cdot)$  jest wyznacznikiem macierzy  $\mathbb{A} - \lambda\mathbb{I}$ , a  $\mathbb{I}$  jest macierzą jednostkową). Co więcej, w latach 70 XIX wieku Cauchy udowodnił pierwsze twierdzenie spektralne dla symetrycznych rzeczywistych macierzy. Wówczas redukcji do postaci normalnej odpowiadał proces diagonalizacji macierzy (Hawkins 1975) w szczególności, twierdzenie o osiach głównych w języku macierzy mówi, że każda symetryczna macierz rzeczywista  $\mathbb{A}$  może być przedstawiona w postaci diagonalnej; innymi słowy dla pewnej ortogonalnej macierzy  $\mathbb{T}$ , macierz  $\mathbb{D} = \mathbb{T}^{-1}\mathbb{A}\mathbb{T}$  jest diagonalna. Ponadto elementy diagonalne macierzy  $\mathbb{D}$  są wartościami własnymi macierzy  $\mathbb{A}$ , tj. pierwiastkami równania charakterystycznego  $\det(\mathbb{A} - \lambda\mathbb{I}) = 0$  (Steen 1973). Zatem pod koniec XIX w. możemy dostrzec dwie wersje twierdzenia o osiach głównych: redukcję symetrycznej formy kwadratowej do postaci normalnej i diagonalizację symetrycznej macierzy rzeczywistej.

Przykład (Strang 2003)

Równania postaci  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ ,  $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$  są równaniami odpowiednio elipsy i hiperboli w przestrzeni  $\mathbb{R}^2$ . w obu przypadkach osie  $x$  i  $y$  są osiami głównymi. Sytuacja jest bardziej skomplikowana w przypadku równań postaci  $ax^2 + 2bxy + cy^2 = 1$ .

Wyznamy osie główne elipsy określonej równaniem  $5x^2 + 8xy + 5y^2 = 1$ .

Formę kwadratową  $5x^2 + 8xy + 5y^2$  zapiszemy w następującej postaci

$$5x^2 + 8xy + 5y^2 = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 4 \\ 4 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{x}^T \mathbb{A} \mathbf{x}$$

gdzie  $\mathbf{x} = (x, y)^T$ ,  $\mathbb{A} = \begin{bmatrix} 5 & 4 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}$ .

Wartościami własnymi macierzy  $\mathbb{A}$  są  $\lambda_1 = 9$  i  $\lambda_2 = 1$  z odpowiadającymi im wektorami własnymi  $\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$  oraz  $\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ . Dzieląc wektory  $\mathbf{v}_1$  i  $\mathbf{v}_2$  przez ich długości ( $\|\mathbf{v}_1\| =$

$\|\mathbf{v}_2\| = \sqrt{2}$ ) otrzymujemy wektory jednostkowe  $\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$ .

Wówczas macierz  $\mathbb{S} = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2]$  jest macierzą ortogonalną (ponieważ ma ortonormalne kolumny), a macierz  $\mathbb{A}$  jest diagonalizowalna

$$\mathbb{A} = \mathbb{S}\mathbb{D}\mathbb{S}^{-1} = \mathbb{S}\mathbb{D}\mathbb{S}^T = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Stąd  $5x^2 + 8xy + 5y^2 = \mathbf{x}^T \mathbb{A} \mathbf{x} = \mathbf{x}^T (\mathbb{S}\mathbb{D}\mathbb{S}^T) \mathbf{x} = (\mathbb{S}^T \mathbf{x})^T \mathbb{D} \mathbb{S}^T \mathbf{x} = 9 \left(\frac{x+y}{\sqrt{2}}\right)^2 + 1 \left(\frac{x-y}{\sqrt{2}}\right)^2$

Jest to postać normalna formy kwadratowej  $5x^2 + 8xy + 5y^2$ , w której współczynniki 9 i 1 są wartościami własnymi macierzy  $\mathbb{A}$ , a wewnątrz kwadratów znajdują się wektory własne

$\begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$  i  $\begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$ . Wektory własne macierzy  $A$  wyznaczają kierunki osi głównych elipsy, natomiast wartości własne długości tych osi. Jeśli oznaczymy  $\frac{x+y}{\sqrt{2}} = X$ ,  $\frac{x-y}{\sqrt{2}} = Y$ , to równanie elipsy możemy zapisać w postaci  $9X^2 + 1Y^2 = 1$ .

- Nieskończone układy równań liniowych i równania całkowe

Współczesna teoria spektralna bada, czy pewne operatory liniowe określone na nieskończenie wymiarowych przestrzeniach również mogą być przedstawione w postaci „diagonalnej”. Zatem drugim historycznym źródłem teorii spektralnej jest uogólnienie rozwiązywania układów równań liniowych o skończonej liczbie równań na rozwiązywanie układów równań liniowych o nieskończonej liczbie równań. Uogólnień takich zaczęto dokonywać najpierw w algebrze, a dopiero znacznie później w geometrii. Skończone układy równań były rozwiązywane przez cały XVIII i XIX w. najczęściej metodą eliminacji. w 1750 r. Gabriel Cramer (1704-1752) wyprowadził dla układów wymiaru  $3 \times 3$  wzory, które teraz noszą jego imię, chociaż nie znał on oczywiście pojęcia wyznacznika. Nieskończone układy równań liniowych były wykorzystywane w tym czasie do uzyskania formalnych rozwiązań równań różniczkowych metodą współczynników nieoznaczonych. Joseph Fourier (1768-1830) przypuścił pierwszy znaczący atak na problem nieskończonych układów równań, kiedy próbował pokazać w 1822 r., że każda funkcja może być przedstawiona, jako nieskończona kombinacja liniowa funkcji trygonometrycznych. Zadanie to doprowadziło go bezpośrednio do ogólnego problemu rozwiązywania nieskończonych układów równań liniowych. Jego metoda polegała na rozwiązywaniu skończonego układu  $n \times n$  zwykłymi środkami, a następnie przechodzeniu z  $n \rightarrow \infty$  (Harrell 2004) w kolejnych latach George William Hill (1838-1914), Paul Appell (1855-1930), Henri Poincaré (1854-1912) oraz Helge von Koch (1870-1924) rozwijali teorię nieskończonych wyznaczników.

Teoria nieskończonych macierzy i wyznaczników mogła bezpośrednio doprowadzić do elementarnego twierdzenia spektralnego, gdyby została uogólniona postać diagonalna twierdzenia o osiach głównych. Droga do teorii spektralnej nie była jednak tak prosta – pierwsze twierdzenie spektralne zostało uzyskane dopiero po zastosowaniu nieskończonych wyznaczników do równań całkowych. Formalna analiza równań całkowych sięga roku 1823, kiedy to norweski matematyk Niels Henrik Abel (1802-1829) użył równania całkowego do rozwiązywania uogólnionego problemu tautochrony. Nieco później, w 1837 r. Joseph Liouville (1809-1882) wprowadził iteracyjną metodę dla rozwiązywania szczególnej postaci równań całkowych. W 1877 r. Carl Neumann (1832-1925) rozszerzył metodę iteracji

Liouville'a, badając zagadnienie brzegowe dla funkcji harmoniczych. Jego prace znacznie przyspieszyły badania w teorii równań całkowych. Jednak teoria równań całkowych stała się szczególnie istotna z punktu widzenia teorii spektralnej dopiero w roku 1900. w tym roku bowiem Ivar Fredholm (1866-1927) – szwedzki matematyk, zastosował do równań całkowych teorię nieskończonych macierzy i wyznaczników, rozwiniętą przez jego kolegę von Kocha.

- Twierdzenie spektralne Hilberta

Po tym jak idee Fredholma zostały wprowadzone (przez jego współpracownika Erica Holmgrena) w 1901 r. na seminarium Davida Hilberta w Getyndze, Hilbert (1862-1943) przez następne 10 lat skupił się wyłącznie na równaniach całkowych. w serii sześciu prac opublikowanych w Getyndze, w latach 1904-1910 przedstawił on podstawowe definicje i twierdzenia teorii spektralnej i teorii „przestrzeni Hilberta”. To właśnie Hilbert po raz pierwszy wprowadził nazwę „teoria spektralna” (Harrel 2004) w swojej pracy o równaniach całkowych rozszerzył on twierdzenie o osiach głównych. Zdefiniował spektrum (widmo) formy kwadratowej, odróżnił widmo punktowe od widma ciągłego. Jednak, co najważniejsze, sformułował i udowodnił twierdzenie spektralne – nie tylko dla form symetrycznych, ale również dla form ograniczonych. Nigdy jednak nie zastosował swoich wyników, w szczególności do macierzy i przekształceń.

Począwszy od swojej pracy doktorskiej z 1905 r. napisanej pod okiem Hilberta, Erhard Schmidt (1876-1959) uogólniał i upraszczał jego prace, wprowadzając do nich język geometrii euklidesowej (Young 1988). w 1907 r. przedstawił on ostateczną teorię „przestrzeni Hilberta” - którą dziś nazywamy  $l^2$ , przestrzeń ciągów sumowalnych z kwadratem – sformułowaną w języku przestrzeni liniowych, norm i rzutów ortogonalnych. (To właśnie Schmidt uogólnił na przestrzeń  $l^2$  algorytm ortogonalizacji, który wprowadził w 1883 r. Jörgen Pederson Gram (1850-1916).) Pojęciowe uproszczenia Schmidta zostały natychmiast wykorzystane przez Ernsta Hellingera (1883-1950) i Hermana Weyla w ich pracach doktorskich z 1907 i 1908 r., napisanych również pod okiem Hilberta. w 1909 r. Hellinger przeformułował teorię form kwadratowych w nowym języku Hilberta i Schmidta. w tym samym roku Weyl opublikował obszerne badania o formach ograniczonych i ich widmach. Tak, więc, pod koniec pierwszej dekady XX w., możemy dostrzec w pracach Hilberta i jego uczniów znaczną część twierdzenia spektralnego dla operatorów ograniczonych na  $l^2$ .

Z tworzeniem teorii spektralnej Hilberta jest związany także rozwój współczesnej teorii całki. w 1894 r. Thomas Stieltjes (1856-1894) zdefiniował całkę, nazwaną od jego nazwiska całką Stieltjesa, której następnie użył Hilbert, aby otrzymać twierdzenie spektralne dla

przestrzeni  $l^2$ . w szczególności, twierdzenie spektralne Hilberta na przestrzeni  $l^2$  mówi, że każda symetryczna ograniczona forma liniowa na  $l^2$  może być przedstawiona w postaci diagonalnej. Hilbert ukończył swoją teorię spektralną identyfikując szeroką klasę operatorów, których widma ciągle są zbiorem pustym. Nazwał je operatorami pełnociągłymi (zwartymi). Operatory pełnociągłe są najbliższym nieskończenie wymiarowym odpowiednikiem operatorów na przestrzeniach skończenie wymiarowych, ponieważ ich widma składają się w całości z wartości własnych, z zerem, jako jedynym możliwym punktem skupienia.

W tym samym czasie Henri Lebesgue (1875-1941) rozwijał nową teorię całki, która teraz nosi jego imię. w 1907 r. w trzech krótkich artykułach Frigyes Riesz (1880-1956) i Ernst Fischer (1875-1959) połączyli prace Hilberta i Lebesgue'a wykazując, że przestrzeń Hilberta  $l^2$  jest izomorficzna z przestrzenią  $L^2$  – funkcji całkowalnych z kwadratem w sensie Lebesgue'a. w kolejnej pracy z 1910 r. Riesz zapoczątkował teorię spektralną na  $L^2$ , a w latach 1913-1916 udowodnił twierdzenie spektralne dla pełnociągłych operatorów samosprężonych.

- Twierdzenie spektralne w mechanice kwantowej

W 1925 r. Werner Heisenberg (1901-1976) i Erwin Schrödinger (1887-1961) podali, niezależnie od siebie, sformułowania mechaniki kwantowej: Heisenberg – macierzowe, Schrödinger – falowe. w teorii Heisenberga fizyczny fakt, że pewne obserwacje na poziomie atomowym nie mogą być dokonywane jednocześnie, został zinterpretowany matematycznie, jako nieprzemienność operacji reprezentujących te obserwacje. Wykorzystując fakt, że algebra macierzy jest nieprzemienna, Heisenberg wraz z Maxem Bornem (1882-1970) i Pascuałem Jordanem (1902-1980) przedstawili każdą wielkość fizyczną za pomocą odpowiedniej (skończonej lub nieskończonej) macierzy, zwanej odwzorowaniem. Sformułowali oni tzw. kwantową mechanikę macierzową. Schrödinger w przeciwieństwie do tego, rozszerzył mniej konwencjonalną teorię opartą o jego równanie różniczkowe cząstkowe fali. Po początkowym zaskoczeniu, okazało się, że „mechanika falowa” Schrödingera i „mechanika macierzowa” Heisenberga są opisami równoważnymi. Schrödinger zunifikował te dwa podejścia, pokazując w efekcie, że wartości własne (ogólniej widmo) operatora różniczkowego w jego równaniu fali wyznaczają odpowiednią macierz Heisenberga (Neumann 1996). Podobne wyniki zostały otrzymane przez brytyjskiego fizyka Paula Diraca (1902-1984). Stąd zainteresowanie teorią spektralną po raz kolejny stało się żywe. Sam Hilbert był zaskoczony, że widma jego form kwadratowych zostały zinterpretowane, jako widma atomów. „Rozwinąłem teorię nieskończonej ilości zmiennych z czysto matematycznych powodów, i nawet nazwałem to „analizą spektralną” bez żadnego

przecucia, że znajdzie ona później zastosowanie do rzeczywistego spektrum fizycznego”(Steen 1973). Szybko okazało się jednak, że teoria spektralna Hilberta była właściwą matematyczną podstawą dla nowej mechaniki kwantowej. Oryginalne twierdzenie spektralne Hilberta było stosowane do rzeczywistych form kwadratowych (lub nieskończonych macierzy), które były symetryczne i ograniczone. Twierdzenie to zostało szybko i łatwo rozszerzone (przez Schmidta i innych) na ograniczone macierze zespolone  $A = [a_{ij}]$  takie, że  $a_{ij} = \bar{a}_{ji}$ , nazywane hermitowskimi (samosprężonymi) od francuskiego matematyka Charlesa Hermite’a (1822-1901), który wprowadził je w 1855 r. i dowiódł, że ich wartości własne są rzeczywiste. Podobnie jak macierze symetryczne, przekształcenia hermitowskie mają rzeczywiste spektra. To właśnie hermitowskie odwzorowania nadają się w nowej mechanice do reprezentowania wielkości fizycznych. Takie operatory nazywamy obserwabłami.

- Twierdzenie spektralne von Neumanna-Stone’a

Znaczny przełom w teorii spektralnej nastąpił w latach 1927-1929, kiedy to 25-letni węgierski matematyk John von Neumann (właściwie János Lajos Neumann) zrewolucjonizował badania nad teorią spektralną przez wprowadzenie abstrakcyjnego pojęcia operatora liniowego na przestrzeni Hilberta. w 1927 r. von Neumann przedstawił teorię przekształceń mechaniki kwantowej z punktu widzenia operatorów na przestrzeni Hilberta i uznał potrzebę uogólnienia teorii spektralnej operatorów samosprężonych z przypadku ograniczonego na przypadek nieograniczony. w 1929 r. przeprowadził to rozszerzenie. w latach 1927-1932 Marshall H. Stone i John von Neumann równocześnie dowiedli ogólnej wersji twierdzenia spektralnego dla operatorów normalnych (w tym nieograniczonych), w szczególności dla operatorów samosprężonych i unitarnych (Harrell 2004). Operatory unitarne zostały wprowadzone przez Leona Autonne’a (1859-1916) w 1902 r., a następnie w 1909 r. były badane przez Isai’a Schura (1875-1941). Zgodnie z pracą Otto Toeplitza (1881-1940) z 1918 r. operatorami normalnymi nazywamy operatory, które komutują ze swoimi sprzężeniami. Toeplitz, jako pierwszy rozszerzył twierdzenie spektralne Hilberta do pełnościągłych ograniczonych normalnych form kwadratowych.

W latach 1936-1940 von Neumann i Francis J. Murray (1911-1996) badali tzw. „pierścienie” (struktury algebraiczne) utworzone ze zbioru wszystkich operatorów na przestrzeni Hilberta. w latach 1941-1943 radzieccy matematycy Izrael Gelfand (1913-2009), Mark Najmark (1909-1978) i Georgij Szyłow (1917-1975) opublikowali serię artykułów, w których położyli podstawy teorii pierścieni unormowanych. Obejmowała ona dużą część wyników von Neumanna i Murraya, a także dała podstawę do badania

transformacji Fouriera i analizy harmoniczej. w tym samym czasie podobne badania były prowadzone w Stanach Zjednoczonych przez Stone'a i Shizuo Kakutaniego (1911-2004). w 1946 r. Charles E. Rickart (1913-2002) nazwał unormowane pierścienie Gelfanda „algebrami Banacha”, aby uniknąć nieporozumień wynikających z algebraicznego znaczenia słowa „pierścień”. Gelfand zdefiniował spektrum przemiennej algebry Banacha. w 1943 r. udowodnił on wraz z Najmarkiem twierdzenie znane dzisiaj, jako twierdzenie Gelfanda-Najmarka, z którego można wywnioskować ogólne twierdzenie spektralne von Neumanna-Stone'a (Steen 1973).

Teoria spektralna von Neumanna-Stone'a dotyczy raczej analizy niż geometrii. w przestrzeni skończonej wymiarowej cała przestrzeń może być przedstawiona w postaci sumy prostej podprzestrzeni – jest to geometryczna treść twierdzenia spektralnego. w przypadku nieskończonej wymiarowej taka własność nie zachodzi. Von Neumann w swojej pracy z 1938 r., opublikowanej w roku 1949, wskrzesił geometryczne twierdzenie spektralne definiując całkę prostą przestrzeni Hilberta, która jest naturalnym uogólnieniem sumy prostej. Twierdzenie to jest znane, jako pełne twierdzenie spektralne von Neumanna dla przemiennej  $C^*$ -algebry (Grabowski i in. 1989).

### 3. Podsumowanie

W artykule została przedstawiona historia twierdzenia spektralnego, którego ogólna wersja jest jednym z najważniejszych wyników teorii operatorów liniowych. Historia ta pokazuje jak pięknie teoria spektralna rozwijała się na przestrzeni wieków oraz jak wielu wybitnych matematyków przyczyniło się do jej rozwoju. Początki teorii spektralnej sięgają XVII wieku, kiedy to niezależnie od siebie Kartezjusz i Fermat sformułowali twierdzenie o osiach głównych na płaszczyźnie euklidesowej. Twierdzenie o osiach głównych, uznawane dzisiaj za najwcześniejszą wersję twierdzenia spektralnego, zostało uogólnione w XVIII wieku przez Lagrange'a na  $n$ -wymiarową przestrzeń rzeczywistą. Momentem zwrotnym w historii teorii spektralnej okazał się rozwój teorii macierzy, który nastąpił w drugiej połowie XIX wieku. Wówczas Cauchy udowodnił pierwsze twierdzenie spektralne dotyczące diagonalizacji symetrycznych macierzy rzeczywistych. Chociaż teoria spektralna ma głębokie korzenie w przeszłości, tak naprawdę istotną rolę zaczęła odgrywać dopiero w XX wieku. Teorie nieskończonych układów równań liniowych i równań całkowych zdeterminowały kierunek rozwoju teorii spektralnej. w dużej mierze przyczynił się do tego Hilbert oraz jego uczniowie. Jednak największym przełomem w teorii spektralnej było zastosowanie jej do operatorów liniowych określonych na nieskończonej wymiarowej przestrzeniach. Uczynił to w latach 30 XX wieku John von Neumann. Pełne twierdzenie spektralne von

Neumanna okazało się matematyczną podstawą hilbertowskiej wersji mechaniki kwantowej. Jego znajomość jest niezbędna do zrozumienia zarówno matematycznej struktury teorii kwantowej jak i fizycznej interpretacji modelu matematycznego, który służy do opisu zjawisk mikroskopowych.

#### **4. Literatura**

Dieudonné J. A., 1981. History of functional analysis. Elsevier North-Holland.

Grabowski M., Ingarden R.S., 1989. Mechanika Kwantowa. Ujęcie w przestrzeni Hilberta. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa: s. 99-125.

Hall B.C., 2013. Quantum Theory for Mathematicians. Springer: s. 133

Harrell II, E.M., 2004. A Short History of Operator Theory. <http://www.mathphysics.com/opthy/OpHistory.html>

Hawkins T., 1975. Cauchy and the spectral theory for matrices. Historia mathematica 2 : s.1-29.

Kostrikin A.I., 2012. Wstęp do algebry. Algebra liniowa. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa: s. 126-128.

Von Neumann J., 1996. The mathematical foundations of quantum mechanics. Princeton University Press (pierwsze wydanie 1932 r): s. 5-6.

Steen L., 1973. Highlights in the history of spectral theory. The American Monthly, 80: s. 351-381.

Strang G., 2003. Introduction to Linear Algebra, 3<sup>rd</sup> Edition. Wellesley-Cambridge Press: s. 336-337.

Young N., 1988. An Introduction to Hilbert Space. Cambridge University Press: s. 3.



# Aspekty techniczne związane z ograniczeniem ilości ubytków naturalnych paliw płynnych

Tomasz Paweł Filipiuk <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

Tomasz Filipiuk: tomasz.filipiuk@wat.edu.pl

## Streszczenie

Paliwa płynne są produktem bardzo istotnym dla prawidłowego funkcjonowania gospodarki krajowej. Niestety z racji na swoje specyficzne właściwości fizykochemiczne wykazują skłonność do parowania. Straty z parowania traktowane są, jako ubytki produktów naftowych. Dąży się do minimalizowania ubytków poprzez stosowanie różnego rodzaju rozwiązań technicznych, które są normowane przez przepisy prawa krajowego oraz unijnego. Aspekty techniczne odnoszą się głównie do stosowania hermetyzacji oraz odzysku oparów produktów naftowych w czasie magazynowania, przyjmowania oraz wydawania. Zasadniczym problemem tych rozwiązań jest fakt, iż dotyczą jedynie produktów zaklasyfikowanych do pierwszej klasy zagrożenia pożarowego.

**Słowa kluczowe:** ubytki naturalne, hermetyzacja, paliwa płynne

## Technical aspects related to limiting the amount of losses of natural liquid fuels

### Summary

Liquid fuels are a very important product for the proper functioning of the national economy. Unfortunately, due to their specific physicochemical properties, they tend to evaporate. Waste of evaporation is treated as a loss of petroleum products. The aim is to minimize losses through the use of various types of technical solutions, which are regulated by the provisions of national and EU law. Technical aspects mainly relate to the use of hermetization and recovery of petroleum product vapors during storage, receipt and dispensing. The basic problem of these solutions is the fact that they concern only products classified to the first fire hazard class.

**Keywords:** natural losses, hermetisation, liquid fuels

### 1. Wstęp

Obecnie stosowane rozwiązania techniczne związane z ograniczeniem ilości ubytków naturalnych paliw płynnych odnoszą się jedynie do ograniczania ilości par produktów naftowych należących do I klasy zagrożenia pożarowego. Klasy zagrożenia pożarowego dzielą produkty naftowe na podstawie temperatury zapłonu. W zależności od wartości tego parametru, paliwa ciekłe są klasyfikowane na trzy klasy zagrożenia pożarowego, takie jak (Dz.U. 2014 poz. 1853):

- I klasa – produkty o  $T_Z < 21^\circ\text{C}$ ;
- II klasa – produkty o  $21^\circ\text{C} \leq T_Z < 55^\circ\text{C}$ ;
- III klasa – produkty o  $55^\circ\text{C} \leq T_Z < 100^\circ\text{C}$ .

Stosowane rozwiązania związane z ograniczeniem ilości ubytków naturalnych odnoszą się do wielu kwestii. W celu zmniejszania ubytków naturalnych, zarówno zawinionych jak i niezawinionych, stosuje się wiele metod w postaci systemów oraz różnego rodzaju urządzeń.

Rozwiązania stosowane do ograniczania ubytków odnoszą się do trzech kategorii działań: aspektów organizacyjnych, aspektów technicznych oraz aspektów finansowych.

Aspekty organizacyjne odnoszą się do przepisów prawa, stosowanych norm i standardów proceduralnych. Aspekty techniczne związane są z infrastrukturą wykorzystywaną w systemie logistycznym paliw ciekłych. W tym przypadku zwraca się uwagę na rodzaje konstrukcji zbiorników, stosowane urządzenia oraz sposoby wykonywania operacji paliwowych takich jak przyjmowanie i wydawanie paliw ciekłych. Natomiast aspekt finansowy odnosi się do problemu wnoszenia opłat przez podmioty, które na skutek prowadzonej działalności gospodarczej emitują węglowodory do atmosfery.

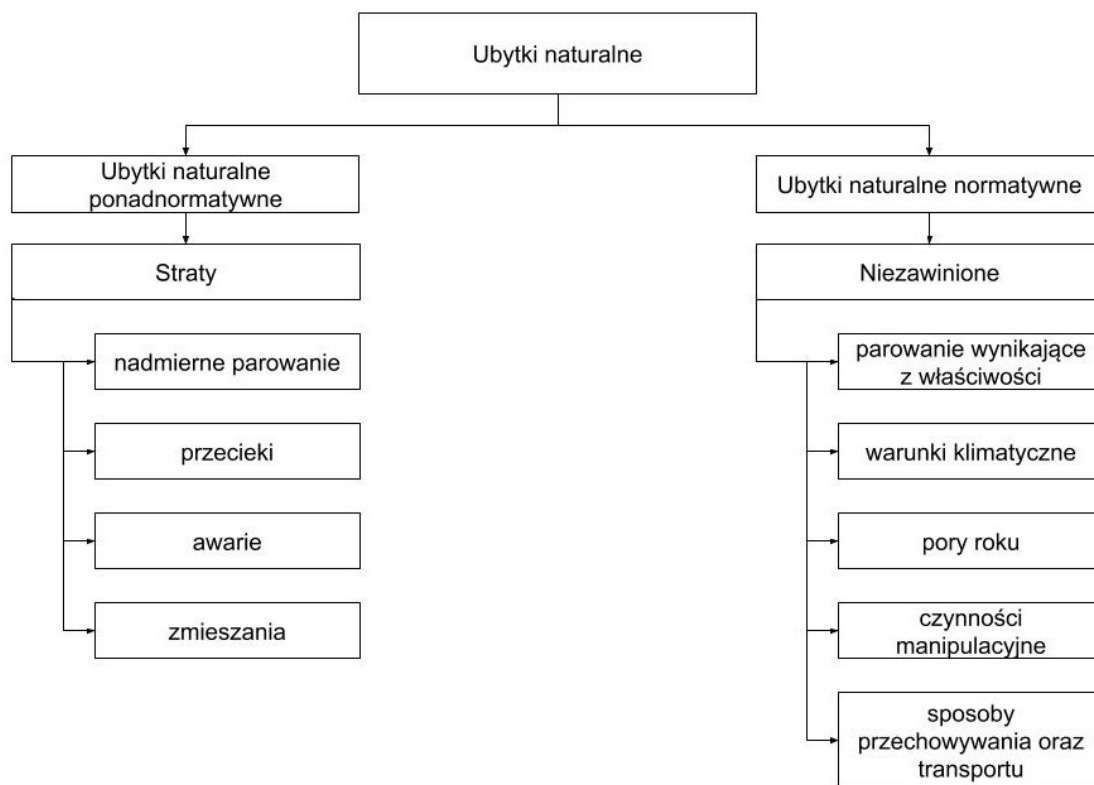
## **2. Problem ubytków paliw płynnych**

Dokonując charakterystyki ubytków naturalnych należy wyjaśnić znaczenie słowa ubytek, które zgodnie ze Słownikiem Języka Polskiego definiowane jest, jako zmniejszenie ilości albo liczby czegoś. Ubytek jest to różnica ilości pomiędzy stanem początkowym, a końcowym. Natomiast ubytek naturalny towarów oraz materiałów rozumiany jest, jako ubytek masy w czasie magazynowania, transportu i dystrybucji, powstających na skutek odparowania, wysychania, rozsypywania się oraz korozji. Pojęcie ubytki naturalne definiowane jest, jako „zmniejszenie się ilości produktu w związku z jego charakterystycznymi właściwościami fizykochemicznymi (np. intensywność parowania) bądź też na skutek nieuniknionych strat manipulacyjnych” (Ministerstwo Obrony Narodowej, 2006). Ubytki naturalne w działalności gospodarczej nie są traktowane, jako dodatkowe koszty, ponieważ wartość towaru lub materiału w momencie zakupu uwzględnia już koszty z tytułu ubytków naturalnych, niezależnie od tego czy powstaną, czy też nie. Kwestie tego typu regulują dopuszczalne normy ubytków naturalnych różnych towarów i materiałów. Ubytki naturalne paliw płynnych można podzielić na dwa rodzaje (Ministerstwo Obrony Narodowej, 2006):

- ubytki normatywne (UNN) – ubytki naliczane na podstawie określonych norm;
- ubytki rzeczywiste (UNRz) – jeżeli ich ilość jest mniejsza lub równa ubytkom naturalnym, jest to różnica pomiędzy stanem ewidencyjnym w dokumentacji księgowej, a stanem faktycznym produktów naftowych.

Ubytki naturalne paliw płynnych podlegają normowaniu i kontroli państwowych służb do momentu, kiedy nie zostanie opłacony podatek akcyzowy za dany produkt. Od momentu opłacenia podatku akcyzowego problem normowania ubytków naturalnych paliw przechodzi na właściciela produktu naftowego.

Ubytki naturalne są bardzo trudne do sklasyfikowania oraz podzielenia, dodatkowo uwzględniając, iż niektóre ubytki to strata, powstaje bardzo ciekawa, ale i skomplikowana sieć zależności. Podział ubytków naturalnych został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Klasyfikacja ubytków naturalnych oraz przyczyny ich powstawania (opracowanie własne)

Wielkości ubytków naturalnych określone są przez normy, z tego względu można wyróżnić ubytki naturalne normatywne, czyli takie, które są dopuszczalne przez uwarunkowania prawne oraz ubytki ponadnormatywne, czyli straty (rys. 1). Ubytki normatywne produktów naftowych i ich dopuszczalne normy odnoszą się do warunków klimatycznych, pór roku, sposobu przechowywania, transportowania oraz wykonywania czynności manipulacyjnych, rodzaju opakowania. Natomiast ubytki ponadnormatywne są wynikiem przecieków, rozlań lub nadmiernego parowania (Ministerstwo Obrony Narodowej, 2006). W takiej sytuacji powstają straty produktów naftowych. Straty mogą powstać na skutek (Kałdoński, 1991):

- nadmiernego parowania produktów naftowych;
- przecieków wynikających z eksploatacji urządzeń paliwowych;
- awaryjnego uszkodzenia urządzeń paliwowych, ze szczególnym uwzględnieniem uszkodzeń zbiorników lub rurociągów;
- zmieszania różnych gatunków paliwa w trakcie wykonywania prac manipulacyjnych;

Zmniejszenie ilościowe produktów naftowych, wynikające z parowania, są najbardziej uciążliwe oraz powodują największe zagrożenia. Dzieli się je na wentylacyjne, „dużego oddechu”, „małego oddechu” oraz nasycenia przestrzeni gazowej zbiornika.

### **3. Przedstawienie metod ograniczania ubytków naturalnych paliw płynnych**

Problem powstawania ubytków naturalnych jest bardzo uciążliwy i praktycznie nie do powstrzymania. Nie da się, bowiem ograniczyć do zera ilość powstających ubytków naturalnych paliw. Ograniczenie do zera jest niemożliwe, ponieważ paliwa płynne posiadają własne, charakterystyczne dla danego rodzaju, właściwości. Dąży się od osiągnięcia odpowiednich właściwości, dzięki, którym uzyskana zostanie największa sprawność pracy silnika. Niestety właściwości, które wpływają na tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej, takie jak lotność wynikająca zprężności par i składu frakcyjnego oraz siła napięcia powierzchniowego danego produktu, wpływają na wzrost powstawania ubytków naturalnych. Można wyróżnić zastępujące metody ograniczania ubytków naturalnych w systemie logistycznym paliw ciekłych:

- stosowanie zbiorników z dachem pływającym;
- montowanie pontonów pływających wewnątrz zbiorników z dachem stałym;
- budowanie zbiorników podziemnych;
- hermetyzacja operacji nalewu oraz spustu paliw płynnych;
- stosownie oddolnego nalewu cystern kolejowych oraz samochodowych;
- wykonywanie operacji napełniania zbiorników w nocy, a opróżniania w dzień;
- malowanie zbiorników odpowiednią farbą;
- termoizolacja dachu zbiornika;
- chłodzenie dachu i płaszcza zbiornika wodą;
- stosowanie obwałowań oraz ocienienie drzewami;
- magazynowanie pod ciśnieniem;
- wychwytywanie par produktów naftowych;
- stosowanie złączy suchoodcinających.

Wymienione wyżej metody są stosowane od dłuższego czasu, za najnowsze można uznać wychwytywanie par produktów naftowych oraz stosowanie złączy suchoodcinających. Stosowanie zbiorników z dachem pływającym pozwala na ograniczenie strat wynikających z parowania produktów naftowych 4-5 razy w stosunku do magazynowania tego samego paliwa, przez ten sam okres czasu, w tym samym okresie, w zbiorniku z dachem stałym. Dach pływający najbardziej opłaca się stosować, kiedy operacje wydawania i przyjmowania

wykonywane są często. Przesłanką do zastosowania dachów pływających jest fakt, iż aby zmniejszyć straty produktów naftowych wynikających z parowania, trzeba maksymalnie zmniejszyć strefę gazową zbiornika. Stosowanie pontonów pływających wewnątrz zbiorników z dachem stałym pozwalają na zmniejszenie strefy gazowej zbiornika, przy niewielkiej ingerencji w konstrukcję budowli.

Jak wiadomo im wyższa temperatura otoczenia tym produkt naftowy paruje szybciej, a strefa gazowa w zbiorniku ulega sprężeniu. W takiej sytuacji pewna część oparów produktów naftowych, w celu wyregulowania poziomu ciśnień, powinna zostać wypuszczona poza zbiornik do atmosfery. W celu wyeliminowania negatywnych skutków wzrostu temperatury stosuje się metody pozwalające na obniżenie temperatury paliwa znajdującego się w zbiorniku. Budowanie zbiorników podziemnych oraz półpodziemnych pozwala na zmniejszenie amplitudy temperatur magazynowanego w zbiorniku. Chłodzenie dachu i płaszcza zbiornika wodą, ocienianie drzewami i stosowanie obwałowań, daje dość wymierne korzyści jednak metody te są skuteczne i nie wymagają dużych nakładów inwestycyjnych. Zaleca się malowanie zbiorników farbami o jasnych barwach, o dużej zdolności do odbijania promieni słonecznych padających na płaszczyznę zbiornika. Można również stosować termoizolację, która eliminuje w znacznym stopniu wpływ czynników atmosferycznych na wzrost temperatury paliwa. Duże korzyści daje magazynowanie pod ciśnieniem, ale do tego celu potrzebne są zbiorniki o specjalnej wzmocnionej konstrukcji oraz wyposażone w dodatkowy sprzęt techniczny pozwalający na utrzymanie odpowiedniego ciśnienia wewnątrz zbiornika.

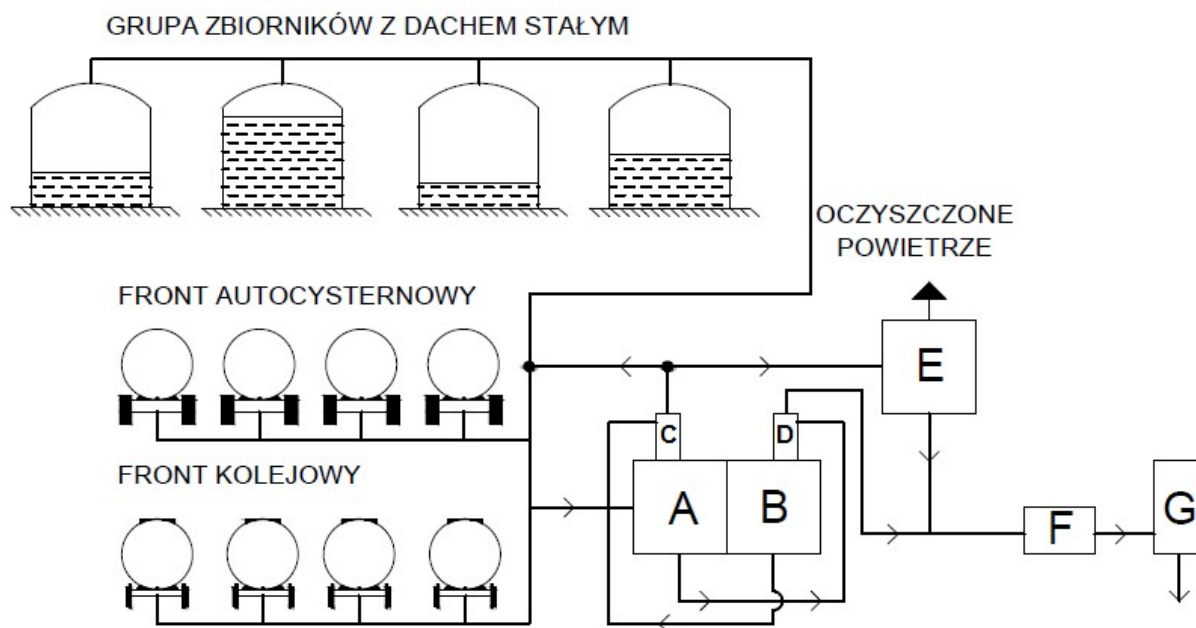
Od 2006 roku, zgodnie z obowiązującym w kraju prawem dla potrzeb dystrybucji paliw I klasy zagrożenia pożarowego, powszechnie stosowane są złącza suchoodcinające, służące do szybkiego łączenia oraz rozłączania instalacyjnych. Suchość złącza polega na tym, że podczas rozłączania przewodów z instalacją nie dochodzi do rozlania paliwa. Mimo, iż mechanizm tego typu złącza jest tak wykonany, aby nie dochodziło do rozlania paliwa, producenci podają, iż może dojść do minimalnego wycieku.

Bardzo dobrym rozwiązaniem jest hermetyzacja, która może być stosowana w rozlewniach paliw, bazach i terminalach paliw oraz na stacjach paliw.

### **3. Hermetyzacja operacji paliwowych**

Hermetyzacja w bazie paliw opiera się na zasadzie połączenia ze sobą wszystkich obiektów oraz elementów infrastruktury, w których zachodzi możliwość przedostania się par produktów naftowych do atmosfery. Wszystkie zbiorniki, instalacje nalewcze oraz instalacje odzysku par

połączone są ze sobą siecią rurociągów. Rurociągi te odpowiadają za przepływ par produktów naftowych.

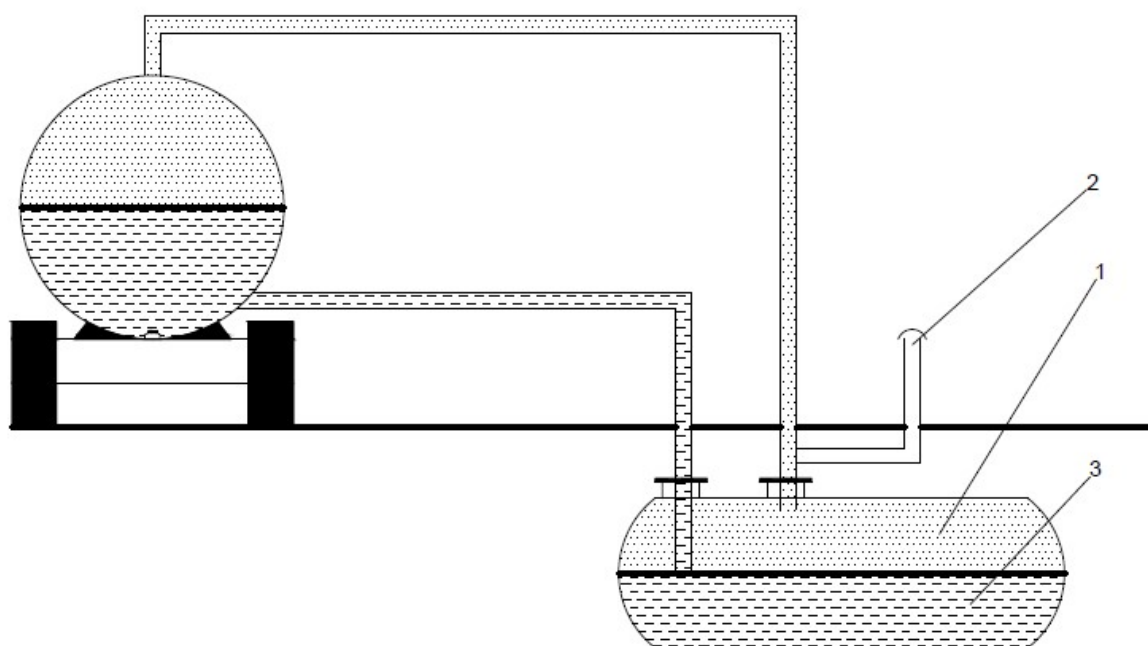


Rys. 2. Schemat ideowy stosowania hermetyzacji w bazach paliw; A – komora A zbiornika absorbentu, B - komora B zbiornika absorbentu, C – kolumna destylacyjna na komorze A, D – kolumna absorpcyjna na komorze B, E – adsorber, F – układ próżniowy, G – węzeł odzysku węglowodorów (opracowanie własne na podstawie Baczewski, Kałdoński, 2005; Patent PL 193894 B1)

Przedstawiony na rys. 2 schemat obrazuje, jak wygląda hermetyzacja w bazie paliw, wraz z oczyszczaniem gazów z węglowodorów. Opary produktów naftowych, znajdujące się w strefach gazowych zbiorników magazynowych oraz cysternach kolejowych i drogowych, kierowane są do komory A zbiornika z absorbentem. Gazy przepływają przez kolumnę umieszczoną na komorze A i w ten sposób nasycają absorbent lekkimi węglowodorami. Gazy przemieszczane są z komory A do komory B, gdzie dochodzi do nasycenia absorbentu węglowodorami. Z komory B absorbent jest przemieszczany do kolumny na komorze A, skąd może być kierowany do adsorbera E lub do stref gazowych zbiorników magazynowych, cystern kolejowych oraz drogowych. Adsorber składa się z dwóch działających przemiennie kolumn, w których zubożone w węglowodory gazy poddają procesowi adsorpcji oraz desorpcji. W wyniku procesu adsorpcji otrzymuje się oczyszczone powietrze, które może zostać wypuszczone do atmosfery, natomiast w procesie desorpcji odzyskiwane są węglowodory lekkie. Uzyskane w ten sposób węglowodory kierowane są do układu próżniowego F, skąd przemieszczane są do węzła odzysku węglowodorów G. Absorbent ciężkich węglowodorów, pozostających w komorze A zbiornika absorbentu, jest kierowany do układu próżniowego F, skąd przetłaczany jest do węzła odzysku węglowodorów. Kiedy w sieci hermetyzacji ciśnienie spadnie poniżej wartości 100,5 kPa, możliwe jest zassanie do

komory A czystego powietrza, które przepływając przez kolumnę na komorze A, spowoduje dodatkową desorpcję węglowodorów. Nie można łączyć hermetyzacji oraz zbiorników z dachem pływającym, ponieważ nie da się zastosować hermetyzacji w zbiorniku, gdzie praktycznie nie występuje strefa gazowa.

Hermetyzacja na stacji paliw opiera się na dwóch rozwiązaniach. Pierwsze z nich odnosi się do napełniania zbiorników magazynowych stacji paliw z cysterny samochodowej. Podczas tej operacji wykorzystuje się zasadę „wahadła gazowego”, a metoda ta nazywana jest dużym wahadłem gazowym, czyli system VRS I (ang. VaporRecover System).



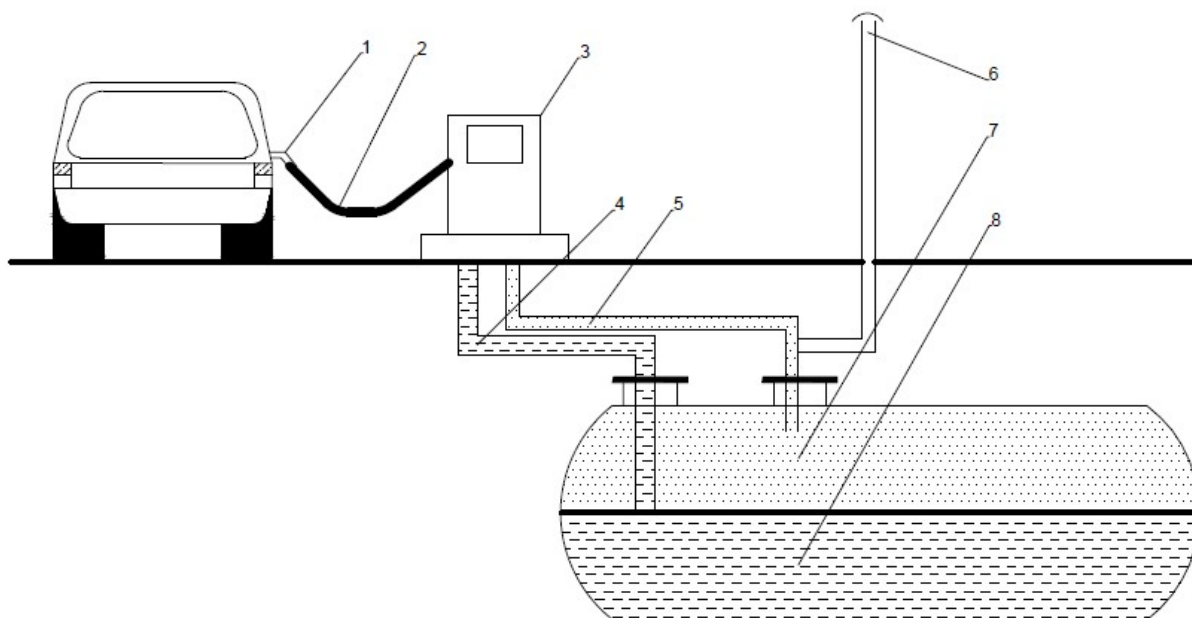
Rys. 3. Hermetyzacja systemu VRS I; 1 - opary produktów naftowych (strefa gazowa), 2 – zawór oddechowy instalacji, 3 – paliwo ciekłe (opracowanie własne)

Zasada hermetyzacji, przedstawiona na rys. 3, polega na przepływie par włączanego do zbiornika stacji paliw paliwa, poprzez odpowiedni przewód, z komory cysterny samochodowej. W ten sposób zawór wdechowo-wydechowy w cysternie nie musi pobierać z atmosfery powietrza, a zbiornik magazynowy na stacji paliw nie oddaje do atmosfery par produktów naftowych przez zawory bezpieczeństwa. Przepływ par produktów naftowych odbywa się na skutek wymuszenia przepływu, przez podnoszenie poziomu cieczy w zbiorniku. W ten sposób powstaje różnica ciśnień, która jest na tyle duża, aby pokonać opory przepływu i przedostać się do komory cysterny drogowej. Sprawność procesu hermetyzacji, który opiera się na działaniu „wahadła gazowego” może sięgać, 90% (według niektórych źródeł nawet 99,8%), co świadczy o bardzo dużej skuteczności danej metody.

Drugi sposób odnosi się do procesu tankowania pojazdu na stacji paliw. Odzyskiwanie par produktów naftowych w tym procesie może odbywać się przy pomocy wykorzystania

wahadła gazowego lub poprzez odpompowanie oparów produktów naftowych z wykorzystaniem odpowiednich pomp.

W czasie tankowania pojazdu na stacji paliw wykorzystuje się tak zwane małe wahadło gazowe, czyli system VRS II.



Rys. 4. Schemat systemu VRS II; 1 – pistolet paliwowy, 2 – wąż COAX, 3 – dystrybutor, 4 – rurociąg paliwowy, 5 – rurociąg oparów, 6 – zawór oddechowy, 7 – strefa gazowa, 8 – paliwo ciekłe (benzyna silnikowa) (opracowanie własne na podstawie Baczewski, Kałdoński, 2005)

Małe wahadło gazowe (VRS II) zaprezentowane na rys. 4. przedstawia wymuszony obieg par benzyny. W momencie podniesienia pistoletu paliwowego włączają się dwie pompy, jedna do tłoczenia paliwa, a druga do odbioru oparów. Z pistoletu paliwo wlewane jest do zbiornika pojazdu przy pomocy pompy paliwa, a specjalna nasadka przy pistolecie odbiera opary, przy pomocy pompy oparów. Wąż składa się z dwóch przewodów, jeden wewnątrz drugiego. Węższym, wewnętrznym przewodem odsysane są opary, a płaszczem zewnętrznym przetłaczane jest paliwo. Wąż trafia do kolumny dystrybutora, w której zamontowany jest specjalny rozdzielacz, oddzielający od siebie dwa przewody. Jeden obwód, połączony jest z pompą paliwa i odpowiada za tłoczenie paliwa do zbiornika pojazdu. Drugi natomiast, połączony jest z pompą oparów i przetłacza opary ze zbiornika pojazdu do zbiornika magazynowego stacji paliw.

Wykorzystanie hermetyzacji w operacjach paliwowych daje bardzo duże korzyści w kwestii ograniczenia ilości par produktów naftowych przedostających się do atmosfery. Ten fakt wpływa na mniejsze koszty, jakie dany operator paliw ponosi z tytułu wprowadzania do atmosfery par węglowodorów, za które musi uiszczać odpowiednie opłaty.



#### **4. Aspekt prawny problemu ubytków naturalnych paliw płynnych w odniesieniu do rozwiązań technicznych**

Głównym dokumentem określającym jak należy przeprowadzać operacje paliwowe w bazach i stacjach paliw oraz jak powinna wyglądać infrastruktura techniczna tych obiektów jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie. Niestety postanowienia zawarte w tym akcie prawnym odnoszą się jedynie do produktów zaklasyfikowanych do I klasy zagrożenia pożarowego. Dokument ten nakazuje stosowanie:

- hermetyzacji procesów magazynowania, napełniania oraz opróżniania;
- określonych warunków pracy instalacji do odzysku oparów produktów naftowych;
- odprowadzenia par produktów naftowych w czasie napełniania oraz opróżniania cystern drogowych i kolejowych;
- hermetyzacji operacji napełniania oraz opróżniania cystern, która powinna minimalizować straty poniżej poziomu 0,005% w stosunku do wydajności urządzeń paliwowych;
- w każdej bazie paliw przynajmniej jednego stanowiska oddolnego napełniania cystern;
- ramion odprowadzania oparów produktów naftowych dla stanowisk oddolnego napełniania cystern;
- w stanowiskach odgórnego napełniania systemów odprowadzania par;
- uszczelnień wstępnych oraz dodatkowych w zbiornikach z dachem pływającym, które pozwalają na ograniczenie o 95% strat produktów naftowych;
- odpowiedniego przyłączenia do instalacji odzysku oparów dla zbiorników z dachem stałym;
- na stacjach paliw urządzeń ograniczających emisję par produktów naftowych do atmosfery, urządzeń do odzysku par pozwalających na odzyskanie minimum 85% oparów, które mogły by przedostać się do atmosfery;

dla produktów zaklasyfikowanych do I klasy zagrożenia pożarowego.

Fakt, iż pary produktów naftowych przedostają się do atmosfery, przez co zmniejsza się masa paliwa, powoduje, iż na każdym etapie systemu logistycznego paliw ciekłych powstają straty, za które ktoś musi zapłacić. Stawki tych opłat zawarte są w Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 3 października 2018 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2019 (tab. 1).

Tabela 1. Jednostkowe stawki w zł opłat za gazy wprowadzane do powietrza podczas przeładunku benzyny silnikowej w jednostce 1 Mg

Lp.	Rodzaj operacji	Stawka
1.	Napełnianie zbiorników z dachem stałym	6,07
2.	Opróżnianie zbiorników z dachem pływającym	0,36
3.	Napełnianie zbiorników podziemnych	3,22
4.	Napełnianie zbiorników naziemnych w kontenerowych stacjach paliw	3,22
5.	Napełnianie cystern kolejowych	2,49
6.	Napełnianie cystern samochodowych	1,75
7.	Napełnianie zbiorników pojazdów	3,59

Przedstawione w tab. 1 stawki opłat za wprowadzanie do powietrza gazów podczas przetłaczania benzyny silnikowej są stosunkowo wysokie. Co ciekawe, z roku na rok stawki te są coraz wyższe i najprawdopodobniej będą ciągle wzrastać. Wnoszenie opłat za korzystanie ze środowiska jest warunkiem koniecznym, kiedy w obrocie paliwowym znajduje się benzyna silnikowa.

Jak wynika z przepisów prawa wszelkie sposoby ograniczania ilości powstających ubytków naturalnych produktów naftowych, a w szczególności par tych produktów odnoszą się do produktów naftowych zaklasyfikowanych do I klasy zagrożenia pożarowego.

## 5. Wnioski

Przedstawione w artykule kwestie pozwalają na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- 1) Ubytki naturalne wynikają z właściwości fizykochemicznych paliw, warunków atmosferycznych i klimatycznych oraz rodzaju oddziaływań techniczno-organizacyjnych.
- 2) Ilość ubytków naturalnych paliw ciekłych przedostających się do atmosfery determinowana jest głównie przez lotność danego rodzaju paliwa np. benzyna silnikowa.
- 3) Straty produktów naftowych powstają głównie z powodu parowania tych cieczy.
- 4) Akty prawa polskiego podają, w jaki sposób należy wykonywać operacje paliwowe ukierunkowane na minimalizację ubytków naturalnych, podaje rozwiązania i metody, jednak nie nakazuje stosować ich do wszystkich paliw, a jedynie paliw zaklasyfikowanych do I klasy zagrożenia pożarowego.
- 5) Hermetyzacja daje duże możliwości ograniczenia ilości ubytków naturalnych, stąd zasadnym wydaje się zastosowanie tej metody dla paliw zaklasyfikowane do II i III klasy zagrożenia pożarowego.

## 6. Literatura

Baczewski K., Kałdoński T., 2005. Paliwa do silników o zapłonie iskrowym. WKŁ: 45, 156-158.

Kałdoński T.,1991. Eksploatacja urządzeń MPS. Cz. I. T.2, Użytkowanie zbiorników i gospodarka magazynowa. WAT: 54.

Ministerstwo Obrony Narodowej,Warszawa 2006. Sztab Generalny Wojska Polskiego: Normy ubytków naturalnych materiałów pędnych i smarów.

Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2014 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie (Dz.U. 2014 poz. 1853).

Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 3 października 2018 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2019 (M.P. 2018 poz. 1038).

Patent PL 193894 B1. Sposób oczyszczania gazów z węglowodorów, zwłaszcza gazów odlotowych pochodzących z hermetyzacji procesów magazynowania i dystrybucji produktów naftowych.

# **Koncepcja, projekt i wstępna implementacja otwartoźródłowej platformy do automatycznej detekcji, wstępnej klasyfikacji i badania zdarzeń akustycznych**

**Konrad Janowski <sup>(1)</sup>, Maciej Walczyński <sup>(1)</sup>**

<sup>1</sup>Katedra Akustyki i Multimediów, Politechnika Wroclawska  
Konrad Janowski: maciej.walczynski@pwr.edu.pl

## **Streszczenie**

W niniejszym artykule przedstawiona została koncepcja budowy i implementacji otwartoźródłowej platformy do detekcji i wstępnej klasyfikacji zdarzeń akustycznych. W dobie szczególnie szybkiego rozwoju metod uczenia maszynowego budowanie rozległych baz danych zawierających zapis zdarzeń akustycznych różnego rodzaju wydaje się być szczególnie potrzebne. W pracy przedstawiono koncepcję aplikacji zaimplementowanej w skryptowym, interpretowanym i multiplatformowym języku Python. Zastosowanie tego narzędzia o prostej i intuicyjnej składni pozwoli na przyłączenie się do projektu specjalistów z zakresu akustyki, którzy nie muszą posiadać zbyt dużego doświadczenia w programowaniu. W artykule zaprezentowane zostały też przykładowe wyniki testów aplikacji w zakresie ekstrakcji zdarzeń akustycznych.

**Słowa kluczowe:** cyfrowe przetwarzanie sygnałów akustycznych, edukacja, algorytmika

## **Concept, design and initial implementation of an open source application to automatic detection, initial classification and acoustic events research**

### **Summary**

This paper presents the concept of building structure and implementation examples of an open source platform for detection and preliminary classification of acoustic events. In the era of particularly rapid development of machine learning methods, building extensive databases containing acoustic events of various types seems to be particularly needed. The paper presents the concept of an application implemented in scripting, interpreted and multiplatform programming language Python. That simple, but powerful programming language is well known for its simple and intuitive syntax. That allows a specialists in the field of acoustic, who do not need to have too much programming experience to join the project. The article also presents examples of test results of applications in the field of acoustic events extraction.

**Keywords:** digital signal processing, education, algorithms

### **1. Wstęp**

Świat akustyki musi w dzisiejszych czasach mierzyć się z problemami, o których w przeszłości nie trzeba było myśleć z większą uwagą. Wraz z rozwojem technologii komputerowej i cyfryzacji w wielu zastosowaniach akustyki gromadzenie dużej ilości danych okazuje się bardziej korzystne niż jedynie ich wystarczającej, minimalnej ilości. Więcej danych pozwala dokładniej oszacować badane wartości, a co za tym idzie zwiększyć wiarygodność pomiarów.

Jedną z dziedzin, która zyskuje, i potencjalnie może zyskać jeszcze więcej, jest akustyka środowiskowa, jak również akustyka związana z oceną zagrożenia hałasem. W przeszłości, ilość próbek możliwych do zebrania była ograniczona poprzez sprzęt służący do ich nagrywania. Nośniki były drogie, ich gabaryty często nie były małe, a dostęp do nich

był ograniczony. W związku z tym często niemożliwym było zrobienie nadmiaru nagrań. Aby sobie z tym poradzić wypracowano metody szacowania pewnych wskaźników na podstawie estymacji niepełnej liczby danych. Dla przykładu, gdy należało ocenić zagrożenie hałasem od maszyny w hali produkcyjnej, nagrywano zaledwie kilka cykli jej działania, które trwały jedynie wycinek całego dnia jej pracy, i na tej podstawie szacowano całościowe narażenie na hałas.

W dobie cyfryzacji ten aspekt jest coraz mniejszym problemem. Nośniki danych są niewielkich rozmiarów, wiele urządzeń obsługuje pamięć zewnętrzną, a przetworniki mogą pracować przez długi czas przy niskim zużyciu energii.

Pomimo tych udogodnień niejednokrotnie zdarza się, że rezygnuje się ze zbierania dużej ilości danych ze względu na problem z ich późniejszą interpretacją. Mając do dyspozycji wiele godzin nagrania, często analiza wskaźników uśrednionych dla całości trwania nagrania nie daje wiarygodnych danych. Występuje wtedy potrzeba analizy tylko wybranych fragmentów, na przykład tylko czasu, w którym maszyna pracuje. Tutaj pojawia się pytanie, w jaki sposób z nagrania wyekstrahować jedynie te fragmenty do analizy? Niektóre mierniki poziomu dźwięku posiadają funkcję analizy jedynie po przekroczeniu pewnych parametrów, funkcjonalność ta jednak ogranicza się do obliczania wskaźników w czasie rzeczywistym. Autorzy nie spotkali się z implementacją pozwalającą analizować wcześniej zarejestrowane pliki. Takie rozwiązanie czasem może okazać się wystarczające, co jednak gdy chcielibyśmy ten sam materiał dźwiękowy przeanalizować za każdym razem wyszukując inne zdarzenia? Nie zawsze istnieje możliwość wiernego powtórzenia warunków akustycznych panujących podczas nagrania.

Oprogramowanie, które zostało stworzone może odpowiedzieć na te i podobne potrzeby. Przedmiotem publikacji jest początek otwartej źródłowej platformy do automatycznej detekcji, wstępnej kwalifikacji i badania zdarzeń akustycznych. Autorzy mają nadzieję, że rozwiązanie to w przyszłości będzie rozwijane i zbuduje dobre, otwarte narzędzie do analizy dużej ilości próbek dźwiękowych.

W kolejnych rozdziałach dokładniej omówione zostaną szczegóły implementacji rozwiązania, przeprowadzone testy oraz proponowane kierunki rozwoju.

## **2. Metody wykrywania zdarzeń**

W tym rozdziale zostanie przedstawiona przyjęta definicja zdarzenia akustycznego oraz sposób jego wykrywania.

Zdecydowano się na zaczerpnięcie definicji zdarzenia akustycznego z normy dotyczącej opisu i oceny hałasu środowiskowego (PN-ISO-1996-1:2006, 2006). Zdecydowano o zastosowaniu definicji uproszczonej.

*Należy podawać czas trwania zdarzenia w odniesieniu do pewnej cechy dźwięku, jak np. liczba przekroczeń pewnego ustalonego poziomu.*

*Przykład: czas trwania zdarzenia można zdefiniować, jako całkowity czas, w którym poziom ciśnienia akustycznego mieści się w zakresie 10dB maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego podczas zdarzenia(PN-ISO-1996-1:2006, 2006).*

W pracy do definicji zdarzenia akustycznego zalicza się wszystkie wydarzenia, które przekroczą zadany poziom ciśnienia akustycznego bez względu na maksima w materiale. Autorzy zdają sobie sprawę, że przez to obecna forma narzędzia jest nieco mniej użyteczna w praktyce, ale to uproszczenie pozwoliło na stworzenie gotowego, w pełni funkcjonalnego narzędzia, które może być rozbudowywane i w przyszłości otwarte na implementację bardziej dokładnych metod klasyfikacji.

Przedstawione narzędzie wykrywa, więc w materiale dźwiękowym zdarzenia zgodnie z przytoczoną definicją. Co było niezwykle istotne podczas projektowania, oprogramowanie jest zupełnie niewrażliwe na wielkość pliku. Poza wymaganiami w postaci odpowiedniej ilości miejsca w pamięci trwałej komputera, krytyczne zasoby takie jak pamięć RAM i moc obliczeniowa procesora pozostają niezmiennie w funkcji długości i wielkości pliku. Poprzez zastosowanie przetwarzania fragmentarycznego, czyli dzielenia pliku na mniejsze części i przetwarzanie ich sekwencyjnie, dłuższe pliki będą przetwarzane w dłuższym czasie, ale przy takim samym zużyciu zasobów systemowych. Jest to szczególnie ważne w zastosowaniach naukowych i edukacyjnych, gdyż nie wszyscy studenci i pracownicy naukowcy mają swobodny dostęp do komputerów dużej mocy. Możliwe będzie także uruchomienie równoległej wersji przetwarzania na komputerze dużej mocy dysponującym wieloma procesorami.

Po jasnym zdefiniowaniu zdarzenia akustycznego, jakie należy wykryć, przejdźmy do omówienia samego mechanizmu detekcji. Na razie pominięte zostaną szczegóły implementacyjne takie jak język programowania, platforma czy sposób pobierania danych wejściowych i oddawania danych wyjściowych. Te aspekty zostaną poruszone w rozdziale trzecim. W tej części uwaga zostanie skupiona na idei przetwarzania sygnału od wejścia do wyjścia. Zostanie wyjaśnione, w jaki sposób przetwarzane są duże pliki, które pomimo przetwarzania fragmentarycznego zachowują ciągłość informacji.

Pierwszym blokiem przetwarzania jest odnalezienie plików dźwiękowych zapisanych na dysku. W tym miejscu do programu zostaje podana ścieżka do folderu plików. W zadanym folderze odnajdywane są wszystkie pliki dźwiękowe oraz plik referencyjny. Wszystkie pliki niebędące plikami dźwiękowymi zostaną zignorowane. Funkcjonalność ta jest istotna głównie z punktu widzenia praktycznego użytkownika. Nie trzeba podawać osobno ścieżki do każdego pliku, który należy analizować a dodatkowo można swobodnie umieszczać w tym samym folderze notatki (np. w pliku tekstowym).

Po zlokalizowaniu dokładnych ścieżek do wszystkich plików dźwiękowych następuje odczytanie pliku referencyjnego. Plik referencyjny odczytywany jest w całości gdyż nie spodziewa się bardzo długiego nagrania referencyjnego. Jest to jedna z niewielu różnic przy przetwarzaniu pliku referencyjnego i plików docelowych, które są przetwarzane fragmentami.

Po odczytaniu danych z pliku sygnał zostaje skorygowany częstotliwościowo i uśredniony w czasie, zgodnie z zaleceniami wcześniej cytowanej normy. W tym miejscu stosowany jest algorytm przetwarzania cyfrowego opisany w normie, gdzie korekcja częstotliwościowa wykonywana jest przy pomocy filtra częstotliwościowego o charakterystyce odpowiadającej zadanej krzywej korekcyjnej: A, B lub C. Uśrednianie w czasie odbywa się przy pomocy filtra dolnoprzepustowego o jednym biegunie, odpowiadającego stałej czasowym „fast” lub „slow”.

Na wyjściu poprzedniego bloku otrzymywany jest sygnał przetworzony w sposób umożliwiający odczytanie skorygowanego częstotliwościowo i uśrednionego w czasie poziomu ciśnienia akustycznego, który będzie użyteczny w dalszej części przetwarzania. Próbkę z otrzymanego pliku przeliczane są na próbki dB FS zgodnie z zaleceniami normy AES (AES17-2015, 2018). Sygnał jest uśredniany i z całego sygnału otrzymywana jest jedna wartość dB FS, która odpowiada podanej wartości w poziomie ciśnienia akustycznego. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że oprogramowanie nie jest zabezpieczone przed podaniem sygnału niestacjonarnego. O ile sygnał testowy w fazie podtrzymania zazwyczaj jest stacjonarny o tyle należy szczególnie uważać na fragmenty ciszy zarówno przed uruchomieniem sygnału, jak i po jego wyłączeniu. Momenty te mogą w sposób istotny wpłynąć na wartość referencyjną, co będzie skutkowało odnajdywaniem zdarzeń, które nie powinny być wzięte pod uwagę.

W tym miejscu sygnał referencyjny został już odczytany i przetworzony. Uzyskana wartość odniesienia zostanie użyta do przetłumaczenia innych plików z katalogu, z poziomu cyfrowego dB FS na poziom rzeczywistego ciśnienia akustycznego. Implikuje to konieczność stosowania jednakowego toru rejestracji podczas całości pomiarów. Dotyczy to zarówno

nagrania sygnału referencyjnego, jak i wszystkich sygnałów, które zostaną poddane analizie. Wszystkie parametry toru elektroakustycznego muszą być niezmiennie, wliczając w to mikrofon, przedwzmacniacz, rejestrator, jak i wszystkie jego nastawy. W razie konieczności nagrania sygnałów przy zmianie któregoś z elementów należy stworzyć osobny katalog, w którym zawarte będą wszystkie sygnały zarejestrowane z nowymi ustawieniami i oddzielny sygnał referencyjny. Dotyczy to w szczególności zmiany wzmocnienia układu.

Po skolekcjonowaniu tych informacji następuje przetwarzanie wszystkich plików znajdujących się w zadanym folderze. Przetwarzanie w swej początkowej fazie odbywa się bliźniaczo do przetwarzania sygnału referencyjnego. Program odczytuje fragment pliku dźwiękowego, poddaje go korekcji częstotliwościowej i uśrednianiu w czasie. Po tym jednak następuje różnica. Sygnał referencyjny posiadał znaną wartość ciśnienia poziomu akustycznego. Inne sygnały z oczywistych względów posiadają nieznaną wartość ciśnienia akustycznego, i dlatego muszą zostać porównane z plikiem referencyjnym. Każda próbka przetworzonego sygnału reprezentowana w dB FS jest porównywana do próbki sygnału referencyjnego i na podstawie tego porównania odczytywany jest poziom dB SPL jaki reprezentuje dana próbka.

Po przeliczeniu wszystkich wartości części pliku na wartości poziomu ciśnienia akustycznego, intuicyjnym rozwiązaniem byłoby rozpoczęcie przetwarzania kolejnego bloku tak, aby cały plik zawierający cyfrową reprezentację przebiegu czasowego dynamicznego ciśnienia akustycznego został przedstawiony, jako wykres przedstawiający zmianę skorygowanego częstotliwościowo uśrednionego w czasie ciśnienia poziomu akustycznego. Zdecydowano jednak, aby po przetworzeniu fragmentu pliku od razu przejść do elementu detekcji. Kolejnym etapem jest, zatem wykrycie przekroczenia ustalonego poziomu dB SPL i zapisanie danych jedynie o ilości tych przekroczeń. Zapisywane są dane zarówno o przekroczeniach z poziomu niższego na wyższy jak i wyższego na niższy.

Jeżeli zdarzenie rozpoczęło się przed rozpoczęciem nagrania, tzn. sygnał w pierwszej próbce przekracza ustalony poziom, czas trwania tego pierwszego zdarzenia jest ignorowany i nie jest ono wliczane do ogólnej liczby zdarzeń. Podobnie, gdy zdarzenie rozpoczęło się podczas trwania nagrania, lecz nie zarejestrowano jego końca, nie zostanie ono uwzględnione podczas analizy. Program zlicza, więc jedynie zdarzenia akustyczne, których pełen przebieg zarejestrowano na nagraniu.

Dopiero teraz, kiedy została zapisana informacja o zdarzeniach wykrytych w pierwszej części pliku, zostaje odczytany kolejny fragment i proces zostaje powtórzony dla kolejnego fragmentu pliku. Proces ten powtarza się aż do zakończenia przetwarzania całego nagrania.



Wszystkie informacje o wydarzeniach dopisywane są w trakcie działania programu do jednej tablicy.

Gdy cały plik zostanie odczytany, następuje segregacja zdarzeń. Do tej pory zostały zapisane informacje na temat tego, w którym momencie pliku został przekroczony ustalony poziom. Korzystając z logicznego wniosku, że przekroczenia z poziomu niższego na wyższy i z wyższego na niższy następują po sobie na przemian, zapisane dane interpretowane są następująco: każdy nieparzysty element (1, 3, itd.) jest początkiem zdarzenia a każdy parzysty (2, 4, itd.) jest jego końcem. Na końcu udaje się na podstawie tych informacji obliczyć informację na temat: ilości zdarzeń w badanym pliku, początku i końcu każdego zdarzenia oraz długości trwania każdego ze zdarzeń.

Na koniec oprogramowanie zapisuje plik w formacie json(Ecma International, 2017) ze zdobytymi informacjami. Dodatkowo, z oryginalnego pliku wave wszystkie odnalezione zdarzenia zostają wycięte i zapisane do osobnych plików dźwiękowych. Jako wynik działania programu otrzymuje się katalog zawierający te pliki.

Warto wyjaśnić tutaj wątpliwość, która została przytoczona przy omawianiu wyszukiwania zdarzeń od razu po przeanalizowania jednego fragmentu pliku. Rzeczywiście rodzi to pewne problemy, jeżeli chodzi o wyszukanie zdarzeń. Ta konwencja jest jednym z czynników, dla których zdecydowano opublikować program z prostym algorytmem wykrywania przekroczeń ustalonego poziomu zamiast bardziej praktycznego, wykrywania spadków 10 dB od lokalnych maksimum poziomu ciśnienia akustycznego. Jednak właśnie ten sposób przetwarzania pozwala zaoszczędzić znaczną ilość pamięci operacyjnej i zasobów komputera. Dzięki temu program operuje na znacznie mniejszych zbiorach danych i działa wydajniej przy mniejszej ilości zasobów. Ta konstrukcja, choć zmusza do nieznacznego skomplikowania algorytmów samej detekcji, pozwala na przyszłą rozbudowę programu i możliwość jego powszechnego użycia.

W tej części w sposób opisowy został przedstawiony sposób działania programu. W następnej części opisano projekt aplikacji z uwzględnieniem korzyści, jakie niesie ze sobą wybrane narzędzie – język programowania Python.

### **3. Projekt aplikacji ze schematem blokowym**

W tym rozdziale zostanie przedstawiony projekt aplikacji na podstawie schematu blokowego oraz opis zastosowanego narzędzia.

Rozpocząć należy od języka, którym posłużono się do stworzenia aplikacji. Program napisano w Pythonie. Jest to nowoczesny, wysokopoziomowy i coraz bardziej popularny język chętnie wykorzystywany w wielu dziedzinach przez osoby, które potrzebują użyć

języka jak narzędzia, nie zawsze doskonale go znając. Ponieważ aplikacja jest dedykowana do użytku głównie przez akustyków ten element był istotny podczas wyboru języka. Python jest językiem prostym w implementacji i nie wymaga godzin studiowania standardów języka aby móc go zrozumieć i nawet dopisać część kodu. Dzięki temu prostszym niż w innych językach jest wspólna praca nad kodem czy używanie ponownie gotowych fragmentów kodu. Dodatkowo język ten jest wieloplatformowy i niezależnie od preferowanego systemu operacyjnego na ogólnym poziomie będzie zachowywał się tak samo pozwalając na kooperację pomiędzy systemami operacyjnymi. Te cechy były kluczowe, aby myśleć o możliwości stworzenia otwarto źródłowego programu, do którego być może w przyszłości kolejne algorytmy dopiszą niezależni autorzy.

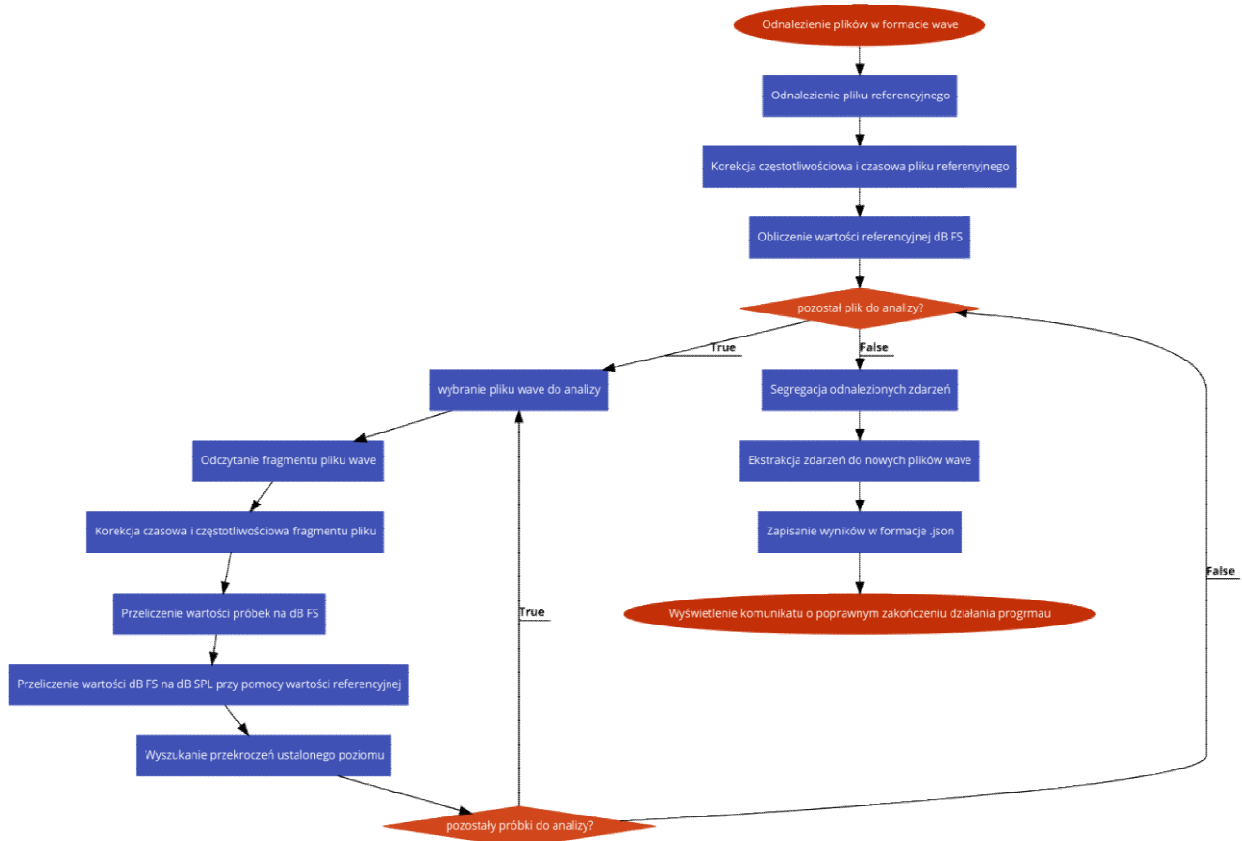
Korzystając z języka Python stworzono narzędzie konsolowe. W obecnym stanie aplikację obsługuje się przy pomocy wiersza poleceń. Wystarczy uruchomić aplikację przy pomocy interpretera Python'a z odpowiednimi komendami. Podczas działania aplikacji nie jest wymagana interakcja z użytkownikiem. Narzędzie kontynuuje pracę aż do momentu przeanalizowania ostatniego pliku i wyświetleniu komunikatu o zakończeniu działania. Uproszczony schemat blokowy działania programu został ukazany na rysunku 1. Nie można przerwać działania programu podczas jego wykonania. Jediną furtką bezpieczeństwa jest zabicie programu w konsoli za pomocą kombinacji klawiszy „ctrl+ C”. Po przerwaniu działania programu w ten sposób pozostaną zapisane te wyniki, które zostały uzyskane do momentu przerwania pracy. Ponieważ program nie posiada żadnego systemu zapamiętywania poprzednich uruchomień, ponowne uruchomienie programu rozpocznie cykl od początku. Przerwanie programu poprzez zabicie go w trakcie pracy nie wpływa w żaden sposób negatywnie na kolejne uruchomienia.

Omawiając implementację programu trzeba pamiętać, że program nie obsługuje wszystkich formatów plików dźwiękowych. W formie na czas pisania artykułu program jest zdolny do odczytania plików w formacie wave o rozdzielczości 16 lub 24 bitów i dowolnej częstotliwości próbkowania. Nie posiada wbudowanego mechanizmu czyszczenia pamięci, wobec czego należy pamiętać, że za każdym uruchomieniem programu zostają tworzone pliki wave o parametrach pliku wejściowego, zawierające zdarzenia dźwiękowe. Pliki te umiejscowione są w katalogu wraz z plikami oryginalnymi. Wielokrotne uruchamianie narzędzia może doprowadzić do zapełnienia pamięci, co wymaga ręcznej jej zwolnienia.

Jak już zostało wspomniane, język Python to nowoczesny, prosty w implementacji i popularny język programowania (Lutz, 2010). Dzięki temu umożliwia współpracę pomiędzy naukowcami i ponowne wykorzystywanie napisanego kodu. Podczas pisania programu

również skorzystano z gotowych bibliotek, aby móc skupić się na zadaniu, które program ma wykonywać, zamiast rozważać szczegóły implementacyjne. Wykorzystano bibliotekę zawierającą filtry spektralne (Gündert, 2014) i filtry czasowe (Rietdijk, 2013).

Przedstawiane oprogramowanie również jest projektem otwarto źródłowym i znajduje się w publicznym repozytorium, aby umożliwić współtworzenie narzędzia wszystkim zainteresowanym.

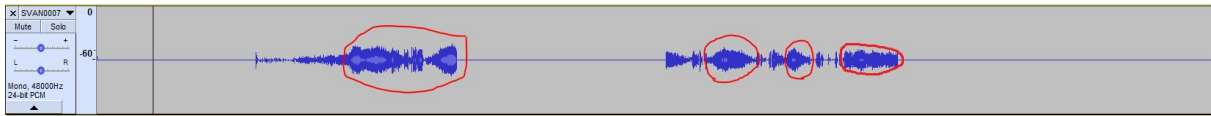


Rys.1. Schemat blokowy działania programu

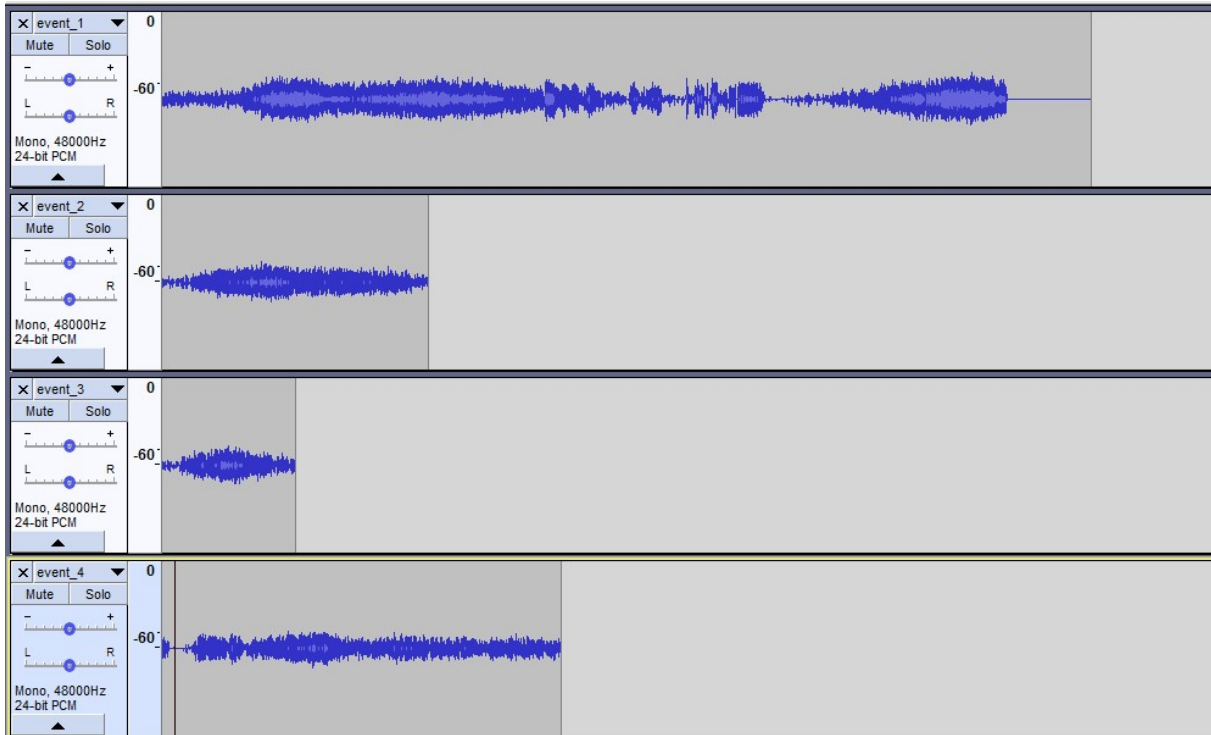
#### 4. Testy zaimplementowanego rozwiązania systemowego

Oprogramowanie zostało przetestowane na dziesięciu plikach wave nagranych przy pomocy miernika dźwięku Svantek 959 kalibrowanego kalibratorem Larson Davis CAL200. Każdy z plików był długości jednej minuty. Dodatkowo używając programu Audacity stworzono plik 8 godzinny i przetestowano działanie programu przy przetwarzaniu długiego pliku. Wszystkie pliki były w formacie wave o rozdzielczości 16 lub 24 bity oraz częstotliwości próbkowania 44,1 kHz lub 48 kHz. Program, pomimo iż powinien działać dla innych częstotliwości próbkowania nie został jeszcze dla nich przetestowany. Nagrania zawierały dźwięki: szumu różowego, szumu białego, uruchomionego odkurzacza, działającego wiatraka, uderzenia młotem w kowadło, odtwarzanej muzyki oraz działającego komputera PC. Wszystkie testy zostały zakończone zgodnie z oczekiwaniami. Rysunki 2 i 3

prezentują przykładowy plik poddany testom i zdarzenia akustyczne, które w nim odnaleziono.



Rys.2. Plik dźwiękowy poddany testowi z zaznaczonymi spodziewanymi zdarzeniami



Rys.3 Wyekstrahowane zdarzenia

## 5. Wnioski

W pracy stworzono oprogramowanie do automatycznej detekcji i wstępnej klasyfikacji zdarzeń akustycznych. Ten otwarty źródłowy projekt może w przyszłości stać się platformą do automatycznej detekcji wielorakich zdarzeń akustycznych z uwzględnieniem różnych ich cech. Narzędzie to będzie dostępne do współpracy pomiędzy naukowcami i możliwe, że dzięki temu stanie się w przyszłości użytecznym cennym wkładem w pracę nad klasyfikacją zdarzeń akustycznych.

Czas potrzebny na zaklasyfikowanie nagrań zawierających różnorakie zdarzenia akustyczne nieraz demotywuje do badań na dużej ilości danych. Jak dotąd ciężko znaleźć ogólnodostępne, darmowe narzędzie umożliwiające automatyczną klasyfikację zdarzeń. Być może w przyszłości ten problem przestanie istnieć dzięki rozwojowi zapoczątkowanej tu platformy i wszelkie badania tego typu staną się znacząco prostsze i szybsze.

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0045/18.

## 6. Literatura

Akustyka - Opis, pomiary i ocena hałasu środowiskowego -- Część 1: Wielkości podstawowe i procedury oceny

AES standard method for digital audio engineering Measurement of digital audio equipment.

Ecma International (2017). ECMA-404 2 nd Edition / December

Gündert, S. (2014). Spectral weighting filter. <http://siggigue.github.io/pyfilterbank/splweighting.html>. Accessed: 2018-09-30.

Lutz M. (2010), Python. Wprowadzenie. Wydanie IV, Wydawnictwo Helion, ISBN 978-83-246-2694-6

Rietdijk, F. (2013). python acoustics. <http://python-acoustics.github.io/python-acoustics/>. Accessed: 2018-09-30.

# Katalityczna reakcja syntezy amoniaku

Artur Jurkowski <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Artur Jurkowski: Artur.jurkowski@zut.edu.pl

## Streszczenie

Opracowanie przez Habera i Boscha wysokociśnieniowej metody syntezy amoniaku pozwoliło na rozwój technologii chemicznej oraz katalizy. Pomimo upływu ponad 100 lat katalityczna reakcja syntezy amoniaku jest dalej ważnym tematem badawczym. Wynika to z dużej roli amoniaku w przemyśle, który głównie stosowany jest do produkcji nawozów sztucznych. Z powodu dużej energochłonności procesu oraz nieustannie rosnącego zapotrzebowania na amoniak, naukowcy poszukują nowych katalizatorów oraz innych metod syntezy amoniaku. Obecnie w przemyśle stosuje się dwie technologie syntezy amoniaku, metodę wysokociśnieniową opracowaną przez Habera oraz technologię KAAP. W technologii Habera i Boscha stosuje się katalizator żelazowy na bazie magnetytu lub wustytu. Natomiast w technologii KAAP katalizator rutenowy na węglu aktywnym. Aktywność, na poziomie stopowego katalizatora magnetytowego, wykazuje katalizator, którego prekursorem jest azotek kobaltowo-molibden będący na etapie badań laboratoryjnych. Dodatkowo poza poszukiwaniem nowych katalizatorów, naukowcy rozwijają technologię SSAS, która potencjalnie może znacząco obniżyć koszty produkcji amoniaku.

**Słowa kluczowe:** kataliza, synteza amoniaku, wustyt, magnetyt.

## Catalytic reaction of ammonia synthesis

### Summary

The development by Haber and Bosch of the high-pressure method of ammonia synthesis allowed for the development of chemical technology and catalysis. Despite the passage of over 100 years, the catalytic reaction of ammonia synthesis is still an important research topic. This is due to the high role of ammonia in industry, which is mainly used for the production of fertilizers. Due to the high energy consumption of the process and the constantly growing demand for ammonia, scientists are looking for new catalysts and other methods of ammonia synthesis. Currently, the industry uses two technologies of ammonia synthesis, high pressure method developed by Haber and KAAP technology. High-pressure technology uses a magnetite-based or wustite-based iron catalyst. Whereas, in the KAAP technology, a ruthenium catalyst on activated carbon. Activity, at the level of the alloy magnetite catalyst, exhibits a catalyst whose precursor is cobalt-molybdenum nitride being at the stage of laboratory tests. In addition to the search for new catalysts, scientists are developing SSAS technology that can potentially significantly reduce the cost of producing ammonia.

**Keywords:** catalysis, ammonia synthesis, wustite, magnetite

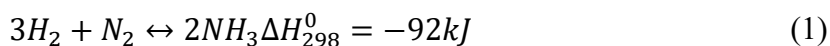
### 1. Wstęp

Opracowanie katalitycznej metody syntezy amoniaku z pierwiastków było ważnym zadaniem na przełomie XIX i XX wieku. Wynikało to z rosnącego zapotrzebowania na nawozy sztuczne oraz zbrojeń przed I wojną światową. Syntezowany amoniak jest stosowany do produkcji nawozów, kwasu azotowego(V), nitrogliceryny, oraz TNT (2,4,6-trinitrotoluen) (Schmidt-Szałowski i in. 2013). Zastosowanie nawozów sztucznych oraz pestycydów pozwala na czterokrotnie zwiększenie ilości plonów. Dzięki temu możliwy był wzrost populacji ludzkiej z 1,6 miliarda w roku 1900 do ponad 7,6 miliardów w roku 2018 (Smil 1999). Obecnie przewiduje się, dalszy wzrost populacji na świecie, którego konsekwencją będzie wzrost zapotrzebowania na nawozy sztuczne oraz amoniak.

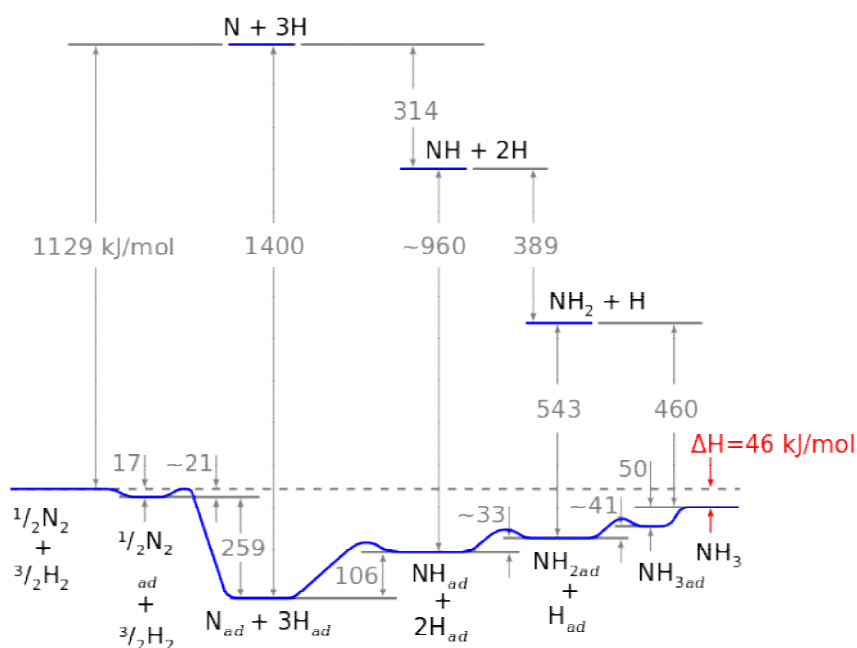
Prace nad pierwszą instalacją do syntezy amoniaku rozpoczęły się 9 września 1913 roku w Niemczech. Wydajność pierwszego reaktora wynosiła 3 tony amoniaku na dobę. Obecnie rozwój technologii pozwolił na opracowanie reaktorów o wydajności dochodzącej do 2500 ton amoniaku na dobę (Schmidt-Szałowski i in. 2013).

Metoda syntezy amoniaku jest bardzo energochłonna. Szacuje się, że około 1-2% światowej produkcji energii zużywa się podczas produkcji amoniaku (Erisman i in. 2008). W tym 3/4 kosztów produkcyjnych jest związana z etapem przygotowania gazu do syntezy amoniaku. Poszukuje się rozwiązań wpływających na obniżenie ilości zużywanej energii w całym procesie syntezy amoniaku. Przemysłowa reakcja syntezy amoniaku według Habera i Boscha prowadzona jest w zakresie temperatur od 350°C do 500°C oraz pod ciśnieniem od 10 do 25 MPa. Szczególna uwaga jest skupiona na opracowanie takiej formuły katalizatora węzła syntezy amoniaku, który pozwoli na obniżenie ciśnienia procesu poprzez uzyskanie odpowiedniej kinetyki reakcji w niższych temperaturach niż obecnie stosowanych w instalacjach przemysłowych.

W katalitycznej metodzie syntezy amoniaku, jako substraty stosuje się azot atmosferyczny oraz wodór, którego źródłem są węglowodory pochodzące głównie z gazu ziemnego. Synteza amoniaku z wodoru i azotu jest reakcją odwracalną, egzotermiczną, którą opisuje równanie reakcji (1).



Na rys. 1 przedstawiono etapy reakcji syntezy amoniaku na katalizatorze wraz ze zmianą energii cząstek.



Rys.1 Wykres zmiany energii cząstek w reakcji syntezy amoniaku na katalizatorze żelazowym (Ertl 1980)

Etap dysocjatywnej adsorpcji azotu jest procesem limitującym kinetykę reakcji syntezy amoniaku, dlatego optymalny katalizator powinien wykazywać możliwie niską energią tego etapu.

O tym jak proces syntezy amoniaku jest nadal interesujący, nie tylko ze względu na rosnące zapotrzebowanie na amoniak, ale również, że jest to nadal interesujące zagadnienie badawcze świadczy liczba artykułów naukowych skupiających się na procesie syntezy amoniaku i katalizatorach tej reakcji wynosząca ponad 0.965 miliona (Liu i in. 2017).

Celem artykułu jest przegląd literaturowy w zakresie stosowanych katalizatorów do syntezy amoniaku oraz proponowanych rozwiązań technologicznych.

## **2. Katalizatory reakcji syntezy amoniaku stosowane w technologii wysokociśnieniowej**

- Katalizator żelazowy otrzymany poprzez redukcję prekursora magnetytowego  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

W ubiegłym stuleciu naukowcy uważali, że najbardziej aktywnym katalizatorem żelazowym w reakcji syntezy amoniaku jest katalizator otrzymany poprzez redukcję magnetytu z dodatkiem niewielkiej ilości promotorów w postaci tlenków metali takich jak np.  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Potwierdzały to badania prowadzone przez Almquista, w których wykazał, że użycie innej formy tlenku żelaza powoduje zmniejszenie aktywności otrzymanego katalizatora (Almquist i in. 1926).

Magnetytowy prekursor katalizatora żelazowego otrzymuje się poprzez stopienie rudy magnetytu wraz z promotorami (Jędrzejewski i in. 2018). Tlenek glinu oraz wapnia zalicza się do promotorów strukturotwórczych. Zwiększają one odporność katalizatorów na przegrzanie poprzez tworzenie trójwymiarowej struktury pomiędzy krystalitami żelaza jaka tworzy się na etapie redukcji (Arabczyk i in. 2004). Natomiast tlenek potasu jest donorem elektronów, zwiększający aktywność katalizatora poprzez stabilizację aktywnych płaszczyzn żelaza oraz zwiększając ilość adsorbowanego azotu na powierzchni (Kowalczyk i in. 1997).

Wraz z rozwojem badań nad katalizatorem zaczęto poszukiwać nowych promotorów oraz dodatków mogących zwiększyć aktywność katalizatora żelazowego. Wielu naukowców zaczęło prowadzić badania nad dodatkiem kobaltu do prekursora magnetytowego. W przedstawionych badaniach dodatek kobaltu w ilości 5% masowych spowodował wzrost aktywności katalizatora żelazowego o 30% w temperaturze  $350^\circ\text{C}$  (Kaleńczuk 1995). W ofercie firm produkujących katalizatory do syntezy amoniaku można znaleźć katalizatory magnetytowe promowane kobaltem takie jak chiński A102 czy brytyjskiej firmy ICI 74-1.

Do najważniejszych zalet katalizatorów magnetytowych jest niska cena prekursora, wysoka odporność mechaniczna, termiczna oraz na zatrucia. Katalizator żelazowy zredukowany z magnetytu może pracować w instalacji przemysłowej od 10 do 20 lat.



- Katalizator rutenowy

W 1972 roku Aika (Aika i in. 1972) opracował katalizator nośnikowy do syntezy amoniaku, w którym składnikiem aktywnym był ruten, natomiast nośnikiem węgiel aktywny. Katalizator był dodatkowo promowany potasem, który pełnił funkcję donora elektronów. Katalizator wykazywał bardzo wysoką aktywność w reakcji syntezy amoniaku nawet w niskich temperaturach.

Katalizator rutenowy jest przykładem katalizatora nośnikowego, w którym związek aktywny jest naniesiony na nośnik o wysokiej powierzchni właściwej, jakim jest węgiel aktywny. Naniesienie fazy aktywnej na nośnik pozwala na rozwinięcie powierzchni aktywnej katalizatora. Katalizatory rutenowe na węglu aktywnym otrzymuje się metodą impregnacji. Odpowiednio spreparowany węgiel aktywny zanurza się w roztworze soli rutenu oraz soli promotorów takich jak azotan(V) potasu, baru, cezu lub sodu. Najczęściej stosowaną solą będącą źródłem rutenu jest chlorek rutenu(III). Stosowanymi promotorami katalizatora rutenowego są baru, cezu, potasu lub sodu zwiększające aktywności otrzymanego katalizatora. Aktywność katalizatora rośnie wraz ze zmniejszeniem elektroujemności promotora (Seetharamulu i in. 2007). Jako rozpuszczalnik w metodzie impregnacyjnej najczęściej wykorzystuje się wodę, ponieważ jest ona nietoksyczna, dobrze rozpuszcza sole oraz jest tania. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie jako rozpuszczalnika acetonu (Liang i in. 2004, Zheng i in. 2009). Zaletą użycia acetonu jest fakt, że posiada on dużo mniejsze napięcie powierzchniowe niż woda. Pozwala to na wprowadzenie roztworu w mniejsze pory nośnika. Wadą użycia acetonu, jako rozpuszczalnika jest wyższa cena niż wody oraz toksyczność. Po etapie impregnacji materiał węglowy poddawany jest suszeniu, a następnie kalcynacji. Proces kalcynacji prowadzony jest w temperaturze 450°C przez 24 godzin. Powoduje to całkowite rozłożenie soli rutenu oraz usunięcie związków chloru.

Firma British Petroleum (BP) opracowała katalizator rutenowy na graficie oznaczany, jako Ru/C. Aktywność tego typu katalizatorów jest nawet dwudziestokrotnie wyższa niż aktywność tradycyjnych katalizatorów żelazowych (Maxwell i in. 2004). Natomiast w roku 1992 firma Kellogg opracowała proces syntezy amoniaku z wykorzystaniem katalizatora Ru/C. Proces oznaczany, jako KAAP (Kellogg Advanced Ammonia Process).

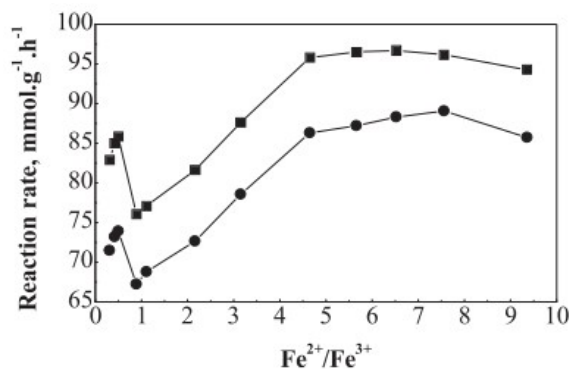
Duża wyższa aktywność katalizatora rutenowego pozwala na zastosowanie niższych ciśnień. Instalacje wykorzystujące technologię KAAP pracują pod ciśnieniem 9 MPa. Natomiast instalacje wykorzystujące katalizator żelazowy pracują pod ciśnieniem 15 MPa. W pierwszych projektach instalacji KAAP stosowano dwa złoża katalizatora rutenowego. W 2002 roku zmieniono budowę instalacji poprzez budowanie reaktora z czterema złożami

katalizatora. Na pierwszej półce reaktora znajduje się katalizator żelazowy, katalizuje on reakcję osiągając stężenie amoniaku w ilościach 2% objętościowych. Na kolejnych trzech półkach znajdują się katalizatory rutenowe zwiększając stopniowo konwersję substratów, aż do osiągnięcia stężenia amoniaku w ilości 20% objętościowych. W tradycyjnych instalacjach wysokociśnieniowych stężenie amoniaku przy wyjściu z reaktora wynosi od 15% do 16%.

W warunkach prowadzenia syntezy ruten katalizuje reakcję nośnika węglowego z wodorem. Skutkuje to procesem metanizacji nośnika. W konsekwencji aktywność takiego katalizatora spada. Drugą ważną wadą katalizatorów rutenowych jest ich wysoka cena. Od roku 1992 do 2010 odnotowano 16 instalacji na świecie, wykorzystujących technologię KAAP.

- Katalizator żelazowy otrzymany z prekursora wustytowego  $Fe_{1-x}O$

Pomimo dokładnego poznania katalizatora żelazowego naukowcy przez lata pomijali kwestię formy prekursora. Zmianę w podejściu do formy tlenkowej prekursora katalizatora żelazowego zaproponował Liu Huazhand wraz z współpracownikami. Zbadali oni katalizatory otrzymane z redukcji tlenków żelaza o wysokim stosunku molowym jonów  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  (Liu i in. 1996). Katalizatory zredukowane z wustytu ( $Fe_{1-x}O$ ) wykazują większą aktywność niż ich magnetytowe odpowiedniki. Wykres aktywności katalizatora żelazowego od  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  został przedstawiony na rysunku 2. Wustyt jest niestechiometryczną formą tlenku żelaza(II), w strukturze, którego poza jonami  $Fe^{2+}$  znajdują się jony  $Fe^{3+}$ .



Rys. 2 Krzywa aktywności katalizatorów od stosunku  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  w prekursorze katalizatora, w temperaturze  $\blacksquare 425^{\circ}C$  oraz  $\bullet 400^{\circ}C$  (Liu i in. 2017)

Prekursor wustytowy otrzymuje się w wyniku stopienia rudy magnetytu wraz z promotorami. Dodatkowo do wytopu prekursora wustytowego stosuje się reduktor w postaci metalicznego żelaza. Zmieniając stosunek reduktora do magnetytu można zmieniać stosunek molowy jonów  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  w prekursorze (Jędrzejewski i in. 2018).

Katalizatory otrzymane w wyniku redukcji wustytu mogą być stosowane w tych samych instalacjach, co katalizatory na bazie prekursora magnetytowego. Wustyt wykazuje niższą

temperaturę redukcji niż magnetyt (Pernicone i in. 2003) w konsekwencji obniża to koszty związane z wprowadzeniem katalizatora do pracy w instalacji. Tak samo jak katalizator żelazowy redukowany z magnetytu posiada bardzo dużą odporność termiczną, mechaniczną oraz na zatrucia. Katalizator żelazowy otrzymany w wyniku redukcji wustytu może pracować w przemysłowej instalacji przez taki sam czas jak katalizator otrzymany w wyniku redukcji magnetytu.

- Katalizator w postaci azotków Co-Mo

Na podstawie doniesień literaturowych Nørskov zaproponował zastosowanie katalizatora, który wiąże azot mocniej niż żelazo, osm czy ruten. Wykazał, że azotki kobaltu i molibdenu przyspieszą najwolniejszy etap syntezy amoniaku. W wyniku tego azotki Co-Mo posiadają wysoką aktywność w reakcji syntezy amoniaku (Jacobsen i in. 2001). Katalizator otrzymano poprzez zmieszanie wodnych roztworów heptamolibdenianu (VI) amonu z azotanem (V) kobaltu (II). Otrzymany osad następnie azotowano przy użyciu amoniaku w temperaturach 300°C-700°C (Kojima i in. 2001). Aktywność otrzymanych azotków w temperaturze 400°C pod ciśnieniem 0.1 MPa wynosiła  $652 \mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ . W artykule naukowcy dodatkowo zbadali wpływ dodatku potasu oraz cezu. Wykazano, że dodatek cezu zwiesza aktywność do  $986 \mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  (Kojima i in. 2001). Pomimo wysokiej aktywności azotków Co-Mo nie zostały one jeszcze zastosowane w przemysłowych instalacjach do syntezy amoniaku. Wynika to z wysokiej ceny związków kobaltu oraz molibdenu oraz niskiej wytrzymałości mechanicznej katalizatora.

### 3. Wysokotemperaturowa metoda SSAS( Solid State Ammonia Synthesis)

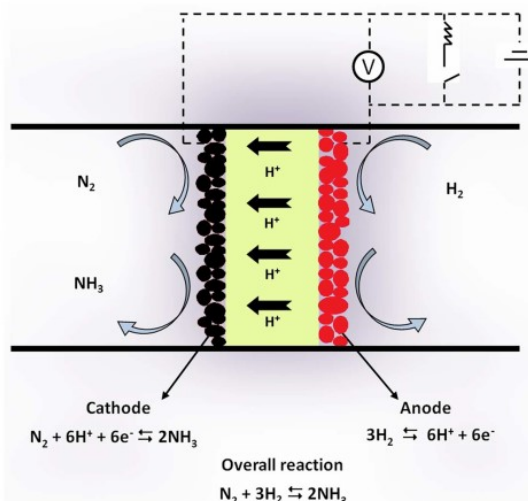
Przykładem innych technologii syntezy amoniaku jest metoda wykorzystująca procesy elektrochemiczne prowadzone w elektrolitach ciekłych (Kordali i in. 2000) lub stałych (Wang i in. 2005, Skodra i in. 2009). Metoda ta polega na dysocjacji gazowych substratów na wskutek przyłożonego napięcia elektrycznego do elektrod. Wodór cząsteczkowy ulega dysocjacji do jonów  $\text{H}^+$  następnie transportowany jest w stronę katody, na której reaguje z azotem do amoniaku. Jony wodorowe transportowane są w elektrolicie ciekłym lub stałym. Metoda elektrochemiczna z zastosowaniem wodnych roztworów soli, jako elektrolitu wymaga stosowania niskich temperatur poniżej 100°C. Konsekwencją tego jest bardzo wolna kinetyka procesu i mała wydajność syntezy. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie technologii SSAS. W technologii tej stosuje się stały przewodnik (Otomo i in. 2015) jako elektrolit pozwalający na transport jonów  $\text{H}^+$ . Syntezę można prowadzić w zakresie temperatur od 350°C do 800°C. W momencie kontaktu wodoru z anodą następuje reakcja:



Następnie protony są transportowane przez elektrolit do katody, na której zachodzi reakcja:



Schemat działania takiego ogniwa przedstawiano na rys.4.



Rys. 4. Schemat reakcji syntezy amoniaku metodą SSAS (Garagounis 2014)

Obecnie wiele grup naukowych bada różne typy elektrolitów oraz rodzaje katod i anod w celu uzyskania największej wydajności reakcji syntezy amoniaku. Jako stały elektrolit przebadano: nafion, SrCe<sub>0.95</sub>Yb<sub>0.05</sub>O<sub>3-α</sub>, Ba<sub>3</sub>CaZr<sub>0.5</sub>Nd<sub>1.5</sub>O<sub>9-δ</sub> oraz inne, które przedstawiono w tabeli 1. Natomiast, jako materiały elektrod stosuje się np.: platynę, żelazo, układy platyna-żelazo, platynę na węglu aktywnym.

Tabela 1 Przykładowe ogniwa i elektrolity stosowane w technologii SSAS (Kyriakou i in. 2017)

T (°C)	Katoda	Elektrolit	Anoda	Reagenty	r <sub>NH3</sub> ( $\frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ )
570	Pd	ScCe <sub>0.95</sub> Yb <sub>0.05</sub> O <sub>3-α</sub>	Pd	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	4.5*10 <sup>-9</sup>
550-680	Ag-Pd	Ba <sub>3</sub> (Ca <sub>1.18</sub> Nb <sub>1.81</sub> )O <sub>9-δ</sub>	Ag-Pd	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	1.42*10 <sup>-9</sup>
500-650	Ru-Ag/MgO	ScCe <sub>0.95</sub> Yb <sub>0.05</sub> O <sub>3-α</sub>	Pd	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	3*10 <sup>-13</sup>
450-600	Fe	SrZr <sub>0.9</sub> Y <sub>0.1</sub> O <sub>3-α</sub>	Ag	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	6.5*10 <sup>-12</sup>
420-660	Ni-BZCYT72	BaZr <sub>0.7</sub> Ce <sub>0.2</sub> Y <sub>0.1</sub> O <sub>3-α</sub>	Cu	H <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	4.1*10 <sup>-9</sup>
460-560	Ag-Pd	La <sub>1.9</sub> Ca <sub>0.1</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Ag-Pd	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	1.76*10 <sup>-9</sup>
400-800	Ag-Pd	Ce <sub>0.8</sub> La <sub>0.2</sub> O <sub>1.9</sub>	Ag-Pd	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	8.2*10 <sup>-9</sup>

Technologia SSAS jest rozwiązaniem stosunkowo nowym, które nie znalazło jeszcze komercyjnego zastosowania. Pomimo tego wielu naukowców uważa, że technologia SSAS może być w przyszłości zastosowana, jako nowa metoda syntezy amoniaku.

#### 4. Podsumowanie

Naukowcy nieustannie pracują nad technologią syntezy amoniaku, aby zmniejszyć energochłonność syntezy. Możliwym sposobem na obniżenie zużycia energii w procesie jest poprawa obecnie stosowanego katalizatora żelazowego. Przykładem jest katalizator żelazowy otrzymany w wyniku redukcji wustytu, który znalazł zastosowanie w przemyśle pozwalając na obniżenie energochłonności procesu. Innym sposobem na zmniejszenie zużycia energii w procesie syntezy amoniaku jest zastosowanie katalizatora Ru/C. Pozwala na obniżenie ciśnienia procesu, niestety nie można go zastosować w obecnie stosowanych instalacjach, co ogranicza jego potencjalne zastosowanie do nowych zakładów chemicznych. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie azotków kobaltu i molibdenu jak katalizatorów. Wysoka aktywność w reakcji syntezy katalizatorów tego typu pozwoliłoby na obniżenie ciśnienia procesu oraz temperatury. Jednak przed zastosowaniem azotków kobaltu i molibdenu w przemysłowych instalacjach należy poprawić wytrzymałość mechaniczną katalizatora. Kolejnym proponowanym rozwiązaniem jest zastosowanie nowej technologii syntezy amoniaku. Technologia SSAS pozwala na prowadzenie procesu w niższych temperaturach, jednocześnie zachowując wysoką szybkość reakcji. Wadą tej technologii jest duże zapotrzebowanie na energię elektryczną z powodu reakcji elektrolizy prowadzonej na elektrodach.

#### 5. Literatura

Aika K., Hori H., Ozaki A., *J Catal*, 1972.27

Almquist J.A., Crittenden E. D., 1926. A Study of Pure Iron and Promoted iron Catalysts for Ammonia Synthesis, *Ind. Eng. Chem.*18, 1307–1309

Arabczyk W., Jasińska I., Lubkowski K., 2004. The surface properties of iron catalyst for ammonia synthesis, *React. Kinet. Catal. Lett.* 83(2), 385-392.

Erismann J.W., Sutton M.A., Galloway J., Klimont Z., Winiwarter W., 2018. How a century of ammonia synthesis changed the world, *Nature Geoscience* 1(10), 636-639

Ertl G., *Catal Rev Sci Eng*, 1980, 21

Garagounis I., Kyriakou V., Skodra A., Vasileiou E., Stoukides M., 2014. Electrochemical synthesis of ammonia in solid electrolyte cells, *Front. Energy Res*

Jacobsen C. J. H, Dahl S., Clausen B. S., Bahn S., Logadottir A., Nørskov J. K., 2001. *J Am Chem Soc*, 123

Jedrzejewski R., Lendzion-Bieluń Z., 2018. Reduction Process of Iron Catalyst Precursors for Ammonia Synthesis Doped with Lithium Oxide. *Catalysts*. 8(11), 494.

Kaleńczuk R., 1995. The effect of cobalt on the reactants adsorption and activity of fused iron catalyst for ammonia synthesis, *Catalysis Letters* 33, 255-268

Kojima R., Aika K., 2001. *Appl Catal A*, 219, 141

Kordali V., Kyriakou G., Lambrou C., 2000. Electrochemical synthesis of ammonia at atmospheric pressure and low temperature in a solid polymer electrolyte cell, 17, 1673-1674

Kowalczyk Z., Sentek J., Jodzis S., Muhler M., Hinrichsen O., 1997. Effect of Potassium on the Kinetics of Ammonia Synthesis and Decomposition over Fused Iron Catalyst at Atmospheric Pressure, *Journal of catalysis*, 169, 407-414.

Kyriakou V., Garagonuis I., Vasileiou E., Vourros A., Stoukides M., 2017. Progress in Electrochemical Synthesis of Ammonia, *Catalysis Today* 286, 2-13

Liang, C., Wei, Z., Xin, Q., and Li, C. 2004. Ammonia-treated activated carbon as support of a Ru-Ba catalyst for ammonia synthesis, *React. Kinet. Catal. Lett.*, 83, 39-45

Liu H., Han W., 2017. Wüstite-based catalyst for ammonia synthesis: Structure, property and performance, *Catalysis Today* 297, 276-291

Liu H. Z., Li X. N., Hu Z. N., 1996. Development of novel low temperature and low pressure ammonia synthesis catalyst. *Appl. Catal. A Gen.* 142, 209–222

Maxwell G., 2004. *Synthetic nitrogen products : a practical guide to the products and processes*, Plenum Publishers

Otomo J., Noda N., Kosaka F., 2015. Electrochemical Synthesis of Ammonia with Proton Conducting Solid Electrolyte Fuel Cells at Intermediate Temperatures, *ECS Trans.* 68, 2663-2670

Pernicone N., Ferrero F., Rossetti I., Forni L., Canton P., Riello P., Fagherazzi G., Signoretto M., Pinna F., 2003. Wustite as a new precursor of industrial ammonia synthesis catalysts. *Appl. Catal. A Gen.*, 251, 121–129

Schimidt-Szałowski K., Szafran M., Bory E., Sentek J., 2013. *Przemysł Nieorganiczny*, PWN, 219-226

Seetharamulu P., Reddy K.H.P., Padmasri A.H., Rao K.S.R., Raju B.D, 2009. Role of promoters on highly active nano-Ru catalyst supported on Mg–Al hydrotalcite precursor for the synthesis of ammonia, *Catalysis Today*, 141, 94–98.

Skodra A., Stoukides M., 2009. Electrocatalytic synthesis of ammonia from steam and nitrogen at atmospheric pressure, *Solid State Ion*, 180, 1332-1336

Smil V., 1999. Detonato of the population explosion, *Nature* 400, 415

Wang J.D., Xie Y.H., Zhang Z.F., Liu R.Q., Li Z.J., 2005. Protonic conduction in  $\text{Ca}^{2+}$ -doped  $\text{La}_2\text{M}_2\text{O}_7$  (M = Ce, Zr) with its application to ammonia synthesis electrochemically, *Matter. Res. Bull.* 40, 1294-1302

Zheng, Y., Li, Z., Yu, H., Wang, R., and Wei, K. 2009. Preparations of C/SiC composites and their use as supports for Ru catalyst in ammonia synthesis, *J. Mol. Catal.: A Chem.*, 301, 79–83

# **Badanie możliwości identyfikacji pomieszczenia w zależności od siły dźwięku**

**Alicja Jasińska<sup>(1)</sup>, Maurycy Kin<sup>(2)</sup>**

<sup>1</sup> Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej

Alicja Jasińska: 226687@student.pwr.edu.pl, Maurycy Kin: maurycy.kin@pwr.edu.pl

## **Streszczenie**

W pracy przedstawiono możliwości identyfikacji pomieszczenia na podstawie wyników badań odsłuchowych nagrań binauralnych wykonanych w badanych wnętrzach. Rezultaty badań subiektywnych skorelowano z wynikami pomiarów siły dźwięku. Na potrzeby określenia precyzji identyfikacji pomieszczeń wprowadzono nową miarę: siłę wrażenia przestrzenności. Okazało się, że istnieje korelacja pomiędzy wartościami siły dźwięku, a siłą wrażenia przestrzenności. Autorzy planują kontynuację badań z wykorzystaniem innych pomieszczeń i innych źródeł dźwięku.

**Słowa kluczowe:** badania subiektywne, siła dźwięku, akustyka wnętrz

## **Research of the room identification possibility in dependence of room gain**

### **Summary**

Paper presents the possibility of room identification on the base of binaural recording. Results of subjective evaluation have been compared to the values of sound strength. Also, a new term: the strength of spatial impression has been introduced. It turned out that the sound strength values might be correlated with subjectively assessment of the spatial impression, room size in particular, of recording which can be helpful for identification process. Authors are going to continue the research with higher number of rooms and different types of sound sources.

**Keywords:** subjective evaluation, sound strength, room acoustics

### **1. Wprowadzenie**

Istnieje kilka wielkości, które można uzyskać na podstawie zmierzonych odpowiedzi impulsowych w audytorium. Badania subiektywne charakterystyki pomieszczenia wykazały, że parametry te są silnie skorelowane z określonymi subiektywnymi wrażeniami akustycznego charakteru pomieszczenia. Jedną z takich wielkości, najczęściej wymienianych w literaturze, jest czas pogłosu, którego subiektywnym wrażeniem słuchacza jest postrzegany pogłos (Hameed i in. 2004). Innym parametrem, będącym przedmiotem zainteresowania autorów, jest siła dźwięku.

Siła dźwięku,  $G$ , jest parametrem akustycznym charakteryzującym pomieszczenie, wykorzystywanym do badania rozkładu dźwięku w salach koncertowych oraz teatralnych lub do porównania poszczególnych sal między sobą siła dźwięku,  $G$ , to parametr wykorzystywany do charakteryzowania dużych kubaturowo pomieszczeń. Większość napotkanej literatury, która porusza temat siły  $G$  zawiera wyniki dla sal koncertowych, hal oraz teatrów, gdzie szczególnie ważny jest równomierny rozkład ciśnienia akustycznego oraz wzmocnienie dźwięku bezpośredniego. Parametr odgrywa dużą rolę ze względu na



zastosowanie wymienionych audytoriów, głównym celem jest to aby każdy słuchacz bez względu na usytuowanie odbierał zdarzenia akustyczne tak samo dobrze i zrozumiale. Typowy zakres, w którym mieści się wartość parametru G wynosi od  $-2$  do  $+10$  dB, przy czym w literaturze przedmiotu rozpatrywane są pomieszczenia o znacznej kubaturze przy powierzchni do ok.  $25\ 000\ m^2$ . W niniejszej pracy wyniki uzyskane z pomiarów siły (G) będą się nieco różnić ze względu na podjęcie się przez autorów zbadania pomieszczeń użytkowych, które osiągają maksymalnie  $40\ m^2$  powierzchni. Źródła literaturowe nie poruszyły do tej pory aspektu korelacji małych pomieszczeń oraz G (Beranek 2004).

Celem pracy jest zbadanie współzależności percepcji wielkości pomieszczenia oraz poziomu naturalnego wzmocnienia dźwięku przez pomieszczenie, który definiowany jest, jako siła dźwięku (G) (Hughes i in. 2016).

## 2. Metoda badań

### 2.1. Pomiary siły dźwięku G

Do zrealizowania badań wybrano trzy pomieszczenia o różnych kubaturach oraz charakteryzujące się odmiennymi właściwościami akustycznymi:

- Studio nagraniowe, część przeznaczona dla muzyków;
- Sala wykładowa;
- Sala przeznaczona do realizacji zajęć dydaktycznych o charakterze praktycznym z wykonaną adaptacją akustyczną: na jednej ze ścian umieszczone są panele akustyczne, które można ustawić w trzech konfiguracjach, mianowicie panele rozpraszające, odbijające lub absorbujące.

Zbadano trzy pomieszczenia, przy czym jedno z nich w dwóch konfiguracjach: dla paneli pochłaniających oraz rozpraszających. Wszystkie badane pomieszczenia znajdują się w budynkach Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem źródła wszechkierunkowego zgodnie z zaleceniami (ISO 2009). Wyniki pomiarów siły dźwięku zamieszczono w Tabeli 1. Jak można zauważyć, otrzymane wartości różnią się od zalecanych o ok. 10 dB, a głównym powodem tych różnic jest mała kubatura badanych pomieszczeń.

Tabela 1. Wartości parametru G w badanych pomieszczeniach

Pomieszczenie	Wartość siły dźwięku G [dB]
Studio nagraniowe (Nr 1)	19,52
Sala wykładowa (Nr 2)	15,57
Sala laboratoryjna z panelami pochłaniającymi (Nr 3)	17,60
Sala laboratoryjna z panelami rozpraszającymi (Nr 4)	18,07

## 2.2. Badania subiektywne

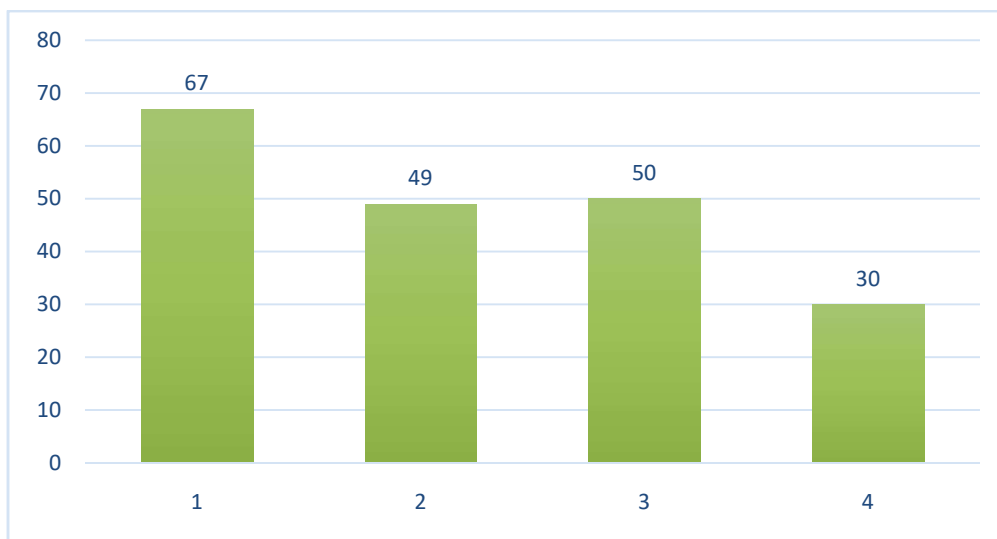
Osoby biorące udział w testach odsłuchowych stanowiły grupę 18 słuchaczy w wieku od 22 do 32 lat. Ponad połowę grupy stanowili mężczyźni. Uczestnicy byli w wysokim stopniu zaznajomieni z podstawami akustyki oraz muzyki. Dużą część grupy stanowiły osoby, na co dzień pracujące w zawodzie powiązanim z akustyką lub mające zainteresowania w obrębie muzyki. Uczestnicy na krótko przed rozpoczęciem badań zostali ankietowani w celu uzyskania informacji o możliwych nieprawidłowościach w działaniu narządu słuchu, które mogły mieć wpływ na wyniki testu. Na podstawie przeprowadzonego wywiadu nie stwierdzono u żadnej z osób biorących udział w eksperymencie dysfunkcji organu słuchu. Przed rozpoczęciem odsłuchów osoby badane zostały zapoznane z materiałem dźwiękowym oraz metodologią związaną z wypełnianiem ankiet na podstawie odczuć subiektywnych.

Sygnalami testowymi były dźwięki, zarejestrowane w badanych pomieszczeniach przy użyciu binauralnej techniki nagrań z wykorzystaniem sztucznej głowy Neumann KU-100 i magnetofonu cyfrowego Sony DTC -790. Motywem wyboru techniki nagrania była maksymalizacja wrażeń słuchowych płynących z odsłuchu materiału dźwiękowego za pomocą słuchawek (Sabiniok, Zwarycz 2018), a priorytetem było jak najlepsze przekazanie obrazów dźwiękowych uczestnikom sesji odsłuchowych, aby mogli odnieść wrażenie, iż znajdują się w określonym pomieszczeniu podczas aktywnego (czyli nagrywanego) źródła dźwięku (Hirvonen i in. 2003). Wykorzystanie sztucznej głowy oraz odsłuchu słuchawkowego pozwoliło zatem na stworzenie realistycznego obrazu dźwiękowego. Należy wspomnieć, iż wykorzystanie innych technik nagrywania prawdopodobnie nie pozwoliłoby na uzyskanie założonego efektu (Rothauser, Urbanek 1966). Materiałem dźwiękowym były fragmenty muzyczne wykonywane na flecie poprzecznym oraz gitarze basowej, a także fragment tekstu czytanego. Uczestnicy mogli usłyszeć próbki testowe tylko raz, ponadto fragmenty były odtwarzane w kolejności losowej, aby uniknąć zjawiska stopniowej zmiany parametru. Eliminacja zjawisk mogących zaburzyć odpowiedni odbiór bodźców oraz obrazów dźwiękowych pozwoliła na maksymalizację immersji słuchowej, czyli zanurzenia się podmiotu w pozornej rzeczywistości stworzonej przez obraz dźwiękowy (Bregman 1990, Cabrera, Pop 2005). Osobom badanym wręczono ankiety, na których należało zaznaczyć właściwą, według ich subiektywnej opinii, odpowiedź. Należało wybrać jedną z czterech możliwości: słuchacze mieli za zadanie odpowiedzieć na pytanie, jakiej wielkości jest pomieszczenie, a do wyboru były możliwe następujące odpowiedzi: sala koncertowa, pokój jednoosobowy, sala wykładowa oraz studio nagrań. Pomieszczenia zostały tak dobrane, aby każde reprezentowało określone właściwości akustyczne.

### 3. Wyniki badań subiektywnych

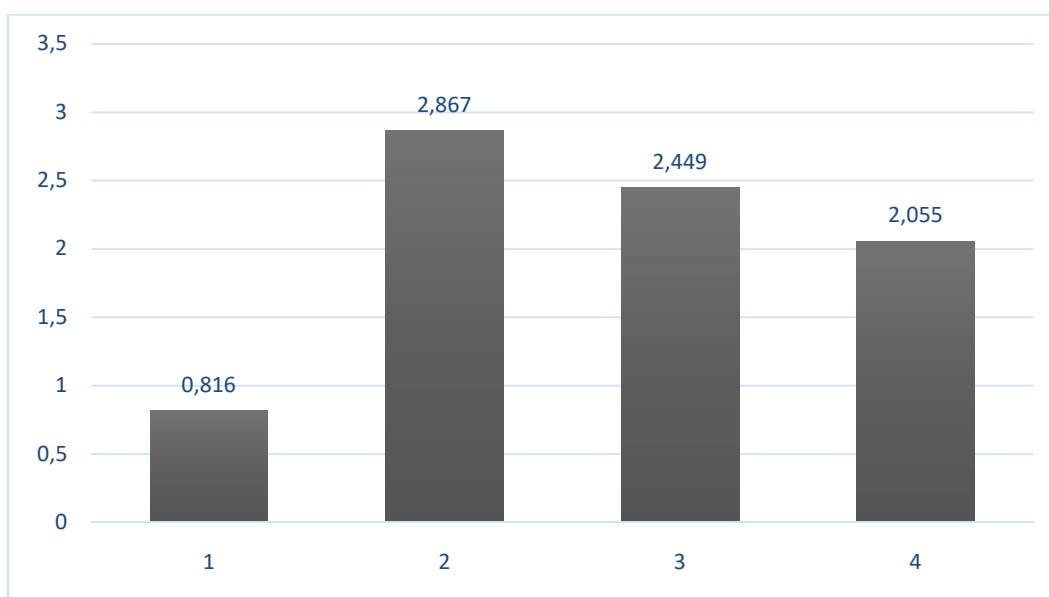
Wykres słupkowy przedstawiający procentową wartość poprawnych odpowiedzi (Rys. 1) oraz wykres prezentujący odchylenie standardowe wyników ze względu na realną wielkość pomieszczeń (Rys. 2) przedstawiają procent poprawnych odpowiedzi oraz rozrzut prawidłowo udzielonych odpowiedzi względem dopasowania pomieszczeń badanych do typowych kubaturowo audytoriów. Najwyższy oraz najlepszy wynik uzyskało studio (Nr 1) z wynikiem 67% prawidłowo udzielonych odpowiedzi. Odchylenie standardowe dla tego pomieszczenia uzyskało najniższą wartość, co świadczy o małym rozrzucie wyników, a jednocześnie o wysokiej precyzji określenia przestrzenności dla pomieszczenia studyjnego. Według autorów największe oddziaływanie na uzyskany wynik miał krótki czas pogłosu, powodujące, że silnie wytlumione pomieszczenie sprawia wrażenie mniejszego, co z kolei powoduje, że człowiek odczuwa kubaturę takiego audytorium nieco mniejszą niż ona jest w rzeczywistości. Na taki wynik mógł również mieć wpływ fakt, że odsłuchy były przeprowadzane w pomieszczeniu o zbliżonych warunkach akustycznych: nawet jeśli słuchacz miał zamknięte oczy podczas odsłuchu nagrania, miał świadomość gdzie się znajduje (Hughes i in. 2016). Drugi najlepszy wynik uzyskała sala laboratoryjna z panelami pochłaniającymi (Nr 3) z wynikiem 50%. Należy zaznaczyć, że oba wspomniane pomieszczenia cechowały się podobnymi warunkami akustycznymi: małym czasem pogłosu oraz zbliżoną atmosferą dźwiękową. Należy zauważyć, że słuchacze często dopasowywali studio nagraniowe do sali laboratoryjnej z panelami absorbującymi, co potwierdza hipotezę, że pomieszczenia są zbliżone właściwościami akustycznymi. Sala wykładowa (Nr 2) uzyskała zbliżony wynik do poprzednich, z kolei wartość odchylenia jest dla tego pomieszczenia największa. Zdaniem autorów, jest to spowodowane dużym czasem pogłosu w badanym audytorium. Na podstawie wyników ankiet można wywnioskować, że pomieszczenie to było mylone z salą koncertową, co prawdopodobnie wpłynęło na wartość odchylenia standardowego oraz wartość procentową poprawnych odpowiedzi. Sala wykładowa była największym badanych audytorium w niniejszym opracowaniu, mimo to w porównaniu z salą koncertową nadal jest to pomieszczenie o małej kubaturze. Sięgając do źródeł literaturowych można stwierdzić na podstawie opisanych w nich badań, że bezpośrednie badanie percepcyjnych aspektów pogłosu jest bardzo ograniczone dla małych pomieszczeń (Kaplanis i in. 2014). Najmniejszy procent prawidłowych odpowiedzi uzyskała sala laboratoryjna z panelami rozpraszającymi. Faktem jest, że należy założyć pojawienie się odmiennych wrażeń słuchowych przy zmianie paneli z absorbujących na rozpraszające. Ponadto, gdy dwie konfiguracje jednego pomieszczenia zostaną ukazane, jako dwa osobne audytoria i, co więcej,

obydwu zostanie nadana kategoria tego samego pomieszczenia (pokój jednoosobowy), wyniki prawdopodobnie będą się różnić ze względu na bardziej rozpraszające właściwości pomieszczenia. Ponadto zdarzało się, że nagrania dla obu konfiguracji paneli były odtwarzane jedno po drugim, co również mogło wpłynąć na uzyskany wynik.



Rys. 1. Wartości procentowe poprawnych odpowiedzi dla badanych pomieszczeń. Oznaczenia 1-4 oznaczają kolejno numery badanych pomieszczeń zgodnie z Tabelą 1.

Wartości odchylenia standardowego wyników, zgrupowane ze względu na rodzaj źródła dźwięku wykazały, że identyfikacja pomieszczenia jest bardziej jednoznaczna dla źródeł zawierających składowe o wyższych częstotliwościach (flet i mowa żeńska), podczas gdy odchylenie standardowe uzyskane dla gitary basowej jest około 2-krotnie większe. Może to oznaczać, że źródła niskoczęstotliwościowe użyte do identyfikacji pomieszczeń powodują spadek precyzji tej identyfikacji.

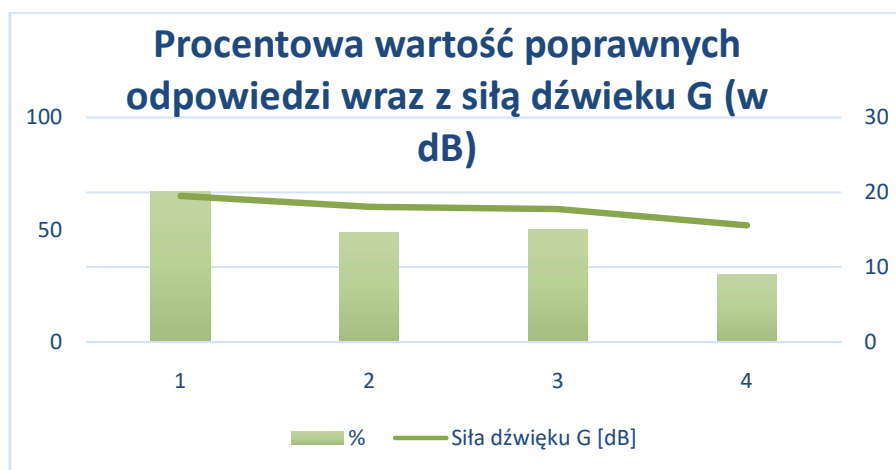


Rys. 2. Odchylenia standardowe poprawnych odpowiedzi dla badanych pomieszczeń. Oznaczenia 1-4 oznaczają kolejno numery badanych pomieszczeń zgodnie z Tabelą 1.

#### 4. Dyskusja wyników

Zestawienie wyników pomiarów siły dźwięku i badań subiektywnych identyfikacji wielkości pomieszczenia zamieszczono na Rys. 3. Wartości obu wielkości wykazują podobną tendencję. Można wywnioskować, że im większe wzmocnienie dźwięku występuje w pomieszczeniu, tym jest lepsza percepcja wielkości tego pomieszczenia, a tym samym poprawia się jego identyfikacja. Zdaniem autorów, istnieje związek pomiędzy siłą dźwięku a stopniem rozpoznania wielkości pomieszczenia. Można ponadto pokusić się do stworzenia miary odzwierciedlającej stopień określenia, czy nawet wartościowania, wielkości audytorium na podstawie przestrzennych atrybutów subiektywnie ocenianego nagrania.

Sięgając do źródeł literaturowych można znaleźć parametr określający siłę wrażenia wysokości dźwięku w zależności od budowy widmowej bodźców (Fastl, Stoll 1979, Yost 1996). Im mniejszy rozrzut wartości określających percepcję wysokości dźwięku (czyli wartość odchylenia standardowego uzyskanych wyników), tym siła wrażenia wysokości jest większa (Zwicker, Fastl 1990). Gdyby przełożyć ten fakt na otrzymane w opisywanym eksperymencie wyniki odczucia wielkości pomieszczenia, można policzyć odwrotność odchylenia standardowego dla wyników percepcji kubatury dla każdego z pomieszczeń. Uzyskany wynik będzie odwrotnością rozrzutu wartości tzn. jednoznaczności percepcji dla każdego audytorium. Obliczona wartość jako odwrotność jakości będzie oznaczała siłę wrażenia (Fastl, Stoll 1979, Moore i in. 1997). Im mniejsza jakość uzyskanego wyniku i jednocześnie większy rozrzut udzielonych odpowiedzi, tym siła wrażenia przestrzenności u słuchacza jest mniejsza. Obrazy dźwiękowe dwóch pomieszczeń o tej samej kubaturze mogą różnić się od siebie w zależności od stopnia trudności percepcji wrażeń związanych właśnie z wielkością pomieszczenia. Ten atrybut percepcyjny możemy nazwać "siłą przestrzenności" lub „siłą wrażenia przestrzenności”.



Rys. 3. Wartości procentowe poprawnej identyfikacji pomieszczenia (oś po lewej) oraz siły dźwięku G (oś po prawej, w [dB]) dla badanych pomieszczeń.

Analizując wykres zamieszczony na Rys. 4, przedstawiający porównanie wartości siły dźwięku, G, oraz siły wrażenia przestrzenności można zauważyć, że oba parametry mają tendencję spadkową. Im pomieszczenie bardziej wzmacnia dźwięk, który się w nim rozchodzi tym słuchacz skuteczniej szacował kubaturę audytorium, czyli można wywnioskować, że silniej odczuwał wrażenie słuchowe. Subiektywnie silne odczucie słuchacza w tym przypadku będzie oznaczało dużą korelację z siłą dźwięku czyli percypowaną głośnością dźwięku, rozchodzącego się w danym pomieszczeniu (Moore i in. 1997). Na podstawie przeprowadzonych badań oraz biorąc pod uwagę, iż nie wykonywano żadnych badań w tym kierunku, autor wnioskuje, że siła wrażenia przestrzenności jest na stałe skorelowana z głośnością dźwięku w audytorium.



Rysunek 4. Siła wrażenia przestrzenności oraz wartość siły dźwięku, G dla badanych pomieszczeń. Numery 1-4 oznaczają kolejno numery badanych pomieszczeń zgodnie z Tab. 1. Na osi pionowej po lewej widoczna jest skala dla siły wrażenia przestrzenności, na osi pionowej po prawej - skala dla siły dźwięku.

## 5. Podsumowanie

Badania wykazały, że występuje związek pomiędzy wrażeniem przestrzenności pomieszczenia, a wzmocnieniem dźwięku, który się w nim propaguje. Analizując wyniki pod kątem wybranych pomieszczeń można stwierdzić, że mocno wytlumione audytoria powodują silne wrażenie poczucia przestrzenności, choć z jednej strony znikoma pogłosowość jest łatwo zauważalna, z drugiej zaś bardziej wygłuszone przestrzenie są postrzegane, jako mniejsze przez uczestników odsłuchów. Jedno z pomieszczeń, które było badane w dwóch konfiguracjach (dla paneli pochłaniających oraz rozpraszających) uzyskało interesujące wyniki. Tym pomieszczeniem była sala dobrze zaadaptowana akustycznie o charakterze bardziej wytlumionym, obu konfiguracjom przypisano miano pokoju jednoosobowego. Fakt, że słuchacze oba pomieszczenia o różnych właściwościach akustycznych mieli zakwalifikować do jednej kategorii mogło wprowadzić dysonans w wynikach ze względu na

odczuwanie odmiennych wrażeń słuchowych. Sala wykładowa w badaniu była mylona z salą koncertową, prawdopodobnie spowodowane to jest dużą pogłosowością sali. Analizując wykorzystane w badaniu źródła dźwięku, okazuje się, że sygnał mowy okazał się najlepszy w testach identyfikacyjnych. Przemawia za tym fakt, że człowiek w codziennym życiu posługuje się mową oraz oczekuje jej dobrego zrozumienia w celu komunikowania się. Ten fakt powoduje, że jej percepcja musi być realizowana na wysokim poziomie, dzięki czemu nie jest to sygnał, który wpłynie znacząco na wrażenie jakie wywołuje obraz dźwiękowy (Kempster i in. 2008). Bas jako sygnał źródłowy nie dał jednoznacznych wyników, co powoduje, iż trudno jest wysnuć jednoznaczne wnioski odnośnie skuteczności źródła. Jako główny wniosek nasuwa się stwierdzenie, że szczególną rolę w badaniach o charakterze identyfikacyjnym odgrywa źródło, które nie powinno mieć wpływu na wrażenie słuchacza.

W życiu codziennym ludzie doświadczają przebywania w pomieszczeniach o najróżniejszych kubaturach oraz właściwościach akustycznych, więc prawdopodobnym jest, że jednocześnie na podstawie tych doświadczeń uczą się wskaźników określających wielkości pomieszczeń. Wskaźnikami mogą być parametry takie jak czas pogłosu, siła pogłosu, postrzegany dystans od źródła oraz siła dźwięku. Ostatni z parametrów został przebadany w niniejszej pracy, a pomiary wykazały duże wartości wzmocnienia dla małych kubaturowo pomieszczeń. Nie istnieją standardy określające typowy zakres wartości dla małych kubatur, co wskazuje na to, że należy przyjąć uzyskane wyniki za prawdziwe; ponadto autorzy planują powtórzyć pomiary oraz zastosować nowe metody w celu weryfikacji wyników. Nowym założeniem jest powtórzenie badań w celu weryfikacji czynników mogących zaburzyć wiarygodność wyników. Koncepcja na kolejne badania to wykonanie pomiarów z innym źródłem wszechkierunkowym, wykorzystanie do badań większej ilości pomieszczeń o różnych kubaturach oraz wykonanie badań odsłuchowych w warunkach ciemności, aby sprawdzić percepcję słuchacza przy ograniczonej ilości bodźców. Autorzy mają perspektywę dalszych badań w tym kierunku.

### **Podziękowania**

Praca została w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0045/18.

### **6. Literatura**

Beranek L., 2004. Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture. New York, Springer, 164-189.

Bregman S. A., 1990. Auditory scene analysis- the perceptual organization of sound, Cambridge, The MIT Press, 199-230.

- Cabrera D., Pop C., 2005. Auditory room size perception for real rooms, Proceedings of ACOUSTICS 2005, Busselton, Western Australia, 115-121.
- Fastl H., Stoll G., 1979. Scaling of pitch strength, *Hear. Res.* 1, no. 4, 293–301.
- Hameed S., Pakarinen J., Valde K., Pulkki V., 2004. Psychoacoustic cues in room size perception, 116<sup>th</sup> AES Convention, Berlin, preprint 6084.
- Hirvonen T., Vaalgamaa M., Backman J., Karjalainen M., 2003. Listening test methodology for headphone evaluation, 114<sup>th</sup> AES Convention, Amsterdam, preprint 5736.
- Hughes R.J., Cox T., Shirley B., Power P., 2016. The room-in-room effect and its influence on perceived room size in spatial audio reproduction, 141<sup>st</sup> AES Convention, Los Angeles, preprint 9621.
- ISO 3382-1:2009 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces.
- Kaplanis N., Bech S., Jensen S.H., van Waterschoot T., 2014. Perception of reverberation in small rooms: a literature study. Proc. 55<sup>th</sup> AES International Conference on Spatial Audio, Helsinki, 1-14.
- Kempster G. B., Gerratt B. R., Verdolini-Abbott K., Barkmeier-Kraemer J., Hillman R. E., 2009. Consensus Auditory-Perceptual Evaluation of Voice: Development of a standardized clinical protocol, *Am. J. Speech Lang. Pathol.* 18, 124–132.
- Moore B. C. J., Glasberg B. R., Baer T., 1997. A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness, *J. Audio Eng. Soc.* 45, no. 4, 224–239.
- Rothauer E., H., Urbanek G., 1966. Some problems in subjective testing. 31<sup>st</sup> AES Convention, New York, preprint 488.
- Sabiniok M., Zwarycz M., 2018. Wpływ nagrań binauralnych na skupienie uwagi oraz zapamiętywanie treści materiału dźwiękowego. *Mat. Konf. OSKA*, Poznań.
- Yost W. A., 1996. Pitch strength of iterated rippled noise, *J. Acoust. Soc. Am.* 100, no.5, 3329-3335.
- Zwicker E., Fastl H., 1990. Pitch and pitch strength, in *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, New York, 103–132.



# Potencjał odpadów przemysłowych wytworzonych w województwie śląskim jako minerałów antropogenicznych

Krzysztof Knaś<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Instytut Maszyn Ciepłych, Politechnika Częstochowska  
Krzysztof Knaś: kknas@imc.pcz.pl

## Streszczenie

W pracy przedstawiono systematykę wytwarzania minerałów antropogenicznych w województwie śląskim w latach 2012 – 2016. Analiza została przeprowadzona na podstawie danych pochodzących z publikacji Głównego Urzędu Statystycznego oraz Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Katowicach. Analizowane grupy produktów wtórnych pochodziły głównie z trzech dominujących w regionie sektorów gospodarki: górnictwa i wydobywania, wytwarzania i zaopatrzenia w energię elektryczną, gaz, parę wodną i gorącą wodę oraz przetwórstwa przemysłowego. By wykorzystanie wytworzonych potencjalnych minerałów antropogenicznych, stało się możliwe należy przeprowadzić ich rozpoznanie. Rozpoznanie to powinno odpowiedzieć na podstawowe pytania: ile danego minerału wytworzono, jakie ma on właściwości oraz jaki jest trend zmian jego masy w czasie. Przedstawione w artykule analizy mogą przybliżyć potencjał zasobów tego typu minerałów, ale także strukturę zmian ilościowych ich wytwarzania. Ułatwiając kształtowanie planów ich potencjalnego zagospodarowania.

**Słowa kluczowe:** odpady przemysłowe, minerały antropogeniczne, wytwarzanie odpadów

## Potential of industrial waste generated in the Silesian Voivodeship as anthropogenic minerals

### Summary

The article presents the systematics of generation of anthropogenic minerals in the Silesian Voivodeship in the years 2012 - 2016. The analysed groups of secondary products came mainly from the three dominating sectors of the economy in the region: mining and quarrying, electricity, gas stem and hot water production and supply and manufacturing. The possibility of using anthropogenic minerals must precede the recognition of their potential. This diagnosis should answer the basic questions: what amount of a given mineral was produced?, what are its properties? and what is the trend of its mass changes over time?. Analyses presented in the article present the potential of resources of this type of minerals, but also the structure of quantitative changes in their production.

**Key words:** industrial waste, anthropogenic minerals, waste generation

### 1. Wstęp

Zasoby bilansowe minerałów naturalnych ulegają systematycznemu zmniejszeniu, prognozy wskazują na dalszy spadek zasobów, podczas, gdy zapotrzebowanie na nie wciąż wzrasta. Przykładem gdzie trend ten jest najwyraźniejszy jest branża kruszyw. Aktualnie zasoby są wystarczające by zaspokoić potrzeby, jednakże w dłuższej perspektywie przewidywany jest spadek ich podaży nie tylko ze względu na wyczerpywanie ich zasobów, ale również na ich dostępność. Sytuacja ta generuje potrzebę wprowadzenia zrównoważonej polityki surowcowej. Szansą na poprawienie tej sytuacji zarówno w kwestiach racjonalności ekonomicznej, jak i ochrony środowiska jest sięgnięcie po surowce antropogeniczne. Procesy technologiczne w produkcji dóbr wymuszają powstawanie oprócz produktu głównego, także produktów ubocznych. Produkty główne stanowią podstawowy cel działalności

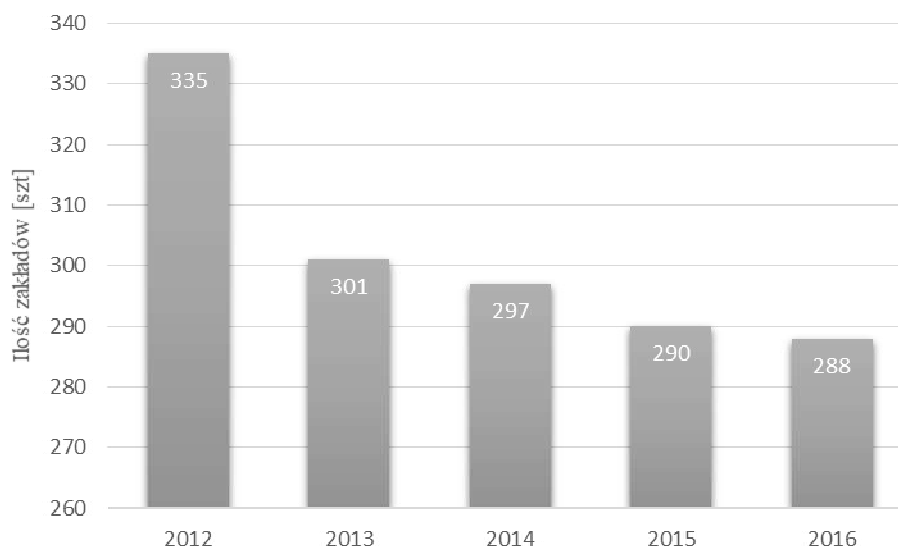
przedsiębiorstwa, natomiast produkty uboczne mające pewną wartość użytkową traktowane są, jako odpad. W analizowanym okresie produkty uboczne (minerały antropogeniczne) powstałe w wyniku produkcji przemysłowej stanowiły od 97,2% do 98,8% całkowitej ilości odpadów powstających na terenie województwa śląskiego (Bochenek D. i in. 2013, 2014, 2015, 2016, 2017). Ze względu na specyfikę regionu, sektorami gospodarki w których wprowadzenie modelu opartego na obiegu zamkniętym ma największe znaczenie, są górnictwo i wydobywanie oraz szeroko pojęta energetyka. Górnictwo i energetyka, ze względu na wysoki stopień rozwoju oraz znaczenie gospodarczo-społeczne mają w regionie największy wpływ na zużycie zasobów naturalnych i nagromadzenie znaczących ilości odpadów poprodukcyjnych. Odpadów, których właściwości w dużej mierze nie różnią się lub różnią się w niewielkim stopniu od surowców mineralnych występujących naturalnie, a przez to stanowiących potencjalne źródło ich antropogenicznych odpowiedników. Do grupy tych materiałów zaliczyć można powstałe przy wydobywaniu kopalin, masy ziemne i skalne, skały płonne, produkty uboczne procesów spalania, a także wytapiania metali. Te i im podobne produkty uboczne „surowe” lub po odpowiednim przekształceniu mogłyby znaleźć dalsze zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki. Przegląd literatury wskazuje, iż można znaleźć dla nich zastosowanie jako surowców dla budownictwa drogowego (Bzowski Z 2011, Kugiel M i in. 2012), kubaturowego (Kugiel M i in. 2012, Baran T 2012) czy też hydrotechnicznego (Bzowski Z 2011, Brzozowski P 2011), rekultywacji technicznej i biologicznej (Miśta A. i in. 2004), podziemnych technik górniczych (Bzowski 2011, Plewa 2013), produkcji ceramiki budowlanej (Bzowski 2011, Lewicka 2016), paliw (Bzowski 2011).

## **2. Potencjał wytworzonych minerałów antropogenicznych**

Ilość zakładów przemysłowych w wyniku działań, których powstają produkty uboczne jest bardzo zróżnicowana w poszczególnych województwach. A ich ilość w danym województwie uwarunkowana jest zarówno występowaniem złóż mineralnych jak i uprzemysłowieniem danego regionu. Pod tym względem województwo śląskie dominuje w skali kraju. Dla porównania w roku 2016 na jego terenie pracowało 288 zakładów przemysłowych, natomiast w kolejnych najbardziej uprzemysłowionych regionach były to odpowiednio: 232 zakłady w województwie wielkopolskim, 168 zakładów w województwie dolnośląskim i 165 zakładów w województwie mazowieckim.

W analizowanym okresie na terenie województwa śląskiego systematycznie zmniejszała się ilość zakładów przemysłowych wytwarzających surowce odpadowe z 335 w 2012 roku do 288 na koniec roku 2016. Gwałtowny spadek odnotowano w roku 2013, w okresie tym

zlikwidowano 34 zakłady przemysłowe. Zmiany ilości zakładów przemysłowych na terenie śląska przedstawiono na rysunku 1.

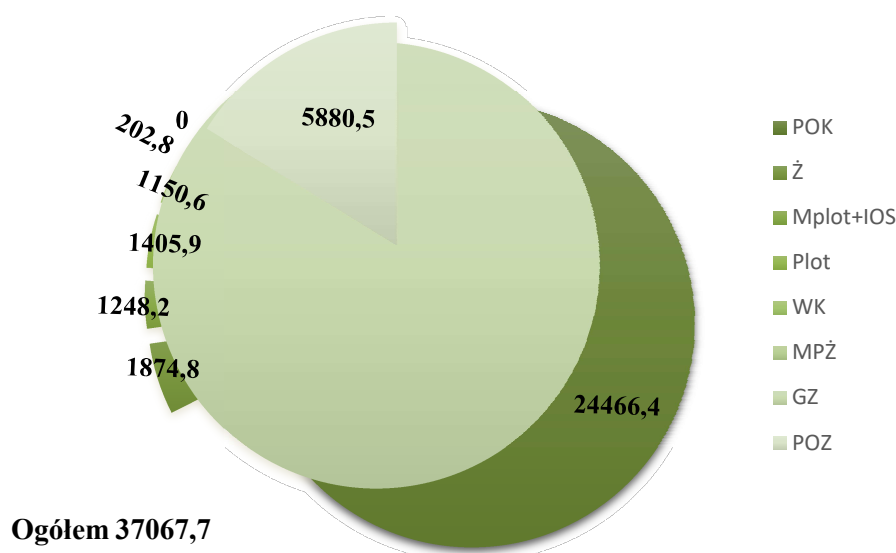


Rys.1. Zmiany ilości zakładów przemysłowych na terenie województwa śląskiego w latach 2012-2016

Na wykresach poniżej przedstawiono podział wytwarzanych minerałów antropogenicznych według rodzajów w województwie śląskim w latach 2012-2016. Wszystkie prezentowane dane zgodne są z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów, które dzieli odpady na grupy, podgrupy i rodzaje ze względu na źródło ich powstawania.

Z pośród wszystkich wytwarzanych grup minerałów antropogenicznych w pracy wyszczególniono następujące ich rodzaje:

- powstałe przy płukaniu i oczyszczaniu kopalni (POK),
- mieszanki popiołowo - żużlowe z mokrego odprowadzania odpadów paleniskowych (MPŻ),
- powstałe przy wydobywaniu kopalni innych niż rudy metali (WK),
- popioły lotne z węgla (Plot),
- gleba i ziemia (GZ),
- mieszaniny popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych(MPlot + IOS),
- żużle z procesów wytopienia (Ż),
- pozostałe (POZ)



Rys.2. Potencjalne minerały antropogeniczne wytworzone w 2012 roku [tys. Mg/rok]

W roku 2012 w województwie śląskim w 335 zakładach wytworzono ogółem 3 7067,7 tys. Mg potencjalnych minerałów antropogenicznych. Podobnie jak w latach poprzednich, przeważającą ilość wytworzonych odpadów przemysłowych stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (73,4%),
- przetwórstwa przemysłowego (13,0%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (10,8%).

Najwięcej wytworzono:

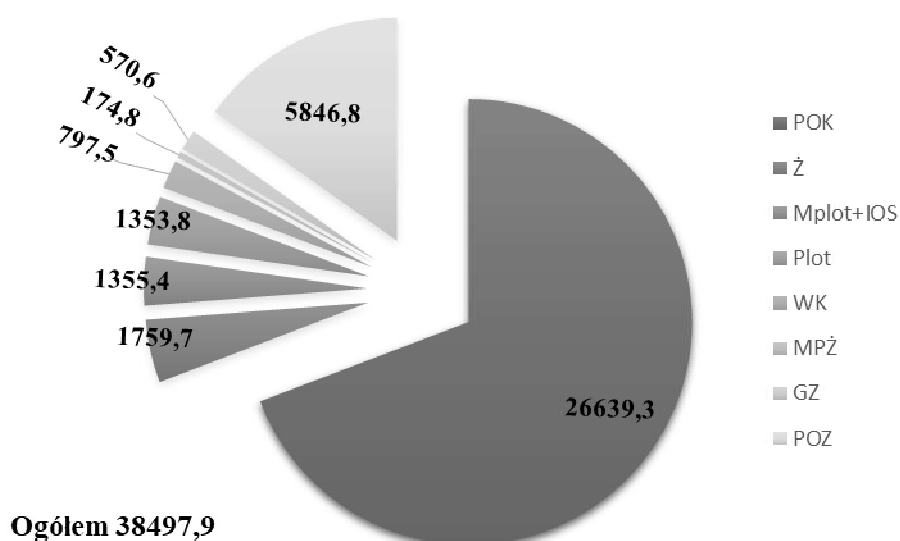
- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 24 466,4 tys. Mg (66,0%),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopieczowe, stalownicze) – 1874,8 tys. Mg (5,1%),
- popiołów lotnych z węgla – 1405,9 tys. Mg (3,8%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1248,2 tys. Mg (3,4%),
- produktów ubocznych z wydobywania kopalni innych niż rudometali – 1150,6 tys. Mg (3,1%).

Wytworzone w województwie śląski, potencjale minerały antropogeniczne stanowią 30,1% wszystkich odpadów przemysłowych wytworzonych w Polsce. Przeważającą ilość wytworzonych minerałów wtórnych, w skali kraju stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (42,7%),
- przetwórstwa przemysłowego (18,0%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (17,9%).

W skali kraju najczęściej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalin – 24 466,4 tys. Mg (78,3%),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopieczowe, stalownicze) – 1874,8 tys. Mg (68,8%),
- produktów ubocznych z wydobywania kopalin innych niż rudy metali – 1 150,6 tys. Mg (51,1%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 248,2 tys. Mg (32,5%),
- popiołów lotnych z węgla – 1405,9 tys. Mg (30,3%).



Rys.3. Potencjalne minerały antropogeniczne wytworzone w 2013 roku [tys. Mg/rok]

W roku 2013 w województwie śląskim w 301 zakładach przemysłowych wytworzono ogółem 38 497,9 tys. Mg potencjalnych minerałów antropogenicznych. W porównaniu z 2012 rokiem ilość wytworzonych odpadów wzrosła o 3,86%. Podobnie jak w roku poprzednim, przeważającą ilość wytworzonych odpadów przemysłowych stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (76,0%),
- przetwórstwa przemysłowego (11,4%),

- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (10,2%).

Najwięcej wytworzono:

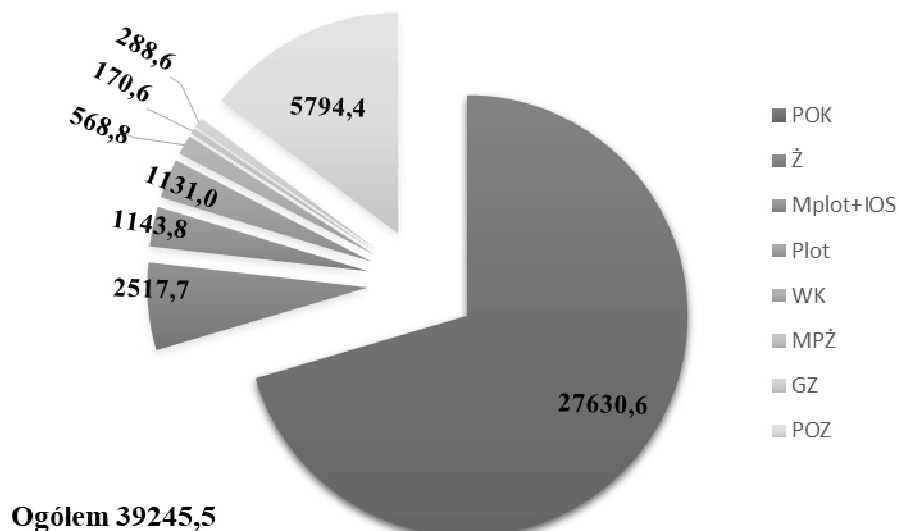
- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 26 639,3 tys. Mg (69,2% odpadów wytworzonych),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze) – 1 759,7 tys. Mg (4,6%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 355,4 tys. Mg (3,5%),
- popiołów lotnych z węgla – 1 353,8 tys. Mg (3,5%).

Wytworzone w województwie śląski, potencjały minerały antropogeniczne stanowią 29,5% wszystkich odpadów przemysłowych wytworzonych w Polsce. Przeważającą ilość wytworzonych minerałów wtórnych w skali kraju stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (43,0%),
- przetwórstwa przemysłowego (15,5%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (17,2%).

W skali kraju najwięcej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 26 639,3 tys. Mg (77,5%),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze) – 1 759,7 tys. Mg (66,8%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 355,4 tys. Mg (36,0%),
- popiołów lotnych z węgla – 1 353,8 tys. Mg (30,2%),
- gleba i ziemia – 570,6 tys. Mg (14,4%),
- produktów ubocznych z wydobywania kopalni innych niż rudy metali – 797,5 tys. Mg (13,7%).



Rys.4. Potencjalne minerały antropogeniczne wytworzone w 2014 roku [tys. Mg/rok]

W roku 2014 w 297 zakładach przemysłowych województwa śląskiego wytworzono ogółem 39 245,5 tys. Mg potencjalnych minerałów antropogenicznych. W porównaniu z 2013 rokiem ilość wytworzonych odpadów wzrosła o 1,94%. Podobnie jak w roku poprzednim, przeważającą ilość wytworzonych odpadów przemysłowych stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (76,8%),
- przetwórstwa przemysłowego (13,9%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (8,3%).

Najwięcej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 27 630,6 tys. Mg (70,4% odpadów wytworzonych),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze) – 2 517,7 tys. Mg (6,4%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 143,8 tys. Mg (2,9%),
- popiołów lotnych z węgla – 1 131,0 tys. Mg (2,9%).

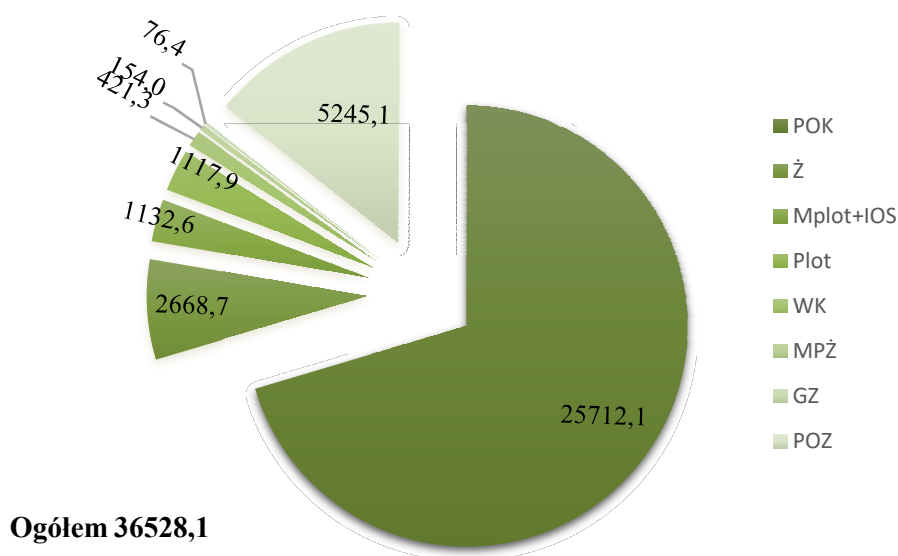
Wytworzone w województwie śląski, potencjalne minerały antropogeniczne stanowią 29,9% wszystkich odpadów przemysłowych wytworzonych w Polsce. Przeważającą ilość wytworzonych minerałów wtórnych, w skali kraju stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (43,1%),

- przetwórstwa przemysłowego (19,1%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (14,8%).

W skali kraju najczęściej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 27 630,6 tys. Mg (76,8%),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopieczowe, stalownicze) – 2 517,7 tys. Mg (7,5%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 143,8 tys. Mg (3,5%),
- popiołów lotnych z węgla – 1 131,0 tys. Mg (3,5%),
- produktów ubocznych z wydobywania kopalni innych niż rudy metali – 568,8 tys. Mg (1,5%).



Rys.5. Potencjalne minerały antropogeniczne wytworzone w 2015 roku [tys. Mg/rok]

W roku 2015 w 290 zakładach województwa śląskiego wytworzono ogółem 36 528,1 tys. Mg potencjalnych minerałów antropogenicznych. W porównaniu z 2014 rokiem ilość wytworzonych odpadów spadła o 6,92%. Podobnie jak w roku poprzednim, przeważającą ilość wytworzonych odpadów przemysłowych stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (76,2%),
- przetwórstwa przemysłowego (13,8%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (8,8%).



Najwięcej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalin – 25 712,1 tys. Mg (70,4% odpadów wytworzonych),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze) – 2 668,7 tys. Mg (7,3%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 132,6 tys. Mg (3,1%),
- popiołów lotnych z węgla – 1 117,9 tys. Mg (3,1%).

Wytworzone w województwie śląski, potencjale minerały antropogeniczne stanowią 27,9% wszystkich odpadów przemysłowych wytworzonych w Polsce. Przeważającą ilość wytworzonych minerałów wtórnych, w skali kraju stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (39,8%),
- przetwórstwa przemysłowego (18,0%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (15,0%).

W skali kraju najwięcej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalin – 25 712,1 tys. Mg (76,5%),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze) – 2 668,77 tys. Mg (75,0%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 1 132,6 tys. Mg (35,1%),
- popiołów lotnych z węgla – 1 117,9 tys. Mg (34,1%),
- produktów ubocznych z wydobywania kopalin innych niż rudy metali – 421,3 tys. Mg (5,5%).

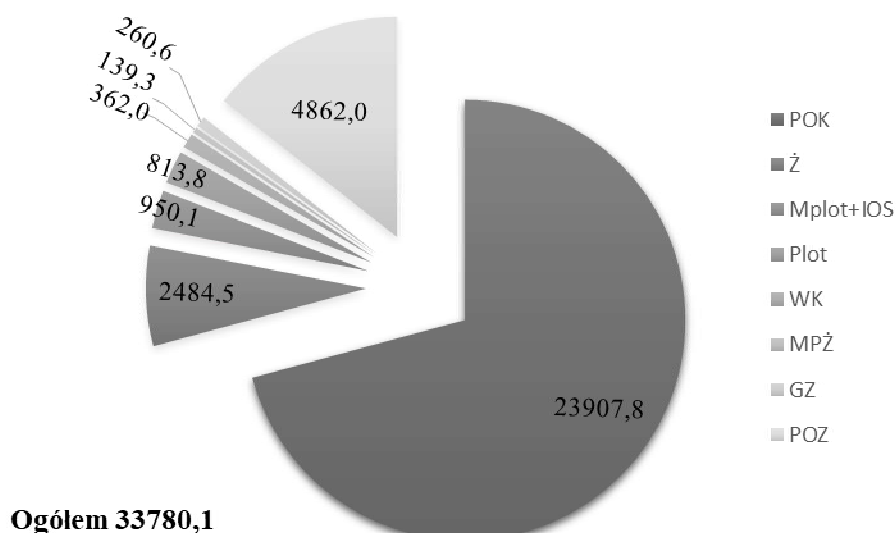
W roku 2016 w 288 zakładach przemysłowych województwa śląskiego wytworzono ogółem 33 780,1tys. Mg potencjalnych minerałów antropogenicznych. W porównaniu z 2015 rokiem w województwie śląskim ilość wytworzonych odpadów spadła o 7,52%. Podobnie jak w roku poprzednim, przeważającą ilość wytworzonych odpadów przemysłowych stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

- górnictwa i wydobywania (76,9%),
- przetwórstwa przemysłowego (14,3%),

- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (7,4%).

Najwięcej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 23 907,8 tys. Mg (70,8% odpadów wytworzonych),
- żużli z procesów wytapiania (wielkopiecowe, stalownicze) – 2 484,5 tys. Mg (7,4%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 950,1 tys. Mg (2,8%),
- popiołów lotnych z węgla – 813,8 tys. Mg (2,4%).



Rys.6. Potencjalne minerały antropogeniczne wytworzone w 2016 roku [tys. Mg/rok]

Wytworzone w województwie śląski, potencjale minerały antropogeniczne stanowią 26,3% wszystkich odpadów przemysłowych wytworzonych w Polsce. Przeważającą ilość wytworzonych minerałów wtórnych, w skali kraju stanowiły odpady z zakładów prowadzących działalność w zakresie:

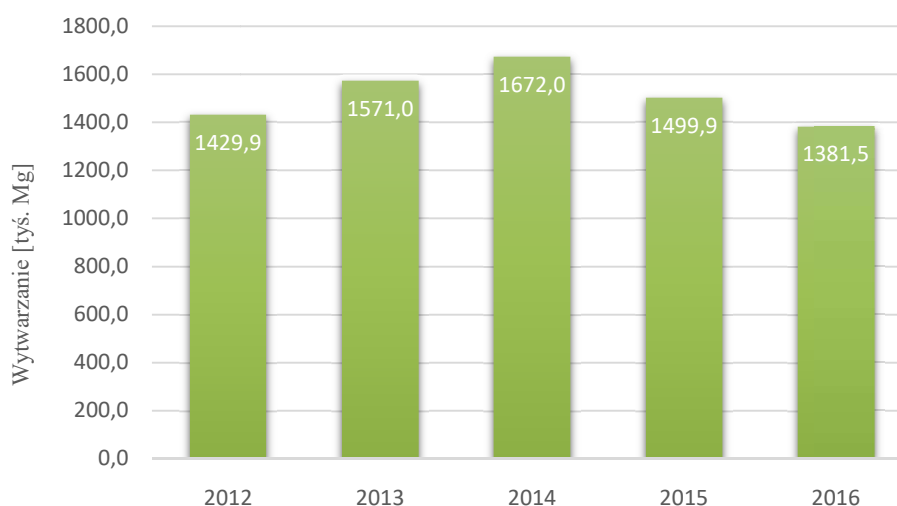
- górnictwa i wydobywania (38,6%),
- przetwórstwa przemysłowego (17,7%),
- wytwarzania i zaopatrywania w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę i powietrze do układów klimatyzacyjnych (11,8 %).

W skali kraju najwięcej wytworzono:

- produktów ubocznych z procesu płukania i oczyszczania kopalni – 23 907,8 tys. Mg (74,7%),

- żużli z procesów wytapiania (wielkopieczowe, stalownicze) – 2 484,5 tys. Mg (76,7%),
- mieszanin popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych – 950,1 tys. Mg (31,6%),
- popiołów lotnych z węgla – 813,8 tys. Mg (25%),
- produktów ubocznych z wydobywania kopalin innych niż rudy metali – 362 tys. Mg (5,8%).

W materiałach Głównego Urzędu Statystycznego dla Polski nie wyodrębniono z pozycji „Pozostałe” wytwarzanego w znaczących ilościach tylko na terenie województwa śląskiego produktu wtórnego z procesu flotacyjnego wzbogacania węgla. Jego wytwarzanie w ostatnich 5 latach wahało się na poziomie od 1 672,0 tys. Mg do 1 381,5 tys. Mg, co stanowiło 3,9% - 4,3% wszystkich wytwarzanych na terenie województwa minerałów antropogenicznych.



Rys.7. Produkt wtórny z procesu flotacyjnego wzbogacania węgla

W tabeli 1 przedstawiono ilości wytwarzanych surowców antropogenicznych według Polskiej Klasyfikacji Działalności, wraz z udziałami ich wytwarzania poprzez firmy z poszczególnych sektorów gospodarki.

Biorąc pod uwagę podział terytorialny, w ciągu analizowanego okresu czasu największą ilość wytworzonych surowców wtórnych odnotowano w następujących miastach na prawach powiatu: Rybnik, Jastrzębie-Zdrój, Katowice, Dąbrowa Górnicza (Tab.2) oraz w powiatach: pszczyńskim, mikołowskim, gliwickim oraz wodzisławskim (Tab.3). Produkty uboczne wytworzone w wymienionych lokalizacjach stanowiły od 65,5% do 70,5% odpadów przemysłowych wytworzonych w całym województwie śląskim. Wszystkie przytoczone lokalizacje znajdują się w najbardziej uprzemysłowionej centralnej części województwa

śląskiego. Zmiany koncentracji ilości odpadów wytworzonych w analizowanym okresie czasu na terenie poszczególnych powiatów przedstawia rys. 8.

Tabela 1. Wytwarzanie surowców antropogenicznych według Polskiej Klasyfikacji Działalności w województwie śląskim

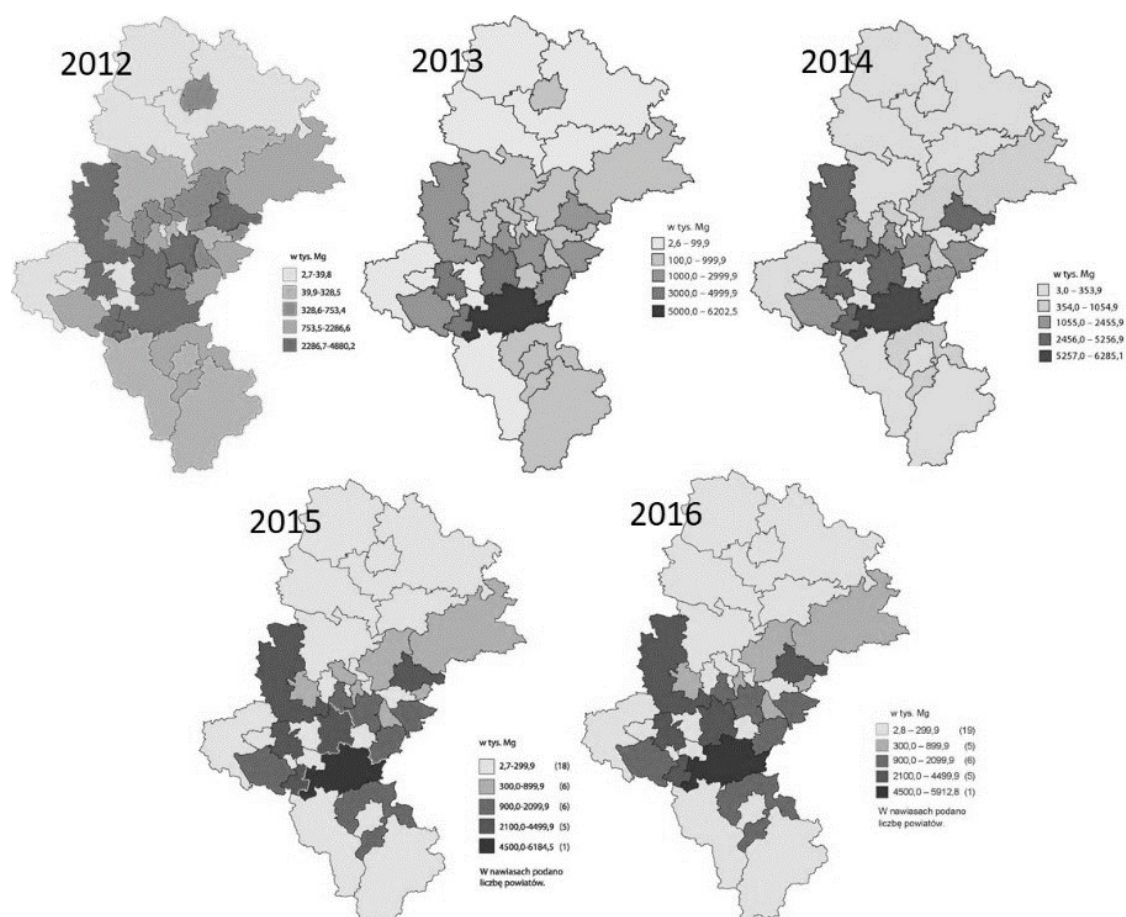
Rok	2012		2013		2014		2015		2016	
Sektor gospodarki	Masa [tyś.Mg]	Udział [%]	Masa [tyś.Mg]	Udział [%]	Masa [tyś.Mg]	Udział [%]	Masa [tyś.Mg]	Udział [%]	Masa [tyś.Mg]	Udział [%]
Górnictwo i wydobywanie	27225,7	73,4	29270,7	76,0	30154,2	76,8	27851,4	76,2	25965,4	76,9
Przetwórstwo przemysłowe	4812,8	13,0	4376,0	11,4	5437,5	13,9	5039,6	13,8	4820,4	14,3
Wytwarzanie i zaopatrzenie w energię elektryczną, gaz, parę wodną i gorącą wodę	4006,8	10,8	3932,9	10,2	3254,9	8,3	3196,7	8,8	2493,1	7,4
Dostawa wody; gospodarowanie ściekami i odpadami; rekultywacja	515,4	1,4	426,8	1,1	355,9	0,9	368,0	1,0	450,1	1,3

Tabela 2. Ilość wytwarzanych minerałów antropogenicznych według powiatów w latach 2012 – 2016

Powiat	Pszczynski		Mikołowski		Gliwicki		Wodzisławski	
Rok	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]
2012	4880,2	13,2	2851,3	7,7	2286,7	6,2	2068,2	5,6
2013	6202,5	16,1	3478,4	9,0	2172,2	5,6	2124,7	5,5
2014	6285,1	16,0	3779,3	9,6	2684,9	6,8	1348,1	3,4
2015	6184,5	16,9	3896,1	10,7	2293,2	6,3	1391,6	3,8
2016	5912,8	17,5	4015,9	11,9	2456,6	7,3	1307,0	3,9

Tabela 3. Ilość wytwarzanych minerałów antropogenicznych według miast w latach 2012 – 2016

Miasto	Rybnik		Jastrzębie - Zdrój		Katowice		Dąbrowa Górnicza	
Rok	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]	Masa [tyś. Mg]	Udział [%]
2012	4105,2	11,1	3066,2	8,3	2570,7	6,9	2444,4	6,6
2013	3951,1	10,3	3524,7	9,2	2324,7	6,0	2309,3	6,0
2014	3851,7	9,8	3906,3	10,0	2221,4	5,7	3587,2	9,1
2015	3139,3	8,6	3678,1	10,1	1592,4	4,4	3450,0	9,4
2016	2392,8	7,1	3066,7	9,1	1228,0	3,6	3069,6	9,1



Rys. 8. Minerały antropogeniczne wytworzone według powiatów w latach 2012 - 2016 (Bochenek D. i in. 2013, 2014, 2015, 2016, 2017)

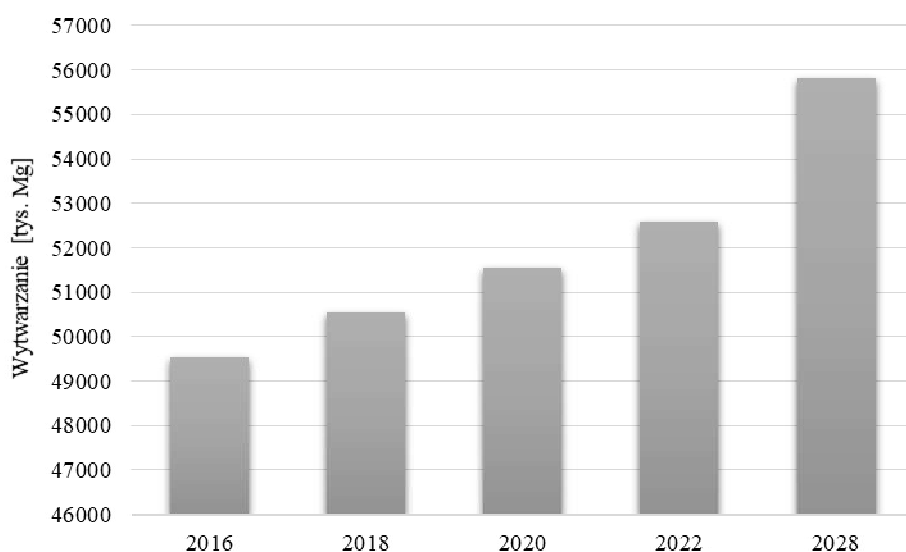
### 3. Prognoza zmian w zakresie odpadów z sektora gospodarczego

Masa wytwarzanych minerałów antropogenicznych z sektora gospodarczego będzie zależała przede wszystkim od przyszłości przemysłu wydobywczego oraz hutnictwa i energetyki. Do czynników, które w przyszłości będą mieć wpływ na ilość wytwarzanych produktów ubocznych zaliczyć można:

- konieczność dostosowania unijnych przepisów do prawa krajowego,
- wzrostowa tendencja powstawania nowych podmiotów gospodarczych, jako potencjalnych wytwórców odpadów (sektor małych i średnich przedsiębiorstw),
- wzrost nakładów inwestycyjnych na działania związane z wprowadzeniem rozwiązań innowacyjnych, w tym w zakresie ochrony środowiska,
- zmiana struktury produkcji w kierunku przetwórstwa przemysłowego przy jednoczesnym zmniejszeniu materiałochłonności, wodochłonności i energochłonności oraz stosowania najlepszych dostępnych technik i dobrych praktyk gospodarczych.

W prognozach zawartych w „Planie gospodarki odpadami dla województwa śląskiego na lata 2016-2022” autorzy przewidują, że w latach 2016-2028 wzrost masy wytwarzanych odpadów ulegnie stabilizacji. Prognozuje się wzrost masy odpadów innych niż niebezpieczne

o 1% w stosunku do roku poprzedniego oraz o 0,5% dla odpadów niebezpiecznych. Na wykresie poniżej (rys. 9) przedstawiono trend prognozowanego wytwarzania minerałów antropogenicznych w perspektywie roku 2028.



Rys.9. Prognoza wytwarzania minerałów antropogenicznych na lata 2016 – 2028. (Plan gospodarki..., 2017)

#### 4. Wnioski

Województwo śląskie ze względu na występujące zasoby surowców mineralnych (głównie węgiel), charakteryzuje się wysokim uprzemysłowieniem, w roku 2016 na jego terenie pracowało 288 zakładów przemysłowych(1 miejsce w kraju). Głównie związanych z przemysłem górniczym, hutniczym i energetycznym. Te gałęzie gospodarki ze względu na wysoki stopień rozwoju oraz znaczenie gospodarczo-społeczne mają w tym regionie największy wpływ na zużycie zasobów naturalnych i wytwarzanie znaczących ilości odpadów poprodukcyjnych. Odpady tego typu w analizowanym okresie stanowiły od 97,2%, nawet do 98,8% całkowitej ilości odpadów wytworzonych w regionie. Zakłady przemysłowe z terenu województwa śląskiego w analizowanym okresie wytworzyły łącznie 185 mln Mg odpadów stanowiących potencjalne źródło surowców antropogenicznych, co stanowiło w skali kraju stanowiło 28,7%. Analiza danych wykazała, iż wśród wytwórców tego typu surowców dominowało górnictwo odpowiadające w 2016 roku za 76,9% wszystkich odpadów przemysłowych. Wśród wytworzonych odpadów w roku 2016 dominowały: produkty uboczne z procesu płukania i oczyszczania kopaliny (70,8%), żużle z procesów wytopienia (7,4%). Właściwości tych odpadów w dużej mierze nie różnią się lub różnią się w niewielkim stopniu od surowców mineralnych występujących naturalnie, stanowiąc potencjalne źródło ich antropogenicznych odpowiedników. Ich gospodarcze wykorzystanie wydaje się być

szansą na poprawienie tej sytuacji zarówno w kwestiach racjonalności ekonomicznej, jak i ochrony środowiska.

## **5. Literatura**

Baran T., Drózd W., Pichniarczyk P., 2012. Zastosowanie popiołów lotnych wapiennych do produkcji cementu i betonu, Cement Wapno Beton nr 1: 50-56

Bochenek D. i inni, 2013. Ochrona środowiska 2013, Główny Urząd Statystyczny.

Bochenek D. i inni, 2014. Ochrona środowiska 2014, Główny Urząd Statystyczny.

Bochenek D. i inni, 2015. Ochrona środowiska 2015, Główny Urząd Statystyczny.

Bochenek D. i inni, 2016. Ochrona środowiska 2016, Główny Urząd Statystyczny.

Bochenek D. i inni, 2017. Ochrona środowiska 2017, Główny Urząd Statystyczny.

Brzozowski P., 2011. Możliwości wykorzystania popiołów lotnych ze spalania w kotłach fluidalnych do betonów układanych pod wodą, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, tom 2, nr 1: 1-11.

Bzowski Z., 2011. Możliwości wykorzystania odpadów wydobywczych z kopalń węgla kamiennego (GZW) w pracach budowlanych drogowych i hydrotechnicznych, Wiadomości górnicze nr 6: 317-324.

Kugiel M., Piekło R., 2012. Kierunki zagospodarowania odpadów wydobywczych w Hadlex S.A; Górnictwo i geologia tom 7:133-145.

Lewicka E., 2016. Odpady przemysłowe jako substytut surowca skaleniowego w produkcji płytek ceramicznych w świetle badań zagranicznych, Zeszyty naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN nr. 96:165-176.

Miśta A., Botor E., 2009. Wykorzystanie odpadów do rekultywacji wyrobiska złoża w Graczach, WUG : bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie 11: 19-23.

Plan gospodarki odpadami dla województwa śląskiego na lata 2016-2022, 2017.

Plewa F., Popczyk M., Pierzyna P., 2013. Możliwości wykorzystania wybranych odpadów energetycznych z udziałem środka wiążącego do podsadzki zestalanej w podziemiu kopalń; Polityka energetyczna tom 16

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1923).

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2013, poz. 21).

# **Porównanie mocy maksymalnej prawej i lewej kończyny dolnej na różnych wartościach obciążenia zewnętrznego u zawodników trenujących mieszane sztuki walki**

**Barbara Koteja <sup>(1)</sup>, Roksana Krosta <sup>(1)</sup>, Patryk Matykiewicz <sup>(1)</sup>, Jakub Jarosz <sup>(1)</sup>, Alan Langer <sup>(1)</sup>**

<sup>1</sup> Katedra Teorii i Praktyki Sportu, Akademia Wychowania Fizycznego w Katowicach  
Barbara Koteja: ba1koteja@onet.eu

## **Streszczenie**

Podstawowym celem niniejszej pracy było porównanie mocy maksymalnej prawej i lewej kończyny dolnej na różnych wartościach obciążenia zewnętrznego u zawodników trenujących mieszane sztuki walki.

Wszystkie pomiary wykonywane były w Laboratorium Siły i Mocy Mięśniowej AWF Katowice z wykorzystaniem urządzenia pneumatycznego Keiser Leg Press (USA, Arkansas). Przyrząd umożliwia pomiar siły i mocy mięśniowej niezależnie dla obu kończyn dolnych z jednoczesną rejestracją szybkości uzyskania tych zmiennych. Stosując przyrząd Keiser Leg Press zarejestrowano następujące zmienne: prędkość uzyskania mocy maksymalnej [m/s] oraz obciążenie. Moc będzie wyrażona w wartościach absolutnych i względnych. Badania przeprowadzono w godzinach pomiędzy 10:00, a 12:00, w miesiącach V i VI 2017 roku. Przed rozpoczęciem testów zawodnicy wykonywali standardową rozgrzewkę trwającą 20min - ćwiczenia bieżne i pobudzające. Końcowym elementem rozgrzewki była 5 minutowa praca na urządzeniu pomiarowym Keiser Leg Press, zgodnie z protokołem producenta w celu wstępnego oszacowania wartości ciężaru maksymalnego. Na podstawie tych danych przeprowadzono test 10 pojedynczych powtórzeń w celu uzyskania danych pomiarowych. Test ten jest standaryzowanym protokołem pomiarowym firmy Keiser. W przypadku niedoszacowania wartości ciężaru maksymalnego (1CM) protokół pomiarowy uwzględnia dodatkowe 1-2 powtórzenia weryfikacyjne. W każdym powtórzeniu, zawodnik reaguje z maksymalną siłą na zadane obciążenie zewnętrzne. Badany reaguje na bodziec wzrokowy, ukazujący się na pulpicy urządzenia. Wraz ze wzrostem obciążenia przerwa wypoczynkowa zostaje adekwatnie wydłużona.

Kończyna zakroczna każdego zawodnika jest silniejsza od kończyny wykroczej.

**Słowa kluczowe:** MMA, Keiser Leg Press, porównanie, moc maksymalna.

## **Comparison of the maximum power of the right and left lower limbs at different external load values at players practicing mixed martial arts.**

### **Summary**

The main purpose of this work was to compare the maximum right power and the left lower limb on various external load values of players practicing mixed martial arts. All measurements were taken at the Strength and Muscular Power Laboratory of the University of Physical Education in Katowice using the pneumatic device Keiser Leg Press (USA, Arkansas). The device makes it possible to measure muscle strength and strength independently for both lower limbs while simultaneously recording the speed of obtaining these variables. The following variables were registered using the Keiser Leg Press: maximum power speed [m / s] and load. The power will be expressed in absolute and relative values. The research was carried out between 10:00 and 12:00, in the months of 5th and 6th of 2017. Before the tests, the participants performed a standard warm-up lasting 20 minutes - exercise and stimulating exercises. The final element of the warm-up was a 5-minute work on the Keiser Leg Press measuring device according to the manufacturer's protocol for the initial estimation of the maximum weight value. Based on this data, a test of 10 single repetitions was carried out to obtain measurement data. This test is a standardized Keiser measurement protocol. In case of underestimating the maximum weight value (1CM), the measurement protocol takes into account an additional 1-2 verification repeats. In each repetition, the competitor reacts with maximum force to a given external load. The subject responds to a visual stimulus appearing on the device's desktop. As the load increases, the rest break is adequately extended.

**Keywords:** MMA, Keiser Leg Press, comparison, maximum Power



## 1. Wstęp

Mieszane sztuki walki (ang. Mixed martialarts - MMA) są dyscypliną sportu, w której zawodnicy sztuk i sportów walki walczą przy dużym zakresie dozwolonych technik (dopuszcza się wszystkie techniki, które są dozwolone w innych sportach walki bez broni, takich jak: brazylijskie ju-jitsu, judo, zapasy, boks, karate i wiele innych sportów walki). Walka przebiega przy jak najmniejszych ograniczeniach, ale jednocześnie minimalizuje się ryzyko śmierci i poważnych obrażeń ciała. Czas walki to 3 rundy po 5 minut, każda z jednogminutową przerwą wypoczynkową między rundami (Schick 2010). Najczęściej pojedynki kończą się znacznie wcześniej, poprzez niezdolność jednego z zawodników do kontynuowania potyczki. Obecnie walka toczy się zarówno w pozycji stojącej, jak i w parterze. Dozwolone są rzuty, ciosy pięściami, kopnięcia, dźwignie, duszenia. Zabronione są natomiast techniki stanowiące znaczne niebezpieczeństwo dla zdrowia i życia zawodników. Często organizatorzy wprowadzają dodatkowe ograniczenia, zabraniając np. ciosów łokciami, dźwigni na kręgosłup, dźwigni skrętnych na kolana, wykonywania rzutów skutkujących upadkiem rywala na głowę albo kopnięć w parterze (Lenetsky 2012). Walka może się, więc skończyć przez nokaut (KO) lub TKO, czyli przerwanie walki przez sędziego lub lekarza, którzy stwierdzają niezdolność jednego z zawodników do kontynuowania pojedynku. Sekundant zawodnika, może też, tak jak w boksie rzucić ręcznik i tym samym poddać swojego podopiecznego. Zawodnik może też się poddać sam, kilkakrotnie klepiąc ręką w matę. W wypadku, gdy walka jednak trwa w pełnym wymiarze czasowym decyzję o jej wyniku podejmuje trzech sędziów. W zależności od regulaminu danych zawodów niekiedy dopuszczalnym rozstrzygnięciem może być też remis. Walki toczą się na ringu, lecz często zdarza się, że zawodnicy wypadają poza jego obręb i wtedy sędzia ringowy musi wracać do poprzedniej pozycji. Znacznie popularniejsze są pojedynki w tzw. oktagonie, czyli na ośmiokątnej arenie ograniczonej specjalną siatką. Stąd właśnie wzięło się popularne, chociaż mylne nazywanie oktagonu klatką. Zawodnicy zawsze muszą posiadać ochraniacze na zęby oraz rękawice (zwykle cienkie, umożliwiające chwytanie). Niekiedy dopuszcza się również stosowanie nagołenników lub ochraniaczy na kolana (Woodward 2009).

MMA jest to stosunkowo młodą dyscypliną sportu, mimo wszystko nawiązuje do starożytnych zawodów o zbliżonym charakterze. Pierwszym udokumentowanym sportem walki przypominającym mieszane sporty walki był pankration, w którym stosowano różne techniki z greckich zapasów i pięściarstwa (Magnus 2015).

- **Moc maksymalna**

Moc maksymalną tworzy iloczyn siły oraz szybkości. Zdolność do rozwijania siły maksymalnej jest najważniejszym uwarunkowaniem zdolności do rozwijania mocy.

Cytując Schmidbleicher (2009):

„w miarę zmniejszania się oporu, który należy pokonać, maleje również wpływ siły maksymalnej na zdolność do rozwijania mocy.”

Według jednej z hipotez, zdolność do rozwijania mocy, rozumianej, jako szybkości wykonywania pracy, jest najważniejszą, pojedynczą zdolnością w sporcie. W czynności sportowej istotne są dwa wskaźniki wydatku mocy: moc maksymalna i moc średnia. Moc maksymalna jest dobrym wskaźnikiem w sportach wymagających pojedynczego wysiłku, jak skoki, sprinty, zmiana kierunku ruchu czy uderzenie. (Tudor O. Bompa, G. Gregory Haff, 2009).

Jak twierdzi Enoka (2002) kształtowanie mocy mięśniowej jest zagadnieniem związanym z treningiem siły mięśniowej. Zdolność do generowania siły mięśniowej z jednoczesnym wysokim tempem ruchu, odgrywa znaczną rolę w wielu dyscyplinach sportu. Generowana moc mięśniowa zależy od liczby jednostek motorycznych zaangażowanych w skurcz oraz tempa, z jakim włókna są pobudzane. Wzrost ilości skurczów mięśniowych w jednostce czasu następuje poprzez stosowanie treningu o stosunkowo niskim obciążeniu zewnętrznym 30-35% CM .

Najczęściej moc mięśniowa określana jest, jako:

- Prędkość generowania skurczu mięśniowego
- Iloczyn siły i prędkości ( $P = f \times V$ )
- Wielkość wytwarzanej pracy przez jednostkę motoryczną w określonym czasie.

W różnych książkach z dziedziny kultury fizycznej i sportu, moc mięśniowa charakteryzowana jest, jako relacja pomiędzy siłą, pokonywanym dystansem i czasem zaangażowania w wykonywaną czynność. Ta zależność jest zgodna z fizyczną definicją mocy:

$$Moc = \frac{\text{siła} \times \text{przesunięcie}}{\text{czas}}$$

Analizując powyższe równanie moc mięśniową, można kształtować różnymi metodami. Górna część równania to praca, dolna część równania, to czas wykonania czynności ruchowej. Należy pamiętać, że krzywa siły i prędkości pokazuje, że prędkość ruchu wzrasta, gdy obciążenie zewnętrzne maleje (Knuttgen i Kraemer 1987).

- **Moc maksymalna w MMA**

W sportach walki, które charakteryzują się różną intensywnością, główną rolę odgrywa kondycja, siła eksplozywna oraz moc. Moc jest potrzebna do zadawania silnych ciosów, kopnięć oraz wszelkiego rodzaju rzutów. Z tego wynika, że walka lub sparing charakteryzuje się na przemian wysoką i niską intensywnością. Siła i intensywność ciosów oraz rzutów zasilana jest energią z przemian beztlenowych.

Dlatego, tak ważne dla zawodnika sportów walki są przemiany fosfagenowe, a mianowicie: moc fosfagenowa, która ma wpływ na resyntezę ATP i siłę pojedynczego ciosu, oraz pojemność fosfagenowa czyli wielkość i dostępność źródła fosfagenowego, od której zależy siła i intensywność serii ciosów.

## **2. Materiał i metody badawcze**

- **Materiał badawczy**

Materiałem badawczym byli wyniki testów grupy rekreacyjnie trenujących MMA, gdzie żaden z nich nie uprawia tej dyscypliny zawodowo. Reasumując, w badaniach wzięło udział 5 zawodników jednej kategorii wagowej. Do 12 godzin przed testowaniem badani nie wykonywali żadnego treningu oporowego kończyn dolnych. Byli poinformowani o protokole badań i wynikających z niego ewentualnych zagrożeniach i korzyściach. Następnie wyrazili pisemną zgodę na uczestnictwo w badaniach oraz mogli zrezygnować z uczestnictwa w badaniach na dowolnym etapie ich trwania.

- **Metody**

Wszystkie pomiary do badań zostały wykonane w Laboratorium Siły i Mocy Mięśniowej AWF Katowice przy wykorzystaniu urządzenia pneumatycznego Keiser Leg Press (USA, Arkansas). Przyrząd ten umożliwia pomiar siły i mocy mięśniowej, niezależnie dla obu kończyn dolnych. Jednocześnie rejestruje szybkość uzyskania tych zmiennych. Korzystając z przyrządu Keiser Leg Press, zarejestrowano następujące zmienne: poziom siły mięśniowej, w której została uzyskana moc maksymalna [W] oraz obciążenie.

Moc będzie wyrażona w wartościach absolutnych i względnych. Badania zostały przeprowadzone w godzinach pomiędzy 10.00 a 12.00, w miesiącach V i VI 2017 roku. Przed rozpoczęciem testów zawodnicy wykonywali standardową rozgrzewkę (20min): ćwiczenia bieżne i pobudzające. Końcowym elementem rozgrzewki była 5 minutowa praca na urządzeniu pomiarowym Keiser Leg Press, zgodnie z protokołem producenta w celu wstępnego oszacowania wartości ciężaru maksymalnego. Na podstawie tych danych przeprowadzono test 10 pojedynczych powtórzeń w celu uzyskania danych pomiarowych.

Test ten jest standaryzowanym protokołem pomiarowym firmy Keiser. W przypadku niedoszacowania wartości 1CM protokół pomiarowy uwzględnia dodatkowe 1-2 powtórzenia weryfikacyjne. W każdym powtórzeniu zawodnik reaguje z maksymalną siłą na zadane obciążenie zewnętrzne. Badany reaguje na bodziec wzorkowy, ukazujący się na pulpicie urządzenia. Wraz ze wzrostem obciążenia przerwa wypoczynkowa zostaje adekwatnie wydłużona.

### 3. Wyniki badań

W tabeli 1 zaprezentowano statystyki opisowe dla zmiennych: prawej oraz lewej kończyny dolnej, u zawodników rekreacyjnie trenujących MMA.

Tabela 1. Statystyki opisowe dla zmiennych kończyny dolne.

Zmienna	Średnia	Odch.std	Wsp.zmn.
Kończyna dolna lewa	1025,713	164,176	16,006
Kończyna dolna prawa	1053,763	159,700	15,155

Wyniki testu T-Studenta pomiędzy prawą oraz lewą kończyną dolną oraz narastającym obciążeniem zewnętrznym zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki testu T-Studenta pomiędzy prawą oraz lewą kończyną dolną oraz narastającym obciążeniem zewnętrznym.

Zmienna	Średnia kończyna dolna lewa	Średnia kończyna dolna prawa	t	p
Obciążenie zewnętrzne	1025,713	1053,763	-0,346	0,041

Zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy badanymi zmiennymi wartości mocy kończyn dolnych, a narastającym obciążeniem zewnętrznym.

Wyniki testu T-Studenta pomiędzy wartościami mocy prawej oraz lewej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących MMA zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki testu T-Studenta wartościami mocy prawej oraz lewej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących MMA.

Zmienna	Średnia	Odch.st.	t	p
Wartość mocy kończyny dolnej lewej	1025,713	164,176	17,670	0,0001
Wartość mocy kończyny dolnej prawej	1053,763	159,700	18,662	0,0001

Zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy badanymi zmiennymi: wartości mocy prawej oraz lewej kończyny dolnej.

Przeprowadzona analiza szeregów czasowych dla kończyny dolnej prawej i lewej w odniesieniu do zmieniającego się obciążenia zewnętrznego zaprezentowana została w tabelach 4-5.

Tabela 4. Wyniki analizy szeregów czasowych lewej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących MMA, w odniesieniu do funkcji czasu-zmienności obciążenia zewnętrznego.

Obciążenie zewnętrzne [%]	Średnie wartości mocy [W]	Indeksy dynamiki o podstawie	
		stałej I(S)	zmiennej I(z)
10	731,3	100,0	100,0
20	860,2	117,6	<b>117,6</b>
30	1058,6	144,8	<b>123,1</b>
40	1130,7	154,6	106,8
50	1178,6	<b>161,2</b>	104,2
60	1190,2	<b>162,8</b>	101,0
70	1145,01	156,4	94,5
80	1105,7	151,2	92,9
90	976,3	140,2	89,8
100	950,4	130,0	86,0

Współczynnik zbieżności dla szeregu czasowego wartości mocy lewej kończyny dolnej wykazał, że jedynie 15% zmienności zjawiska nie zostało wyjaśnionych przez model szeregu czasowego. Wynik analizy szeregów czasowych wskazuje, że całkowity przyrost mocy lewej kończyny dolnej ze względu na indeksy o podstawach stałych wyniósł 30% w odniesieniu do obciążenia początkowego. Największy przyrost zauważono przy obciążeniach 179,1 i 211,3 (odpowiednio 61,2% i 62,8%). Natomiast biorąc pod uwagę indeksy o zmiennych podstawach, można było stwierdzić, iż największa o dodatnim trendzie dynamika zmian mocy lewej kończyny dolnej miała miejsce przy zmianie obciążenia z 50,3 kg na 82,5 kg oraz z 82,5 kg na 114,7 kg (odpowiednio 17,6% i 5,4%). W dalszej kolejności od obciążenia 146,9 kg zauważono dynamikę o trendzie ujemnym i ta tendencja sinusoidalnie utrzymała się do końcowego obciążenia testowego 275,7 kg.

Tabela 5. Wyniki analizy szeregów czasowych prawej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących MMA, w odniesieniu do funkcji czasu-zmienności obciążenia zewnętrznego.

Obciążenie zewnętrzne [%]	Średnie wartości mocy [W]	Indeksy dynamiki o podstawie	
		stałej I(S)	zmiennej I(z)
10	754,5	100,0	100,0
20	910,2	120,6	<b>120,6</b>
30	1076,5	142,7	118,3
40	1128	149,5	104,8
50	1190,2	<b>157,7</b>	105,5
60	1185,6	<b>157,1</b>	99,6
70	1166,2	154,6	98,4
80	1057,5	140,2	89,9
90	1003,2	133	85,6
100	948,9	125,8	81,4

Współczynnik zbieżności dla szeregu czasowego wartości mocy prawej kończyny dolnej wykazał, że jedynie 16% zmienności zjawiska nie zostało wyjaśnionych przez model szeregu czasowego. Wynik analizy szeregów czasowych wskazuje, że całkowity przyrost mocy prawej kończyny dolnej ze względu na indeksy o podstawach stałych wyniósł 25,8% w odniesieniu do obciążenia początkowego. Największy przyrost zauważono przy obciążeniach 179,1 i 211, 3 (odpowiednio 57,7% i 57,1%). Natomiast biorąc pod uwagę indeksy o zmiennych podstawach, można było stwierdzić, iż największa o dodatnim trendzie dynamika zmian mocy prawej kończyny dolnej miała miejsce przy zmianie obciążenia z 50,3 kg na 82,5 kg (20,6%). W dalszej kolejności od obciążenia 114,7 kg zauważono dynamikę o trendzie ujemnym i ta tendencja sinusoidalnie utrzymała się do końcowego obciążenia testowego 275,7 kg.

#### **4. Omówienie wyników badań**

Przeprowadzone testy i uzyskane wyniki analiz pozwoliły podtrzymać wyniki badań prezentowanych w artykułach i monografiach. Moc mięśniowa wzrasta proporcjonalnie do obciążenia, gdzie wartości szczytowe oscylują między 50-80% ciężaru maksymalnego (odpowiednio kończyna lewa 60%, kończyna prawa 50%). Wynik testu T-Studenta wskazały istotne różnice statystyczne w poziomie średnich wartości mocy kończyn dolnych (odpowiednio 1025,713 kończyna lewa i 1053,763 kończyna prawa) oraz pomiędzy prawą oraz lewą kończyną dolną i narastającym obciążeniem zewnętrznym.

Ponieważ większość wysiłków w MMA, wymaga zaangażowania wielu zmiennych motorycznych, bardzo często w warunkach zaburzonej homeostazy organizmu istotna staje się możliwość wykonywania działań technicznych w sposób eksplozywny. Dlatego możemy przyjąć, iż moc mięśniową w MMA możemy rozpatrywać w aspekcie siły, tempa narastania siły i mocy przy dużych prędkościach (RFD Rate of Force Development/ RPD Rate of Power Development).

Badania wielu autorów dowiodły, iż zdolność do szybkiego generowania siły jest mało przydatna, jeśli jej poziom jest poniżej niezbędnego progu (Trzaskoma i Trzaskoma 2001; Plyler i Seibert 2017). Zatem odpowiednie przygotowanie motoryczne stanowi podstawę maksymalnego rozwoju siły i mocy nerwowo-mięśniowej (Lachlan i wsp. 2013; Czerwiński i wsp. 2015).

Widoczna różnica w parametrach mocy mięśniowej między kończyną prawą i lewą odnotowana w analizach, może wynikać z wyuczonego wzorca w MMA (pozycja wykroczo - rozkroczo), w której każda z kończyn dolnych pełni odpowiednie funkcje w warunkach rywalizacji sportowej, zarówno w aspekcie ofensywnym jak i defensywnym

(Kalina 2000; Cormie i wsp. 2010, 2011; Verkhoshansky i Siff 2009). Obie kończyny pracują w otwartym łańcuchu kinematycznym, w którym z jednej układ nerwowo-mięśniowy generuje poziom siły mięśniowej niezbędnej do wykonania danego ruchu, a z drugiej strony te same partie mięśniowe mogą pełnić funkcję stabilizującą dla poszczególnych elementów stawowych naszego organizmu (Cochran 2012; Demikran i wsp. 2015). Jest to istotne, gdyż większość działań w MMA odbywa się w strukturach ruchów globalnych (Wilson i wsp. 1997; Kawamori i Haff 2004; Knudson 2009; Cheragh i wsp. 2014).

Podsumowując, widoczne zróżnicowanie parametru mocy mięśniowej między kończyną prawą i lewą u zawodników MMA wskazuje na konieczną zmianę w periodyzacji treningu. Pozwoliłoby to, na efektywniejsze wykorzystanie umiejętności techniczno - taktycznych w trakcie walki sportowej.

## **5. Literatura**

Cheraghi M., Agha Alinejad H., Reza Arshi A., Shirzad E. Kinematics of straight right punch in boxing. *Annals of applied sport science*.2014;2(2): 39-50.

Cochran S. „Siła, szybkość i kondycja w sztukach walki.” Zielonka 2012.

Cormie P., McGuigan M.R., Newton R.U. Developing maximal neuromuscular power: part 2 - training considerations for improving maximal power production. *Sports Med*. 2011;41(2):125-146.

Cormie P., McGuigan M.R., Newton R.U. Influence of strength on magnitude and mechanisms of adaptation to power training. *MedSci Sports Exerc*. 2010;42(8):1566-1581.

Czerwiński J., Sadowski J., Sozański H. „Podstawy teorii i technologii treningu sportowego.” tom II, Warszawa –Biała Podlaska 2015.

Demikran E., Koz M., Kutlu M., Favre M. Comparison of physical and physiological profiles in elite and amateur young wrestlers. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2015;29(7).

Dr Orzech J. „Siła mięśni człowieka” tom II, Tarnów 2002.

Drużbiak W., Rusin K. „Kształtowanie podstawowych cech motorycznych szybkość.” Warszawa 1967.

Kalina R. „Teoria sportów walki.” Warszawa 2000.

Kawamori N., Haff G. The optimal training load for the development of muscular power. *Journal of Strength and Conditioning Research*.2004;18(3):675-684.

Knudson D.V. Correcting the use of the term “power” in the strength and conditioning literature. *J Strength Cond Res*. 2009;23(6):1902-1908.

- Lachlan P.J., Kelly V.G., Beckman E.M. Periodization for Mixed Martial Arts. *Strength and Conditioning Journal*. 2013;35(6): 34–45.
- Lenetsky S., Harris N. The Mixed Martial Arts Athlete: A physiological Profile. *Strength and Conditioning Journal*. 2012;34(1).
- Lorenz D.S., Reiman M.P., Walker J.C. Periodization: Current review and suggested implementation for athletic rehabilitation. *Sports Health*. 2010;2(6):509-518.
- Plyler D., Seibert C. „MMA mieszane sztuki walki. Trening i technika.” Warszawa 2017.
- Stone M.H., Moir G., Glaister M. et al. How much strength is necessary? *Physical Therapy in Sport*. 2002;3(2):88-96.
- Trzaskoma Z., Trzaskoma Ł. „Kompleksowe zwiększanie siły mięśniowej sportowców.” Warszawa 2001.
- Tudor O., Bompa, G., Gregory Haff G. „Periodyzacja teoria i metodyka treningu.” Champaign 2009.
- Verkhoshansky Y.V., Siff M. *Fundamentals of special strength training in sport. Supertraining 6th edition*. 2009.
- Wilson G.J., Murphy A.J., Walshe A.D. Performance benefits from weight and plyometric training: effects of initial strength levels. *Coach Sport Sci J*. 1997;2:3-8.
- Zajac A., Wilk M., Poprzęcki S., Bacik B., Rzepka R., Mikołajec K., Nowak K. „Współczesny trening siły mięśniowej.” Katowice 2010.



# **Porównanie siły eksplozywnej prawej i lewej kończyny dolnej w zależności od wielkości obciążenia zewnętrznego, u osób trenujących judo**

**Roksana Krosta<sup>(1)</sup>, Barbara Koteja<sup>(1)</sup>, Patryk Matykiewicz<sup>(1)</sup>, Jakub Jarosz<sup>(1)</sup>, Alan Langer<sup>(1)</sup>**

<sup>1</sup> Katedra Teorii i Praktyki Sportu, Akademia Wychowania Fizycznego w Katowicach  
Roksana Krosta : roksa\_kr@tlen.pl

## **Streszczenie**

Podstawowym celem niniejszej pracy, było porównanie siły eksplozywnej prawej i lewej kończyny dolnej w zależności od wielkości obciążenia zewnętrznego, u osób trenujących judo. Pośrednio, w pracy, określono również zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi opisującymi materiał badawczy. Uczestnikami badań byli zawodnicy jednej kategorii wagowej (70 kg) trenujący judo.

Wszystkie pomiary do badań zostały wykonane w Laboratorium Siły i Mocy Mięśniowej AWF Katowice przy wykorzystaniu urządzenia pneumatycznego Keiser Leg Press (USA, Arkansas). Przyrząd ten umożliwia pomiar siły i mocy mięśniowej niezależnie dla obu kończyn dolnych przy jednoczesnej rejestracji szybkości uzyskania tych zmiennych. Korzystając z przyrządu Keiser Leg Press zarejestrowano następujące zmienne: poziom siły mięśniowej, w której została uzyskana moc maksymalna [N] oraz obciążenie. Moc będzie wyrażona w wartościach absolutnych i względnych. Badania zostały przeprowadzone w godzinach pomiędzy 10.00 a 12.00, w miesiącach V i VI 2017 roku. Przed rozpoczęciem testów zawodnicy wykonywali standardową rozgrzewkę (20min), na którą składały się: ćwiczenia bieżne i pobudzające. Końcowym elementem rozgrzewki była 5 minutowa praca na urządzeniu pomiarowym Keiser Leg Press zgodnie z protokołem producenta, w celu wstępnego oszacowania wartości ciężaru maksymalnego. Na podstawie tych danych przeprowadzono test 10 pojedynczych powtórzeń w celu uzyskania danych pomiarowych. Test ten jest standaryzowanym protokołem pomiarowym firmy Keiser. W przypadku niedoszacowania wartości ciężaru maksymalnego (1CM) protokół pomiarowy uwzględnia dodatkowe 1-2 powtórzenia weryfikacyjne. W każdym powtórzeniu zawodnik reaguje z maksymalną siłą na zadane obciążenie zewnętrzne. Badany reaguje na bodziec wzorkowy, który ukazuje się na pulpicy urządzenia. Wraz ze wzrostem obciążenia przerwa wypoczynkowa automatycznie zostaje adekwatnie wydłużona.

Wyniki testu T-Studenta wskazały istotne różnice statystyczne w poziomie średnich wartości siły eksplozywnej kończyn dolnych odpowiednio (1974,021N-kończyna lewa i 1901,361N-kończyna prawa). Różnica ta wynikać może z techniki walki, a w szczególności pracy nogi zakroczonej i wykroczonej podczas ataku i obrony (Rusznik i Zieniawa 2006; Cochran 2012; Kalina 200).

Wyższe obciążenie zewnętrzne, wymaga udziału większej siły eksplozywnej, a zbyt duża dysproporcja w potencjale siły eksplozywnej kończyn dolnych może decydować o sukcesie sportowym w judo.

**Słowa kluczowe:** Judo, Keiser Leg Press, siła eksplozywna

## **Comparing explosive force of right and left lower limb depending on the size of the external load, for people practising judo**

### **Summary**

The main purpose of this work was to compare the explosive power of the right and left lower limb, depending on the amount of external load, in people training judo. Indirectly, at work, the relationships between particular variables describing the research material were also determined. Participants of the research were players of one weight category (70 kg) who were training judo.

All measurements for the tests were performed in the Strength and Muscular Power Laboratory at the University of Physical Education in Katowice using the pneumatic device Keiser Leg Press (USA, Arkansas). This device enables the measurement of muscle strength and strength independently for both lower limbs while recording the speed of obtaining these variables. Using the Keiser Leg Press device the following variables were recorded: the level of muscle strength at which maximum power [N] and load were obtained. The power will be expressed in absolute and relative values. The tests were carried out between 10am and 12am, in the months of 5th and 6th 2017. Before the tests, the competitors performed a standard warm-up (20min), which consisted of: training and stimulating exercises. The final element of the warm-up was a 5-minute work on the Keiser Leg Press measuring

device according to the manufacturer's protocol, in order to pre-estimate the maximum weight value. Based on this data, a test of 10 single repetitions was performed to obtain measurement data. This test is a standardized Keizer measurement protocol. In case of underestimating the maximum weight value (1CM), the measurement protocol takes into account an additional 1-2 verification repeats. In each repetition, the competitor reacts with maximum force to a given external load. The subject responds to a pattern stimulus that appears on the device's desktop. As the load increases, the break automatically is adequately extended.

The results of the Student's T-test showed significant statistical differences in the level of mean values of explosive strength of the lower limbs respectively (1974,021N-left limb and 1901,361N-right limb). This difference may result from the technique of fighting, and in particular the work of an orphan leg during defense and attack (Rusznik and Zieniawa 2006; Cochran 2012, Kalina 200).

**Keywords:** Judo, Keiser Leg Press, explosive force

## 1. Wstęp

Sport odgrywa istotną rolę we współczesnej kulturze kształtując zarówno umysł i ciało. Judo (łagodna droga – jap.) w ostatnich kilkudziesięciu latach stało się bardzo popularne i ugruntowało swoją pozycję wśród dyscyplin sportowych. Judo należy do grupy sportów, które są zdominowane przez ruch acykliczny, który jest wykonywany i ograniczony bezpośrednimi konfrontacjami z przeciwnikiem. Główną rolę odgrywają tu kończyny dolne zawodnika. Zdolności funkcjonalne zawodników muszą być wyraźnie wymawiane ze względu na zwiększone zużycie energii podczas pojedynczego meczu i stosunkowo długotrwałą aktywność. Bez dobrze rozwiniętych zdolności funkcjonalnych, nie można osiągnąć dobrego rezultatu.

Wynik sportowy jest zjawiskiem wielopodmiotowym, na który składa się przygotowanie motoryczne, technika sportowa, taktyka walki sportowej oraz przygotowanie psychiczne (Aaberg 2006). Właściwościami motoryki, szczególnie ważnymi dla efektywnego uprawiania judo są m.in. siła eksplozywna (moc anaerobowa) i wytrzymałość siłowa (aerobowo-anaerobowa).

Aby być skutecznym, techniki judo powinny być zastosowane z dokładnością, z siłą, prędkością i mocą (Franchini E, 2009). Dziś, kluczowy wpływ na osiągnięcie dobrego wyniku w judo, ma maksymalne rozwijanie wysiłków z pogranicza przemian tlenowych i beztlenowych, prowadzonych przy obniżonym pH ustroju oraz rozwijanie siły eksplozywnej, rozumianej, jako zdolność rozwijania maksymalnej siły w jak najkrótszym czasie (Trzaskoma i Trzaskoma 2001). Zdolność tą określa się także, jako tempo rozwijania siły (RFD – Rate of force development). Zdolność do szybkiego rozwijania siły w warunkach dynamiki jest porównywalna z mocą.

Moc jest zdolnością do pokonania danego oporu zewnętrznego z możliwie największą prędkością ruchu. Możemy ją wyrazić, jako iloczyn siły i prędkości. Moc mięśniowa bardzo

często charakteryzowana jest, jako relacja pomiędzy siłą, pokonywanym dystansem i czasem zaangażowania w wykonywaną czynność.

Ta zależność zgodna jest z fizyczną definicją mocy (Zajac, Chmura 2016), która wyrażona jest wzorem:

$$\text{Moc} = (\text{siła} \times \text{przesunięcie}) / \text{czas}$$

Moc (eksplozywność) jest niezbędnym elementem do osiągnięcia optymalnych wyników w sztukach walki. Ruchy mięśni całego ciała mogą być wykonywane zarówno w tempie bardzo szybkim jak i powolnym. Wiele ruchów wykonywanych w sportach walki wymaga szybkich, eksplozywnych skurczów, co najmniej jednego mięśnia, a co za tym idzie – konieczność rozwinięcia mocy.

Możliwość generowania siły mięśniowej przy wysokim tempie ruchu, odgrywa istotną rolę w większości dyscyplin sportu. Generowana moc mięśniowa zależy od liczby jednostek motorycznych zaangażowanych w skurcz oraz od tempa, z jakim włókna są pobudzane (Enoka 2002). Najczęściej moc mięśniowa określana jest, jako: prędkość generowania skurczu mięśniowego, iloczyn siły i prędkości lub wielkość wytwarzanej pracy przez jednostkę motoryczną w określonym czasie (Enoka 2002).

Podstawą rozwoju sprawności fizycznej we wszystkich dyscyplinach sportu jest odpowiednie przygotowanie kondycyjne zawodnika oraz adekwatna do dyscypliny sportu wydolność organizmu (Laplaud i wsp. 2006). W obrębie przygotowania kondycyjnego, najistotniejsze wydają się być siła mięśniowa oraz wytrzymałość. Istotne znaczenie siły mięśniowej w osiągnięciu maksymalnych rezultatów w większości dyscyplin i konkurencji jest niepodważalne (Bompa i wsp. 2013). W związku z tym postawiono za cel główny pracy porównanie siły eksplozywnej prawej i lewej kończyny dolnej u zawodników trenujących judo, względem obciążenia zewnętrznego. Realizację tak sformułowanego celu badań sprowadzono do poszukiwania odpowiedzi na poniższe pytania:

1. Jaka jest zależność pomiędzy siłą eksplozywną kończyn dolnych, a obciążeniem zewnętrznym?
2. Czy występują różnice pomiędzy analizowanymi parametrami siły eksplozywnej prawej i lewej kończyny dolnej?

## **2. Metody i narzędzia pomiarowe**

Wszystkie pomiary do badań zostały wykonane w Laboratorium Siły i Mocy Mięśniowej AWF Katowice, przy wykorzystaniu urządzenia pneumatycznego Keiser Leg Press (USA, Arkansas). Przyrząd ten umożliwia pomiar siły i mocy mięśniowej, niezależnie dla obu kończyn dolnych, jednocześnie rejestruje on szybkości uzyskania tych zmiennych.

Korzystając z przyrządu Keiser Leg Press zarejestrowano następujące zmienne: poziom siły mięśniowej, w której została uzyskana moc maksymalna [N] oraz obciążenie. Moc będzie wyrażona w wartościach absolutnych i względnych. Badania zostały przeprowadzone w godzinach pomiędzy 10.00 a 12.00, w miesiącach V i VI 2017 roku. Przed rozpoczęciem testów zawodnicy wykonywali standardową rozgrzewkę (20 min): ćwiczenia bieżne i pobudzające. Końcowym elementem rozgrzewki była 5 minutowa praca na urządzeniu pomiarowym Keiser Leg Press zgodnie z protokołem producenta, w celu wstępnego oszacowania wartości ciężaru maksymalnego. Na podstawie tych danych przeprowadzono test 10 pojedynczych powtórzeń, w celu uzyskania danych pomiarowych. Test ten jest standaryzowanym protokołem pomiarowym firmy Keiser. W przypadku niedoszacowania wartości 1CM, protokół pomiarowy uwzględnia dodatkowe 1-2 powtórzenia weryfikacyjne. W każdym powtórzeniu zawodnik reagował z maksymalną siłą na zadane obciążenie zewnętrzne. Badany reagował na bodziec wzrokowy, ukazujący się na pulpicie urządzenia. Wraz ze wzrostem obciążenia, przerwa wypoczynkowa adekwatnie się wydłużała.

## **2. Narzędzia analizy statystycznej**

W celu rozwiązania problemu badawczego, w niniejszej pracy, zostały zastosowane badania o charakterze analiz empirycznych. Posłużono się metodami ekonometrii w funkcji czasu [Sagan, Sokołowski 1999; Maestas i Preuhs 2000]. Wykorzystano narzędzia statystyki opisowej, porównania współzależności zmiennych oraz zmienności dynamiki zmiennych w funkcji czasu, z wykorzystaniem indeksów o podstawach stałych i zmiennych. Wstępną liczbę zmiennych ustalono na podstawie analizy merytorycznej. W celu zweryfikowania hipotezy  $H_0$  o braku różnic pomiędzy kończyną dolną lewą i prawą, a wartościami obciążenia, zastosowano test T-Studenta. Podobnie porównanie wartości mocy pomiędzy kończyną dolną lewą, a prawą, również zastosowano test T-Studenta. Sprawą najważniejszą w niniejszej pracy, było przeprowadzenie analizy zmienności dynamiki zmian wartości mocy, w zależności od obciążenia zewnętrznego, z wykorzystaniem szeregów czasowych (Maestas i Preuhs 2000, Green 2003, Keele i Kelly 2006; Maszczyk 2014, 2015, 2016). Użyte indeksy o podstawach stałych i zmiennych, pozwoliły określić wartości zmieniających się procentowo wartości mocy w zakresie całkowitym oraz w odniesieniu do poszczególnych obciążeń zewnętrznych. Całość analiz została opracowana z wykorzystaniem pakietu statystyczno-analitycznego Statistica.

## **3. Wyniki badań**

W tabeli 1 zaprezentowano statystyki opisowe dla zmiennych: prawej oraz lewej kończyny dolnej, u zawodników rekreacyjnie trenujących judo.

Tabela 1. Statystyki opisowe dla zmiennych kończyn dolnych.

Zmienna	Średnia	Odch.std	Wsp.zmn.
Kończyna dolna lewa	1974,021	867,701	43,956
Kończyna dolna prawa	1901,361	747,182	39,297

Wyniki testu T-Studenta pomiędzy wartością siły eksplozywnej prawej oraz lewej kończyny dolnej, oraz narastającym obciążeniem zewnętrznym zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki testu T-Studenta pomiędzy prawą oraz lewą kończyną dolną (siła eksplozywna), oraz narastającym obciążeniem zewnętrznym.

Zmienna	Średnia kończyna lewa	Średnia dolna kończyna prawa	t	p
Obciążenie zewnętrzne	1974,021	1901,361	0,190	0,038

Zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy badanymi zmiennymi wartości siły eksplozywnej kończyn dolnych, a narastającym obciążeniem zewnętrznym.

Wyniki testu T-Studenta pomiędzy wartościami siły eksplozywnej prawej oraz lewej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących judo zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki testu T-Studenta z wartościami siły eksplozywnej prawej oraz lewej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących judo.

Zmienna	Średnia	Odch.st.	t	p
Wartość siły eksplozywnej kończyny dolnej lewej	1974,021	867,701	6,825	0,0001
Wartość siły eksplozywnej kończyny dolnej prawej	1901,361	747,182	7,634	0,0001

Zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy badanymi zmiennymi: wartości siły eksplozywnej prawej oraz lewej kończyny dolnej.

Przeprowadzona analiza szeregów czasowych dla kończyny dolnej prawej i lewej, w odniesieniu do zmieniającego się obciążenia zewnętrznego, zaprezentowana została w tabelach 4-5.

Współczynnik zbieżności dla szeregu czasowego wartości mocy lewej kończyny dolnej wykazał, że jedynie 17% zmienności zjawiska nie zostało wyjaśnionych przez model szeregu czasowego. Wynik analizy szeregów czasowych wskazuje, że całkowity przyrost siły eksplozywnej lewej kończyny dolnej, ze względu na indeksy o podstawach stałych, wyniósł 319,6% w odniesieniu do obciążenia początkowego. Największy przyrost zauważono przy obciążeniach 263,7 kg i 294,4 kg (odpowiednio 275,9% i 319,6%). Natomiast biorąc pod uwagę indeksy o zmiennych podstawach, można było stwierdzić, iż największa o dodatnim trendzie dynamika zmian siły eksplozywnej lewej kończyny dolnej miała miejsce przy

zmianie obciążenia z 48,8 kg na 79,5 kg oraz z 79,5 kg na 110,2 kg (odpowiednio 28% i 3,1%). W dalszej kolejności od obciążenia 140,9 kg zauważono dynamikę o stałym trendzie ujemnym i ta tendencja utrzymała się do końcowego obciążenia testowego 294,4 kg.

Tabela 4. Wyniki analizy szeregów czasowych siły eksplozywnej lewej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących judo, w odniesieniu do funkcji czasu-zmienności obciążenia zewnętrznego.

Obciążenie zewnętrzne [%]	Średnie wartości siły eksplozywnej lewej kończyny dolnej [N]	Indeksy dynamiki o podstawie	
		stałej I(S)	zmiennej I(z)
10	778,19	100,0	100,0
20	996,41	128,0	<b>128,0</b>
30	1306,78	167,9	<b>131,1</b>
40	1643,78	211,2	125,8
50	1934,38	248,6	117,7
60	2124,63	273,0	118,7
70	2314,88	297,5	119,7
80	2601,50	334,3	112,4
90	2924,97	<b>375,9</b>	112,4
100	3265,31	<b>419,6</b>	111,6

Tabela 5. Wyniki analizy szeregów czasowych siły eksplozywnej prawej kończyny dolnej u zawodników rekreacyjnie trenujących judo, w odniesieniu do funkcji czasu-zmienności obciążenia zewnętrznego.

Obciążenie zewnętrzne [%]	Średnie wartości siły eksplozywnej prawej kończyny dolnej [N]	Indeksy dynamiki o podstawie	
		stałej I(S)	zmiennej I(z)
10	791,03	100,0	100,0
20	1022,16	129,2	<b>129,2</b>
30	1320,13	166,9	<b>129,2</b>
40	1676,16	211,9	127,0
50	1956,31	247,3	116,7
60	2141,13	270,7	117,8
70	2325,94	294,0	118,9
80	2596,31	<b>328,2</b>	111,6
90	2925,41	<b>369,8</b>	112,7
100	2498,81	315,9	85,4

Współczynnik zbieżności dla szeregu czasowego wartości siły eksplozywnej prawej kończyny dolnej wykazał, że jedynie 18% zmienności zjawiska nie zostało wyjaśnionych przez model szeregu czasowego. Wynik analizy szeregów czasowych wskazuje, że całkowity przyrost siły eksplozywnej prawej kończyny dolnej ze względu na indeksy o podstawach stałych wyniósł 315,9% przy maksymalnym obciążeniu w odniesieniu do początkowego. Największy przyrost zauważono przy obciążeniach 233 kg i 263,7 kg (odpowiednio 228,2% i 269,8%). Natomiast biorąc pod uwagę indeksy o zmiennych podstawach, można było stwierdzić, iż największa o dodatnim trendzie dynamika zmian siły eksplozywnej lewej kończyny dolnej, miała miejsce przy zmianie obciążenia z 48,8 kg na 79,5 kg oraz z 79,5 kg na 110,2 kg (w obydwu przypadkach 29,2%). W dalszej kolejności od obciążenia 140,9 kg zauważono dynamikę o stałym trendzie ujemnym i ta tendencja utrzymała się do końcowego obciążenia testowego 294,4 kg.

#### **4. Omówienie wyników**

Przeprowadzone testy i uzyskane wyniki analiz z zakresu procentowego obciążenia maksymalnego, w odniesieniu do szczytowej siły eksplozywnej odpowiednio (3265,31N-kończyna lewa i 2498,81N-kończyna prawa), pozwoliły stwierdzić, iż wysokie obciążenie zewnętrzne wymaga udziału większej siły eksplozywnej. Tym samym wyniki niniejszych badań są zbieżne z wnioskami badań prezentowanych w wielu artykułach i monografiach (Trzaskoma i Trzaskoma 2001; Cochran 2012; Kalina 2000; Zając i wsp. 2010; Avrillon i wsp. 2016; Fagerlund i Hakkinen 1991).

Wyniki testu T-Studenta wskazały istotne różnice statystyczne w poziomie średnich wartości siły eksplozywnej kończyn dolnych odpowiednio (1974,021N-kończyna lewa i 1901,361N-kończyna prawa). Różnica ta wynikać może z techniki walki, a w szczególności pracy nogi zakrocznej i wykrocznej podczas ataku i obrony (Rusznik i Zieniawa 2006; Cochran 2012; Kalina 2000). Ponadto widoczna różnica w poziomie maksymalnej siły eksplozywnej zawodników rekreacyjnie trenujących judo może wynikać z niewłaściwej periodyzacji treningu, bazującego na wykonywaniu technik jednostronnych (Wolański i Parizkova 1976; Ulatowski T 1992; Adamczyk i wsp. 2015).

#### **5. Wnioski**

Wyższe obciążenie zewnętrzne, wymaga udziału większej siły eksplozywnej, a zbyt duża dysproporcja w potencjale siły eksplozywnej kończyn dolnych, może decydować o sukcesie sportowym w judo.

W większości proces treningowy oraz technika walki w judo polega na aktywowaniu dolnych grup mięśniowych, przy wykorzystaniu dużej prędkości kinematycznej, przy znacznym oporze (Cochran 2012; Kalina 2000; Rusznik i Zieniawa 2006; Franchini i wsp. 2009). Jednak zbyt duża dysproporcja w potencjale siły eksplozywnej kończyn dolnych może decydować o sukcesie sportowym w judo (Cochran 2012; Kalina 2000; Rusznik i Zieniawa 2006). W walce sportowej istotne jest, aby zawodnik był w stanie wygenerować odpowiedni poziom siły eksplozywnej z zastrzeżeniem pewnej symetrii motorycznej, w warunkach zaburzonej homeostazy, która warunkuje poprawne wykonanie technik ofensywnych i defensywnych (Cochran 2012; Kalina 2000).

Podsumowując i odnosząc się do wielu przeprowadzonych badań na świecie można stwierdzić, iż obecnie w sporcie dąży się do maksymalizacji wyników sportowych poprzez periodyzację treningu sportowego w judo. Powinna ona być ukierunkowana na holistyczne rozwijanie zdolności motorycznych i dążyć do maksymalnego wykorzystania potencjału zawodnika w warunkach rywalizacji sportowej. Ponadto, zawodnik powinien posiadać

zrównoważony poziom siły eksplozywnej obu kończyn dolnych, gdyż pozwoli mu to na efektywniejsze zastosowanie technik walki.

## **6. Literatura**

Avrillon S., Jidovtseff B., Hug F., Guilhem G., Assessment of maximal shortening velocity of human muscle fascicle „Journal of Sports Physiology and Performance” June 2016, 12(3).

Bean J. F., Kiely D. K., LaRose S., O’Neill E., Goldstein R., Frontera W. R., Increased velocity exercise specific to task training versus the national institute on aging’s strength training program: changes in limb power and mobility, Journals of Gerontology Series A. 2009;64(9):983–991.

Cochran S. „Siła, szybkość i kondycja w sztukach walki” Zielonka 2012.

Czerwiński J., Sadowski J., Sozański H., „Podstawy teorii i technologii treningu sportowego” tom II, Warszawa – Biała Podlaska 2015.

Fagerlund R, Hakkinen H. „Strength profile of Finnish judoists: measurement and evaluation”, Biol Sport 1991; 8 (3): 143-9 .

Franchini E, Bertuzzi RCM, Takito MY, et al. „Effects of recovery type after a judo match on blood lactate and performance in specific and non-specific judo tasks”, European Journal of Applied Physiology, 2009; 107 (4): 377-83).

Kalina R. „Teoria sportów walki” Warszawa 2000.

Ruszniaik R., Zieniawa R. „Judo – pomost pomiędzy tradycją, a współczesnością” Gdańsk 2006.

Trzaskoma Z., Trzaskma Ł., „Kompleksowe zwiększanie siły mięśniowej sporowców”, Warszawa 2001.

Ulatowski T. (red.), „Teoria Sportu - Tom 1” Warszawa 1992.

Wolański N., Parizkova J. „Sprawność fizyczna a rozwój człowieka” Warszawa 1976.

Zajac A., Wilk M., Poprzęcki S., Bacik B., Rzepka R., Mikołajec K., Nowak K.. „Współczesny trening siły mięśniowej.” Katowice 2010.



# **Jakościowe porównanie charakterystyk aerodynamicznych modelu bolidu klasy Formuła Student na przykładzie AGH RTC 5.0**

**Jolanta Krupa** <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Jolanta Krupa: j.krupa@samorzad.agh.edu.pl

## **Streszczenie**

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań jakościowych aerodynamiki pojazdu stworzonego przez studentów. Przedstawiono ideę zawodów Formuły Student, w których bierze udział ze swoją konstrukcją zespół AGH Racing. Następnie ukazano jak model CAD bolidu przechodzi złożone symulacje CFD mające na celu dobranie i usytuowanie elementów aerodynamiki pojazdu. Wyniki te skonfrontowano z modelem rzeczywistym, przygotowanym w skali i umieszczonym w tunelu aerodynamicznym. Rezultaty tych prób zestawiono w podsumowaniu, gdzie przedstawiono przepływy aerodynamiczne wzdłuż modelu Formuły Student: wirtualnym oraz rzeczywistym.

**Słowa kluczowe:** pakiet aerodynamiczny, analiza CFD

## **Qualitative comparation of aerodynamic characteristics of Formula Student AGH RT 5.0 car's model**

### **Summary**

The aim of this article is to present the results of qualitative analysis of aerodynamics of a vehicle which was made by AGH UST students. There is a brief description of Formula Student competition, where AGH Racing participate yearly. The study has revealed how CAD model of the car proceed the CFD simulations which aim were to select and situate aerodynamic devices. The results were confronted with real object, prepared in scale and placed in wind tunnel. The effect of these tests were compared in summary where virtual and physical models were shown.

**Keywords:** aerodynamic design, CFD analisys

### **1 Formuła Student**

Formuła Student to seria zawodów dedykowanych studentom uczelni technicznych z całego świata. Najsilniej rozwinięta jest ona w Europie, o czym świadczy ilość eventów organizowanych na starym kontynencie – jest ich 11 i liczba ta rośnie. Miejsce odbywania się zawodów to przede wszystkim tory wyścigowe, które stanowią niekiedy miejsce rozgrywania wyścigów Moto GP czy Grand Prix Formuły 1. Ideą konkursu jest zaprojektowanie i wykonanie jednomiejscowego samochodu. Cały proces produkcji pojazdu nie może odbywać się przy udziale doświadczonych inżynierów – samochód musi zostać w całości przygotowany przez studentów. Oczywiście dopuszcza się konsultacje merytoryczne, bowiem żadne studia nie są w stanie przygotować przyszłych inżynierów do samodzielnego wykonania tak złożonej konstrukcji, jednak nie mogą stanowić one transferu gotowych rozwiązań. Same zawody zaś dzielą się na dwie części – statyczną i dynamiczną.

Bolid klasy Formula Student jest pełnowymiarowym, jednoosobowym autem, które spełnia regulamin SAE International i takim też jest AGH RT 5.0 (Rys.1).



Rys. 1. AGH RT 5.0, Formula Student Spain, rok 2018

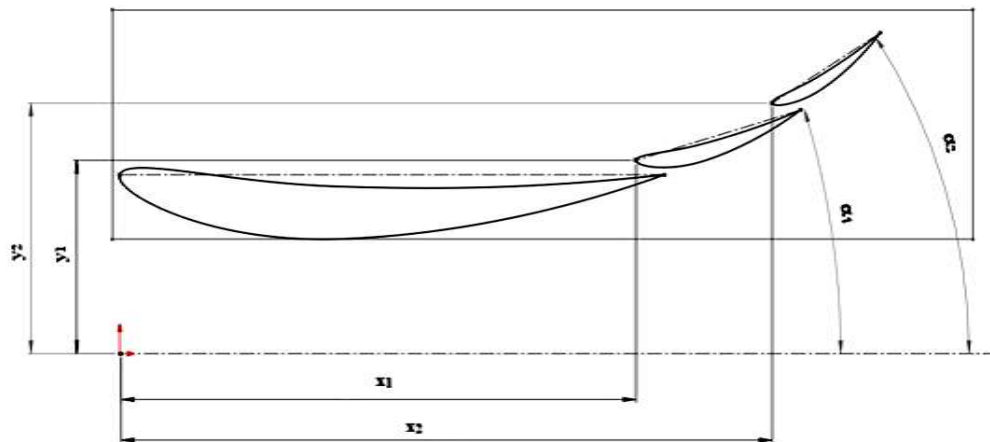
## 2. Analiza numeryczna przepływów

Jak wspomniano, analizy wykonywanych projektów są nieodłączną częścią pracy zespołu AGH Racing. Swoje badania zarówno na modelach rzeczywistych, jak i wirtualnych przeprowadzają osoby pracujące nad strukturą nośną pojazdu, zawieszeniem i doborem ogumienia oraz aerodynamicy. W przypadku tych ostatnich proces projektowania nadwozia jest bardzo złożony, należy, bowiem dobrać elementy aerodynamiki pojazdu, ich umiejscowienie, a także kształt nie zapominając o pozostałych układach samochodu, które za zwyczaj zaburzają przepływ.

W przypadku skrzydeł, analizę rozpoczęto od symulacji 2D w celu zbadania ustawień oraz wyboru kształtu poszczególnych profili lotniczych po uprzednim rozmieszczeniu płatów w modelu CAD. Badaniom poddane były 3 różne rodzaje skrzydeł, przednie boczne i tylne, a każde z nich posiadało odrębny arkusz kalkulacyjny, w którym opisywano parametry dla możliwego położenia poszczególnych lotek. Stałe dla każdej z sekcji, pozostawały zawsze kąt płatów głównych (a więc tych znajdujących się najniżej w skrzydle), który wynosił  $0^\circ$  oraz wysokość nad ziemią, która dla poszczególnych skrzydeł przedniego i bocznego wyniosła 80 mm. Parametrami nastawnymi zaś były wielkości (Rys. 2), na przykładzie schematu przedniego i tylnego skrzydła.

Po dokonaniu wstępnej selekcji z przeprowadzonych setek analiz kolejny krok stanowił przygotowanie modelu geometrycznego i jego parametryzację. Każde ze skrzydeł badane

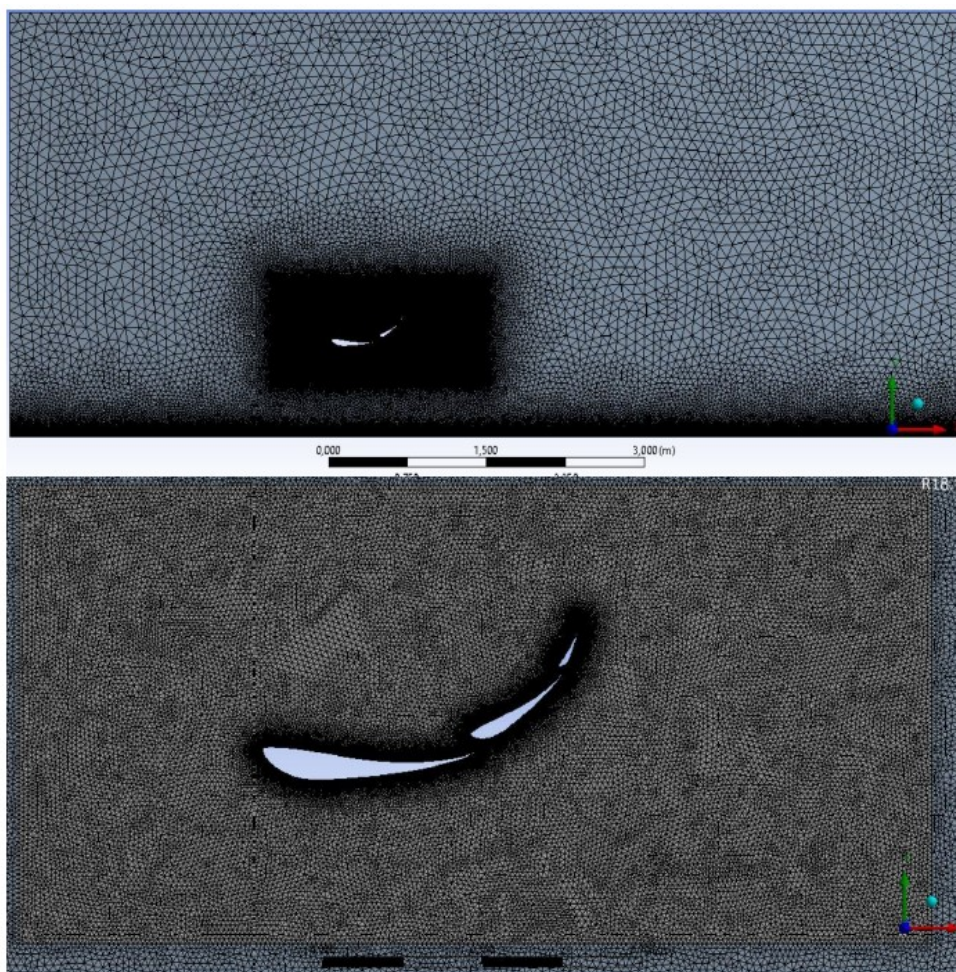
było w przestrzeni kontrolnej o wymiarach 9x4 metrów. Dla umożliwienia późniejszego zagęszczenia siatki, w modelach wyodrębniono także przestrzenie wokół sekcji profili.



Rys. 2. Schemat opisujący zmienne parametry poddawane analizie dla skrzydła wielopłatowego

Następną czynnością była analiza niezależności przyjętych rozwiązań od ilości elementów siatki, dla zróżnicowanych maksymalnych wychyleń elementów. Dokonano obliczeń na siatkach o elementach trójkątnych dla zagęszczeń lokalnych, z racji, iż przy liczbie elementów na poziomie 200 000 pozwalają one na zachowanie błędu względnego poniżej 2% w stosunku do siatki odniesienia. Maksymalna wielkość takiego elementu wyniosła 50 mm dla domeny globalnie i 10 mm w obszarach lokalnego zagęszczenia. Dla stosownego odwzorowania krawędzi spływu przyjęto minimalną wielkość elementów jako 0,01 mm. Aby poprawnie odwzorować zaś przepływ w obszarach przyściennych, wymaga się, by wysokość elementu w okolicy badanej powierzchni była niewielka. Osiągnięto to poprzez intensyfikację zagęszczenia siatki w rejonie krawędzi profili oraz jezdni. Wyniki dyskretyzacji przedstawiono na rys. 3.

Ostatnim krokiem, przed wykonaniem symulacji było przyjęcie warunków brzegowych. Z racji iż płynem, w którym badano elementy było powietrze, obrano gęstość  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$  i lepkość dynamiczną  $\mu=1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Prędkość na wlocie wyniosła 15 m/s, tak samo jak dla dolnej krawędzi odwzorowującej jezdnię; górnej krawędzi zaś, nadano warunek symetrii ciśnienia atmosferycznego. Wartość 15 m/s nie była przypadkowa, odpowiada, bowiem uśrednionej prędkości, z jaką poruszają się bolidy FSAE podczas zawodów.



Rys. 3 Wynik wytworzenia siatki o zadanych parametrach na przykładzie tylnego skrzydła bolidu AGR RT 5.0

Po dokonaniu symulacji wybrano do dalszej analizy konfiguracje, które uzyskały dla przypadków konkretnych skrzydeł, najlepsze wyniki:

Skrzydło przednie – wybrano konfiguracje przedstawione w tabelach 1. i 2; oznaczenia wg rys. 2.

Tab. 1. Wyniki trzech wariantów dla sekcji przed kołem (opracowanie własne)

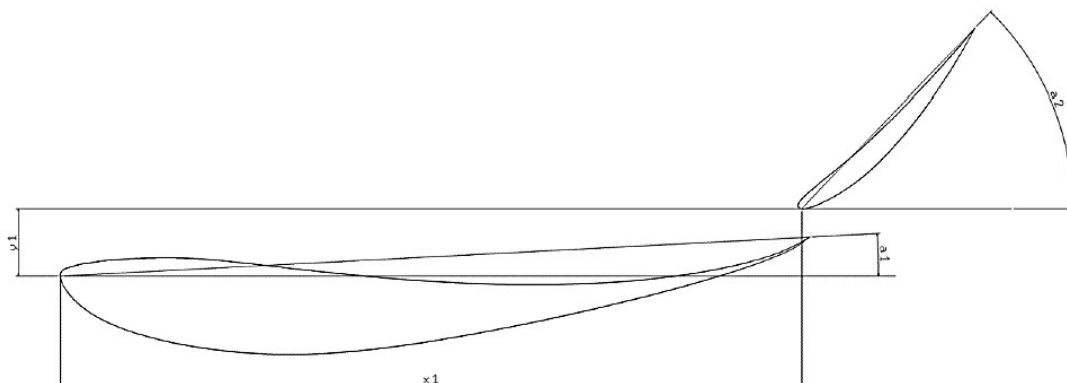
Numer konfiguracji	$x_1$ [m]	$y_1$ [m]	$x_2$ [m]	$y_2$ [m]	$\alpha_1$ [°]	$\alpha_2$ [°]	Docisk [N]	Opór [N]
647	0,365	0,145	0,47	0,19	17	33	423,63	13,01
317	0,36	0,145	0,46	0,18	15	33	409,33	12,58
161	0,365	0,145	0,475	0,18	13	33	401,06	11,26

Tab. 2 Wynik dla wybranego wariantu dla sekcji wewnętrznej przedniego skrzydła (opracowanie własne)

Numer konfiguracji	$x_1$ [m]	$y_1$ [m]	$x_2$ [m]	$y_2$ [m]	$\alpha_1$ [°]	$\alpha_2$ [°]	Docisk [N]	Opór [N]
484	0,39	0,155	0,525	0,205	17	39	509,22	16,69

Skrzydła boczne – tutaj po przeprowadzeniu symulacji i doborze ustawień względem siebie płata, skupiono się na badaniach trzech wychyleń elementu, którego schemat ułożenia płatów przedstawiono na rys. 4. Z racji umiejscowienia tłumika w okolicach lewego skrzydła,

konieczne było rozłożenie analizy na dwa oddzielne przypadki, by wziąć pod uwagę wpływ elementów układu wydechowego na zachowanie przepływu. Wyniki zawarto zaś w tabeli 3.



Rys 4. Parametry poddane analizie podczas symulacji 2D dla skrzydeł boczných

Tab. 3 Wyniki badań dla trzech wariantów wychyleń skrzydła w osi poziomej

Lp.	Polożenie	x [mm]	y [mm]	Docisk [N]		Różnica [%]	Opór [N]		Różnica [%]
				Strona lewa	Strona prawa		Strona lewa	Strona prawa	
1	Maksymalne wychylenie w przód	+10	143	17	23,2	36,5	3,5	4,3	22,9
2	Środkowe	0	143	17,0	21,1	24,1	3,7	4,2	13,5
3	Maksymalne wychylenie w tył	-10	143	16,5	17	3,0	4,0	3,7	7,5

Skrzydło tylne – tutaj wybrano do dalszych symulacji jedną opcję dla wartości przedstawionych w tabeli 4. Oznaczenia geometrii jak na rys. 5

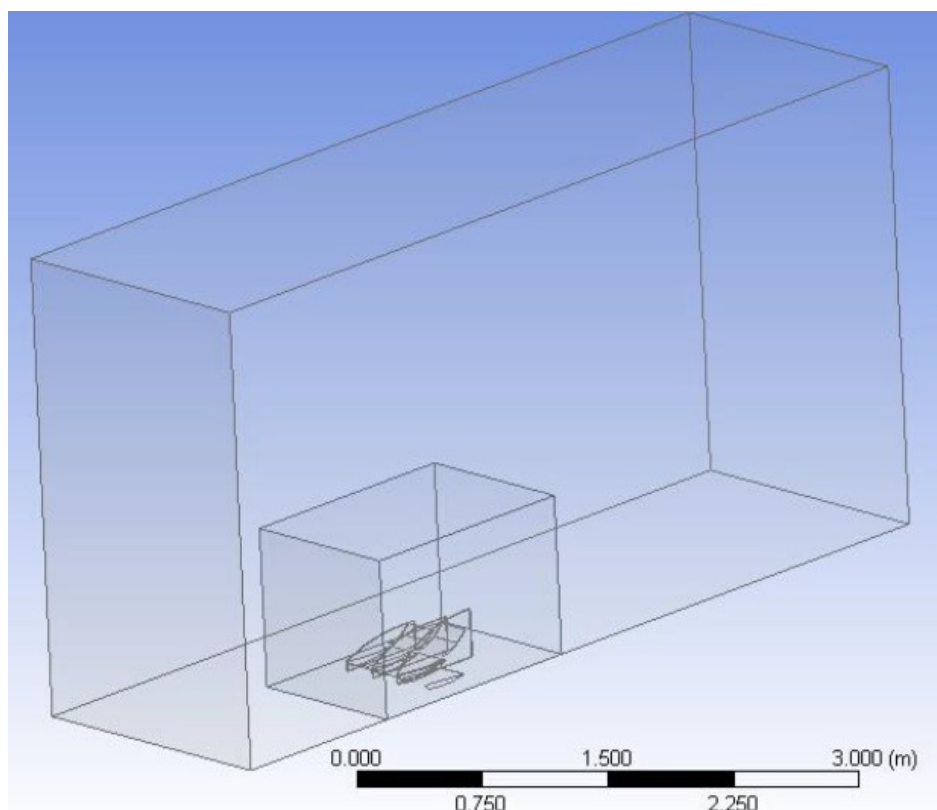
Tab. 4 wyniki symulacji nr 389, wybranej jako tej z najlepszymi parametrami skrzydła

Numer konfiguracji	x <sub>1</sub> [m]	y <sub>1</sub> [m]	x <sub>2</sub> [m]	y <sub>2</sub> [m]	α <sub>1</sub> [°]	α <sub>2</sub> [°]	Docisk [N]	Opór [N]
389	0,488	0,924	0,681	0,205	34,92	65,92	459,52	12,00

Kolejnym etapem, było wykonanie modeli 3D każdego z elementów. Dla przyspieszenia symulacji skrzydeł przedniego i tylnego, wykorzystano symetryczny charakter modułów wprowadzając w przestrzeń roboczą połowę prototypu. Obszar obliczeniowy sporządzono o wymiarach 5,5 m długości, 3 m wysokości i 2 m szerokości. Dodatkowo wprowadzono w najbliższym otoczeniu modelu zagęszczenie lokalne mające wymiary 1,5 na 1 na 1 metra, co obrazuje schemat na rysunku 5.

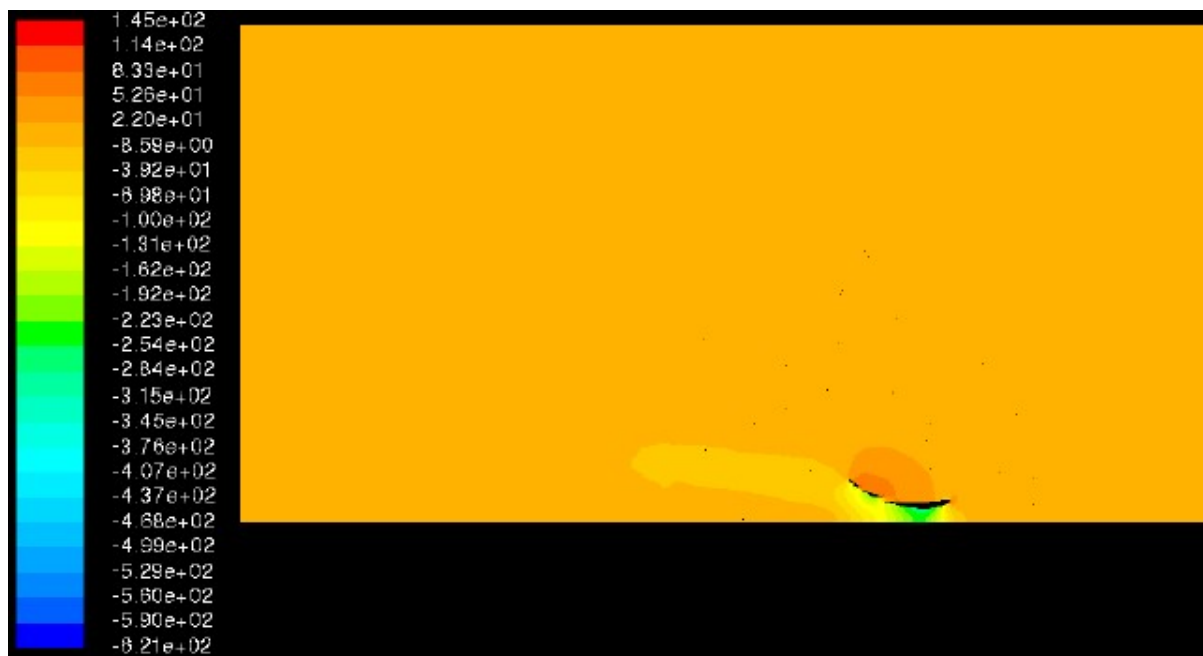
Podczas dyskretyzacji zwiększono, co zrozumiałe, wielkość elementu w domenie obliczeniowej do 200 mm, zaś w przestrzeni zagęszczenia do 25 mm. Po analizie ilości cząstek siatki, przyjęto, że przy około 15,5 miliona elementów dokładność analizy będzie na poziomie 99,4% siatki odniesienia o dwukrotnie większej liczbie elementów. Warunki brzegowe przyjęto jak w modelu 2D, ponieważ przepływającym czynnikiem pozostało

powietrze. Poniżej, na zamieszczonych grafikach przedstawiono wyniki symulacji z rozkładem ciśnień wokół płatów:

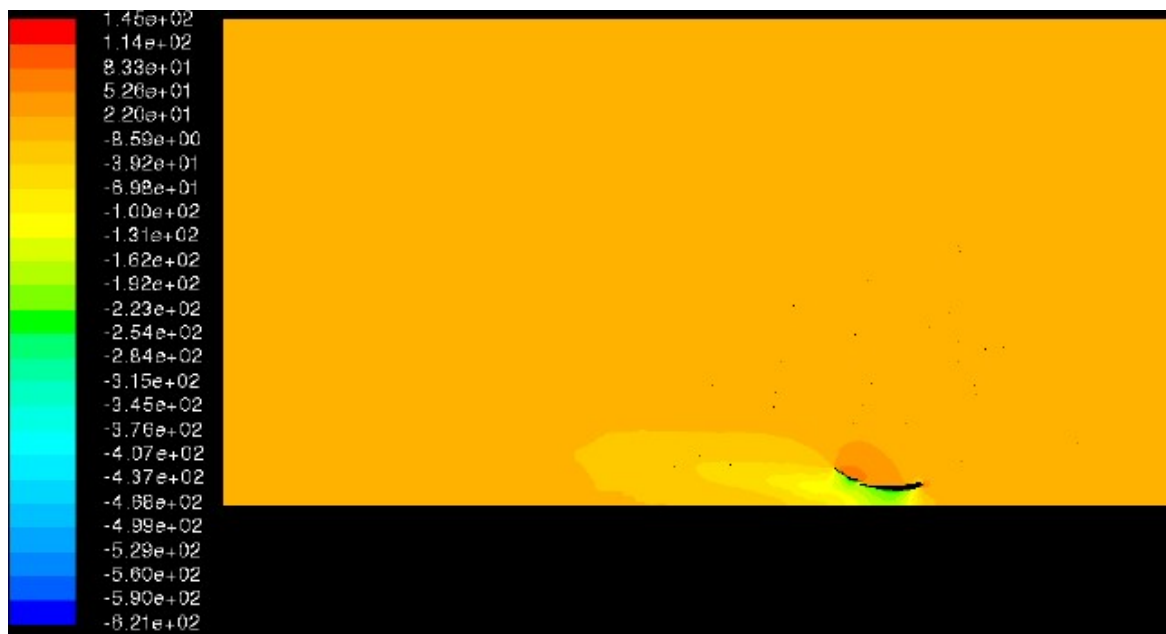


Rys. 5 Model skrzydła przedniego umieszczony w strefie zagęszczenie obszaru obliczeniowego.

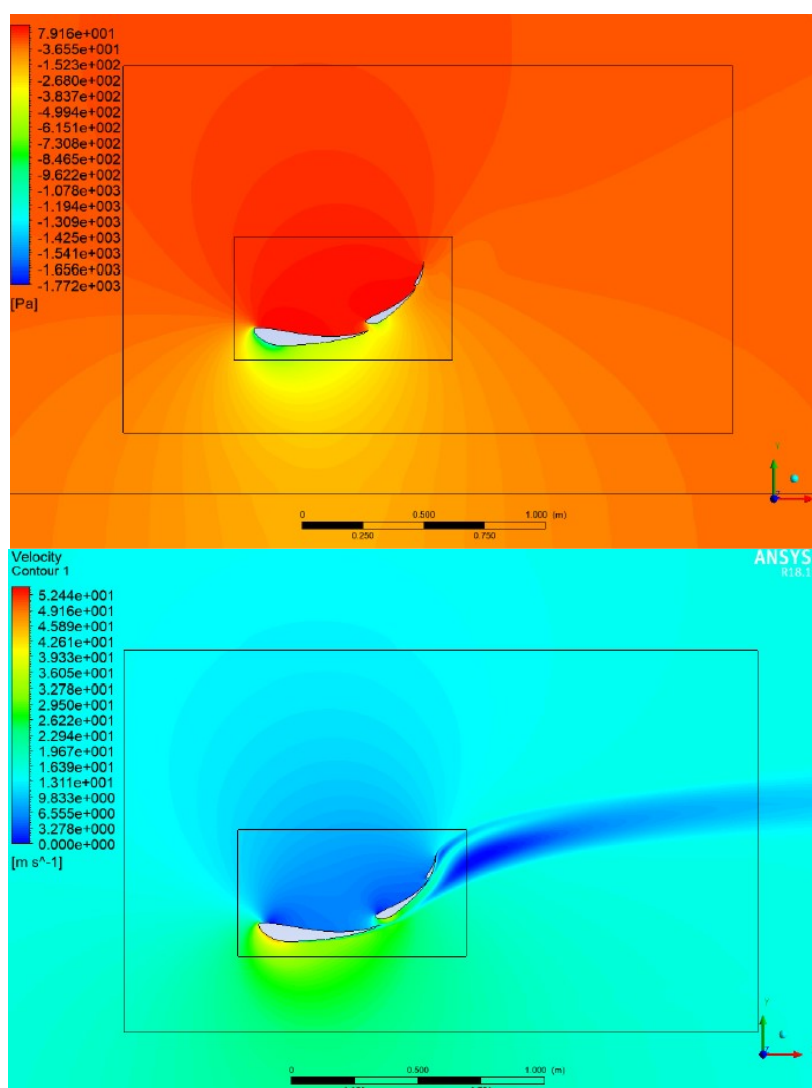
Skrzydło przednie, dla sekcji wewnętrznej i zewnętrznej, rys. 6 i 7:



Rys. 6. Rozkład ciśnienia wokół sekcji wewnętrznej skrzydła przedniego

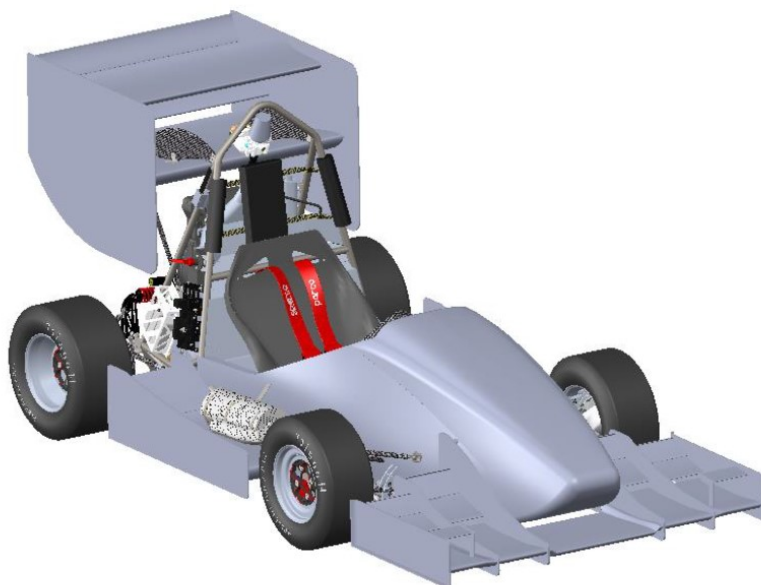


Rys. 7. Rozkład ciśnienia dla zewnętrznej sekcji skrzydła przedniego  
Skrzydło tylne, porównanie wartości ciśnień i prędkości, rys. 8.

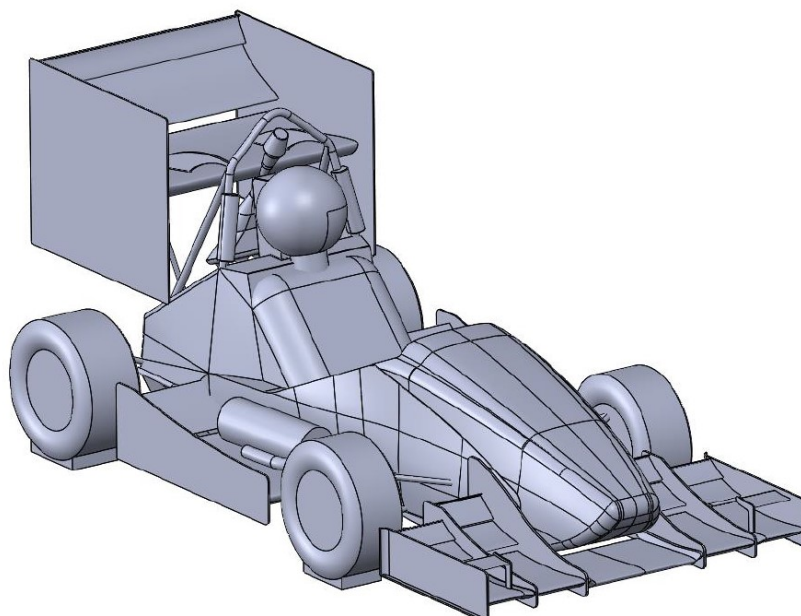


Rys. 8. Zobrazowanie rozkładu ciśnień i prędkości na przykładzie tylnego skrzydła

Ostatnim etapem projektu była symulacja pełnego złożenia auta ze wszystkimi komponentami dodanymi przez pozostałe podzespoły. Było to zadanie o wiele trudniejsze od symulacji przepływu wokół płatów skrzydła. Z racji skomplikowania oraz dużej ilości elementów składających się na projekt, do wykonania symulacji skorzystano z mocy obliczeniowej „Prometeusza” dzięki uprzejmości Cyfronetu AGH. Niemniej jednak, model i tak musiał ulec pewnemu uproszczeniu, co można porównać na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Widok rzeczywistego złożenia modelu bolidu

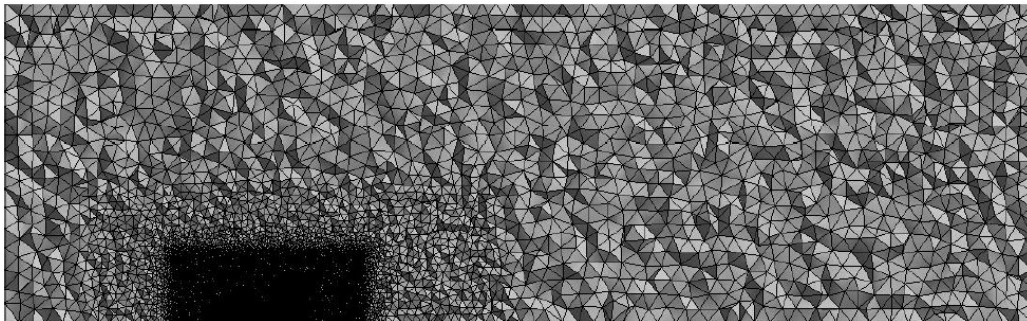


Rys. 10. Widok uproszczonego złożenia modelu przeznaczonego do użycia podczas symulacji przepływu

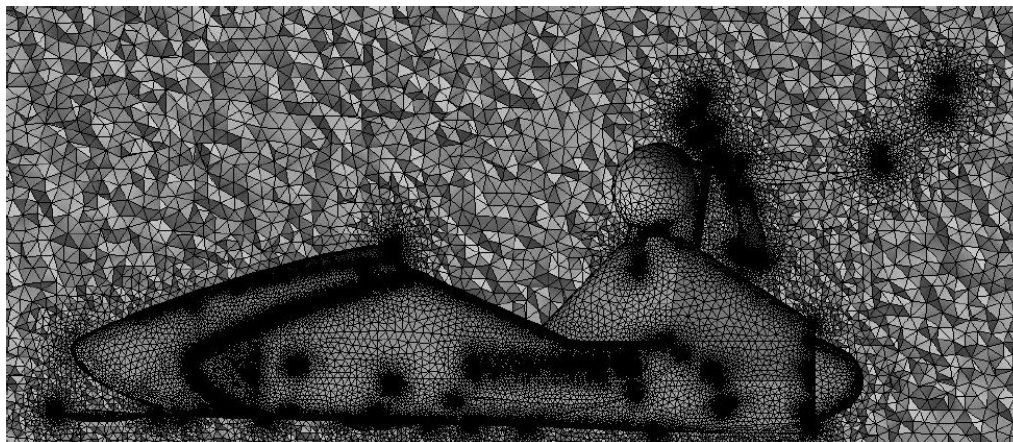
W przypadku złożenia, nie można było dokonać uproszczenia, jak dla skrzydeł, z powodu asymetrii konstrukcji. Przygotowana domena przyjęła więc wymiary: długość –



30m, wysokość – 13,5 m oraz szerokość – 9 m. Siatka z rozkładem zagęszczeń, przedstawionych na rysunkach 11 oraz 12, w tym przypadku składała się aż z 47,6 miliona elementów.



Rys. 11. Widok z boku na przestrzeń symulacji z widoczną strefą zagęszczenia.

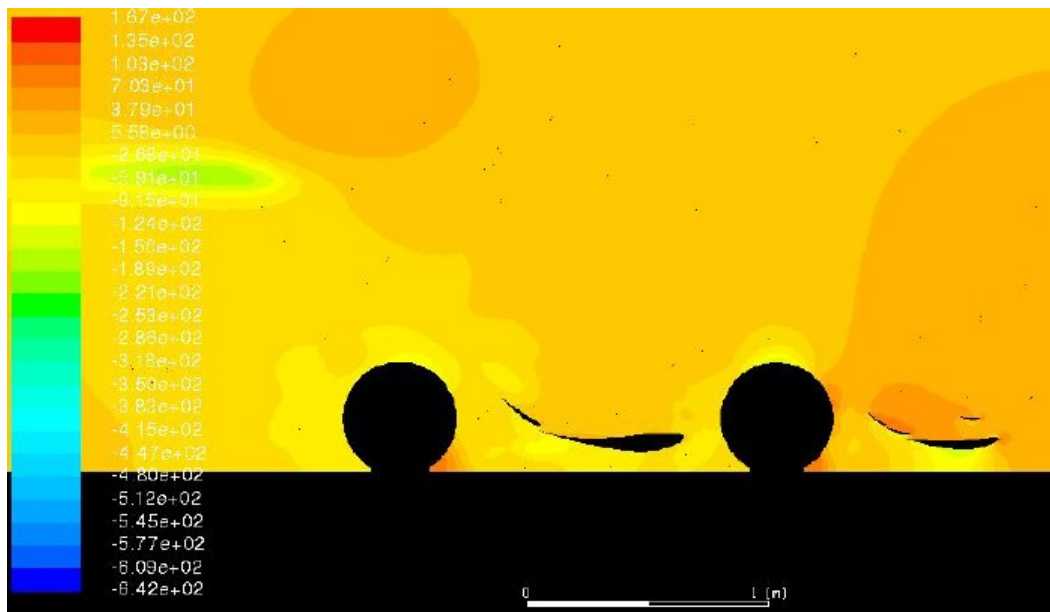


Rys. 12. Rozkład siatki na modelu i w jego najbliższym otoczeniu.

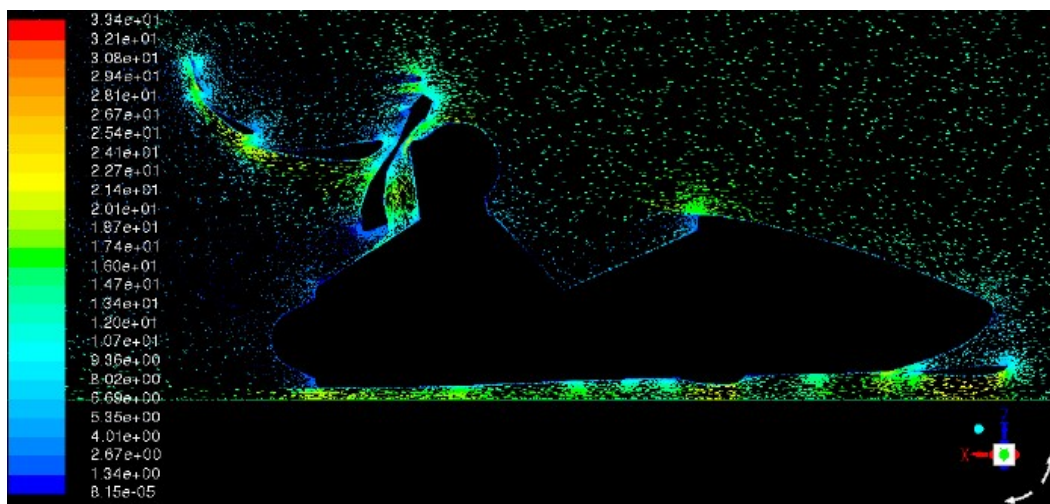
Przyjęto parametry przepływu tożsame z tymi, wykorzystywanymi do poprzednich symulacji. Wyniki ukazujące prędkości przepływu powietrza oraz rozkład ciśnień na karoserii bolidu przedstawiono poniżej na grafikach będących efektem symulacji; Rys. 13-16..



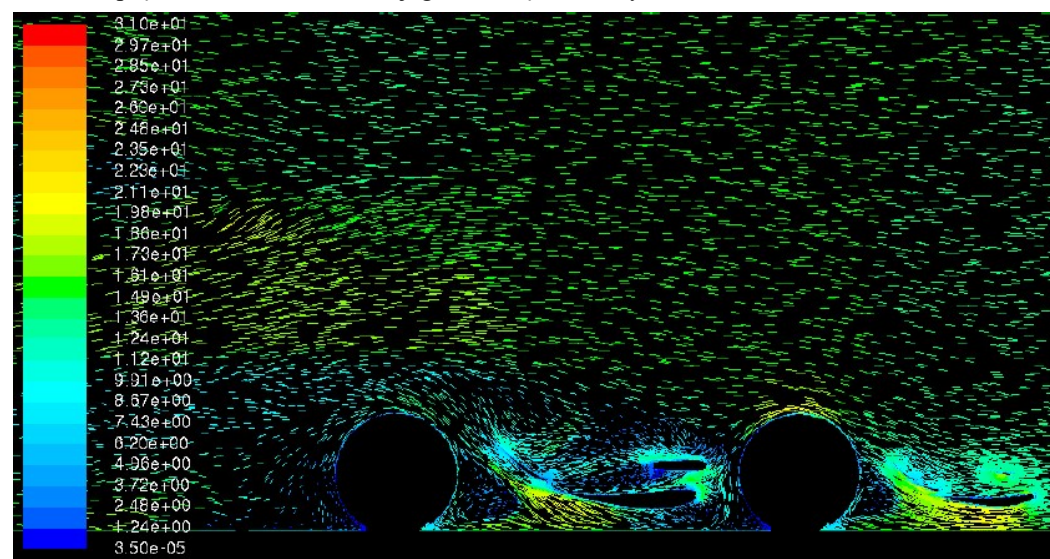
Rys. 13. Rozkład ciśnienia statycznego na samochodzie AGH RT 6.0



Rys. 14. Rozkład ciśnień w okolicach przedniego oraz bocznego skrzydła z prawej strony bolidu



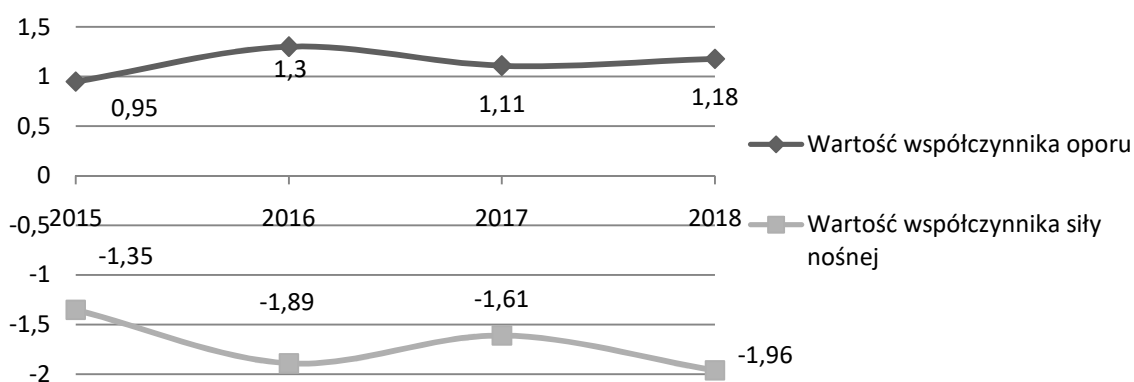
Rys. 15. Rozkład prędkości wokół bolidu w jego osi. Prędkości wyrażono w m/s.



Rys. 16. Rozkład prędkości zobrazony przez jej wektory w płaszczyźnie oddalony 550 mm od osi bolidu.

Dzięki dokonany symulacjom, obliczono, że siła docisku w modelu 2018 wyniosła 251,92 N, co stanowiło zwiększenie jej 14% względem poprzedniego sezonu. Niewielkiemu zwiększeniu uległa siła oporu, która ze 154 N wzrosła w obecnym sezonie do 161,7 N, co stanowiło różnicę niecałych 5%. Odpowiadające siłom współczynniki wyniosły odpowiednio:  $c_W = 1,18$  oraz  $c_1 = -1,96$ . Aby mieć porównanie, jak zmieniały się powyższe współczynniki, na przestrzeni kolejnych sezonów, zamieszczono na rys. 17 wykres z ich wartościami.

Zakładany podczas fazy projektowej balans aerodynamiczny mający wynosić 60%-towy docisk na tylną oś, w rzeczywistości wyniósł 56%, co oznacza, że tylne skrzydło powinno mieć jeszcze mocniejszy płat dociskowy.



Rys. 17 Wartości współczynników oporu oraz siły nośnej bolidów z sezonów 2015-2018

### 3 Weryfikacja fizyczna

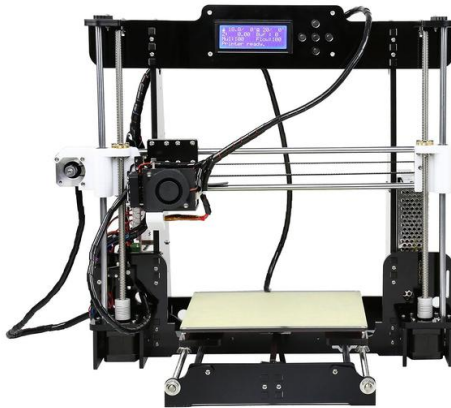
Zgodnie z tematem niniejszej pracy, przeprowadzona została również weryfikacja wyników uzyskanych podczas symulacji na obiekcie fizycznym. Do tego przedsięwzięcia niezbędnym było umieszczenie samochodu w tunelu aerodynamicznym. Niestety, najbliższym Krakowa położonym tunelem, w którym zmieściłoby się całe auto jest ten należący do Instytutu Lotnictwa w Warszawie, w którym dzień pracy to koszt rzędu paru tysięcy złotych. Rozwiązaniem było tu skorzystanie z tunelu znajdującego się na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, należącego do Katedry Systemów Energetycznych i Ochrony Środowiska. Posiada on, co prawda mniejsze, wymiary, przekrój poprzeczny jest kształtu kwadratu o boku 1300 mm, ale jest dostępny na terenie AGH, a prace w nim mogą być nadzorowane przez specjalistów w dziedzinach przepływu.

### 4 Przygotowanie modelu

Do wykonania weryfikacji jakościowej, bo na tym skupia się próba, niezbędny był pomniejszony model rzeczywistego obiektu. Wykonywanie go techniką, jaką jest w rzeczywistości, a więc z włókna węglowego, było niemożliwe. Konieczność przygotowywania form, ich frezowanie i szlifowanie nie wchodziło w grę przy tak

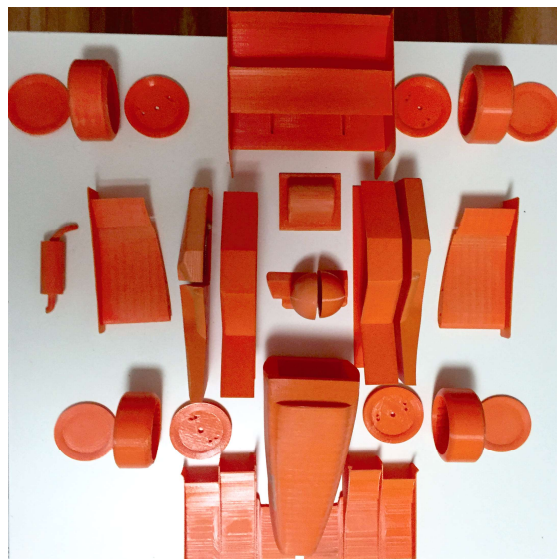
niewielkich elementach. Z pomocą przyszła technika szybkiego prototypowania, a więc druk 3D.

Bolid został wydrukowany za pomocą drukarki Anet A8, przedstawionej na rys. 18. polu roboczym 200x200x200 mm, średnicy dyszy 0,4 mm i wysokości wydruku 0,2 mm. Jest to niewielkie urządzenie do użytku domowego.



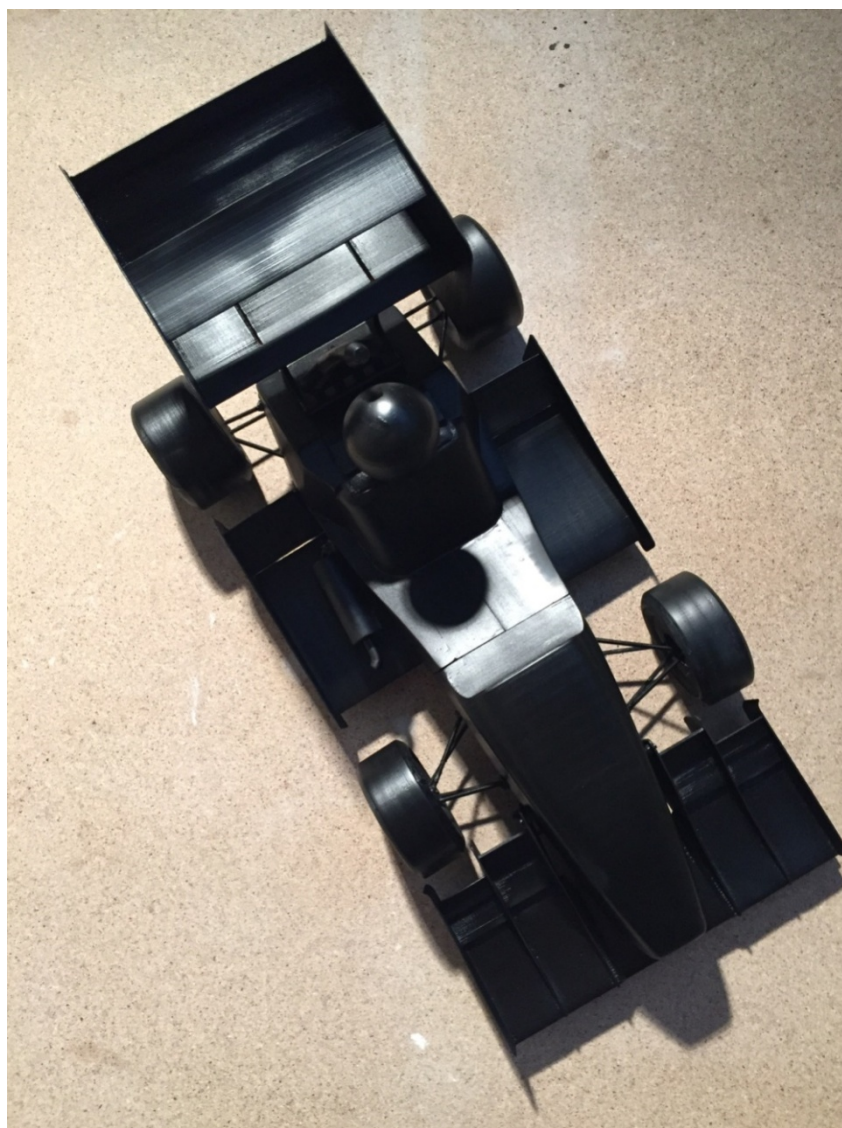
Rys. 18 Drukarka Anet A8

Oczywistym jest, że wydruk całego samochodu w zadanej skali nie byłby możliwy, dlatego kolejno dzielono model na fragmenty, mieszczące się w polu roboczym drukarki. Skorzystano tutaj z uproszczonego złożenia z rysunku 10, takiego samego jak w przypadku analizy CFD. Samochód, a właściwie jego części był wydrukowany z tworzywa PLA, czyli polilaktydu. Jest to plastik wytwarzany z surowców naturalnych o szerokim zastosowaniu, szczególnie w medycynie. Czas, jaki był potrzebny na wydrukowanie 27 detali przedstawionych na rys. 19, wraz z przygotowaniem ich g-code'ów w programie Craft Ware wyniósł około półtorej miesiąca.



Rys. 19 Elementy, które posłużyły do powstania modelu bolidu AGH Racing z sezonu 2018

Kolejnym krokiem było przygotowanie powierzchni elementów, które w zależności od rozmiaru, ilości suportów drukowanych przy skomplikowanych elementach oraz samych problemów wynikających z technologii druku 3D posiadały nierówności. Konieczne było zeszlifowanie nierówności, a w skrajnych przypadkach użycie szpachłówki do plastiku. Kiedy zadbano o powierzchnię, można było przejść do połączenia elementów. I tak, do wykonania wahaczy w zawieszeniu, użyto dociętych wcześniej prętów metalowych o średnicy 3 mm, mocowanie bocznych skrzydeł zrealizowano na śrubach o takim samym wymiarze, reszta zaś elementów łączona była przy pomocy błyskawicznego kleju cyjanoakrylowego. Na koniec, model został pokryty czarną farbą, a efekt końcowy można zobaczyć na rys. 20.



Rys. 20 Kompletny model bolidu AGH RT 5.0 w skali 1:6

## **5. Stanowisko do wykonania badań**

Badania, jak już wspomniano, wykonywano na terenie Akademii w tunelu aerodynamicznym o wymiarze wyjścia strugi powietrze 1300x1300 mm, w którym powietrze

napędzane było szesnastoma wentylatorami. Maksymalna prędkość przepływu w tunelu wynosi 11,5 m/s, a więc 41,4 km/h i można nastawiać ją na żadaną wartość oddzielnie na każdym z wentylatorów. Szafa sterownicza oraz układ wentylatorów ukazano na rys. 21.



Rys. 21 Wentylatory w tunelu aerodynamicznym oraz odpowiadający każdemu z nich panel sterujący

Model ustawiono na wylocie tunelu, przodem do wentylatorów, centralnie na nieruchomej podstawie, jak na rysunku 22. Z racji niezbyt wysokich prędkości uzyskiwanych w tunelu, samochód nie wymagał dodatkowego mocowania do płyty.



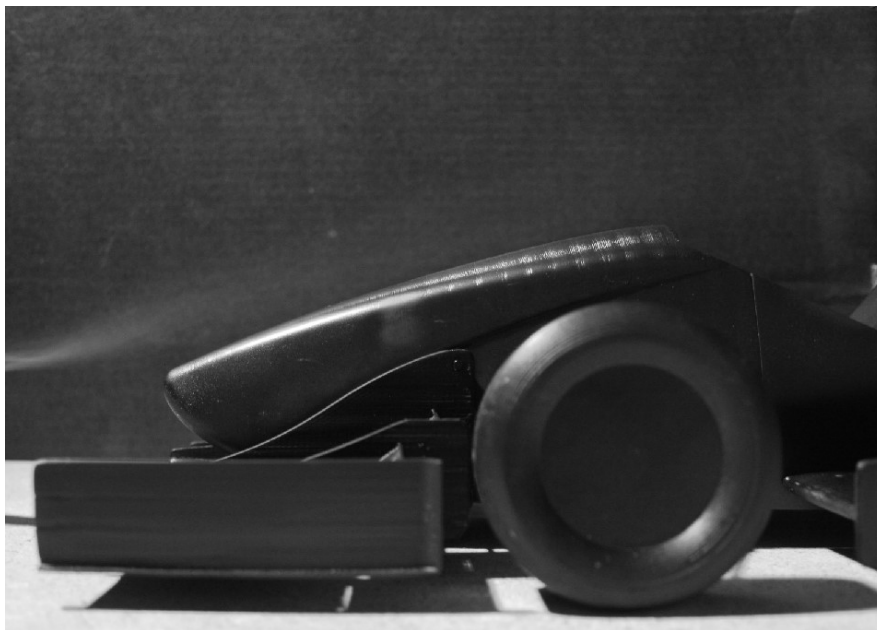
Rys. 22 Model samochodu przygotowany do badań

## 5 Badania jakościowe

Analiza przepływów miała odbyć się na 3 sposoby:

- Przy użyciu dymu
- Za pomocą nici
- Z wykorzystaniem bieli tytanowej.

Jako pierwsze, wykonano testy z użyciem dymu. Był on wytwarzany za pomocą kadzidełek zapachowych umieszczonych w rurce plastikowej zakończonej dyszą o średnicy 4 mm. Zbadano w ten sposób przepływ wokół przedniego skrzydła, nosa samochodu aż do przestrzeni oraz skrzydeł bocznych, co przedstawia seria rysunków o numerach od 23 do 25.



Rys. 23. Widok z boku na przepływ nosa bolidu z wyraźnie zaznaczoną warstwą przyścienną



Rys. 24. Przepływ dymu przy najwyższym położonym płacie wewnętrznej sekcji skrzydła przedniego



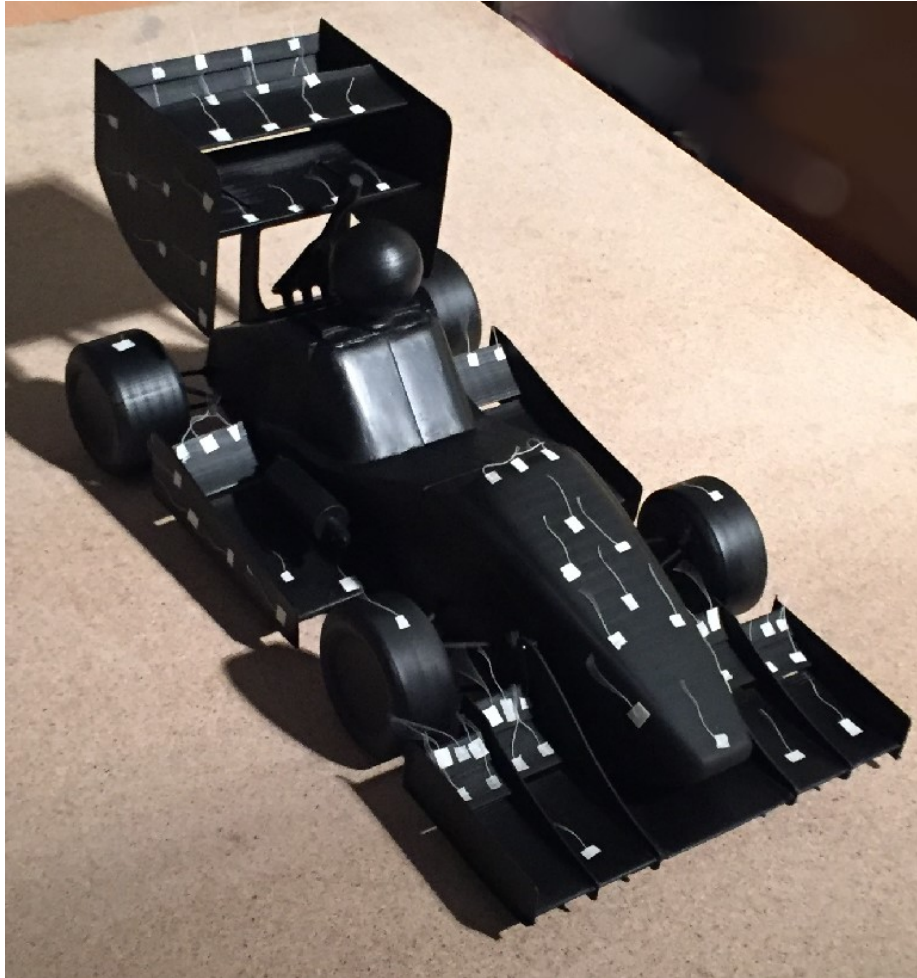
Rys. 25. Przepływ na granicy poszycia i przestrzeni kierowcy z widocznym przepływem turbulentnym

Kolejnym przeprowadzonym badaniem było wykazanie kierunków przemieszczania się strug powietrza przy użyciu nici. Model oklejony został 77 nitkami o długości 25 mm taśmą jak na rys. 26. Przeprowadzone próby przedstawione są na rysunkach 27 oraz 28.

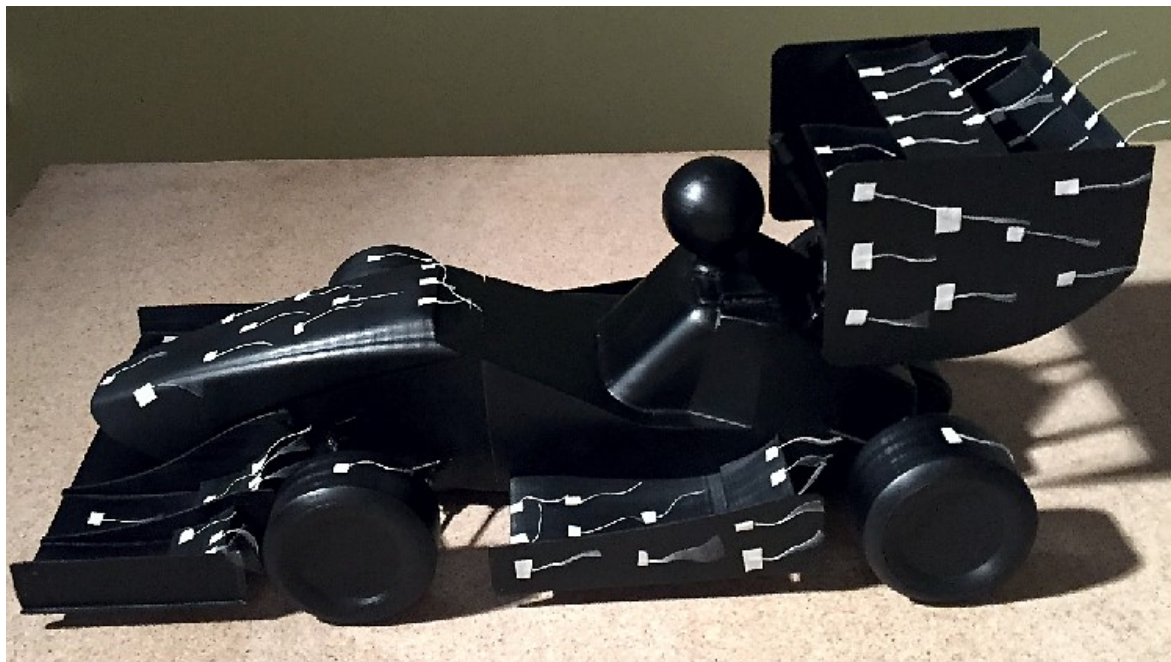


Rys. 26. Model gotowy do testów przy pomocy nici.





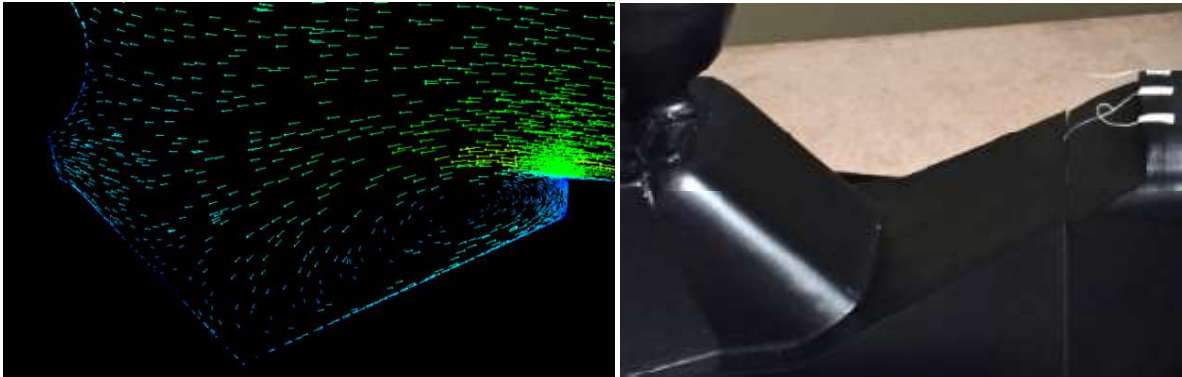
Rys. 27. Widok z boku podczas przeprowadzania eksperymentu



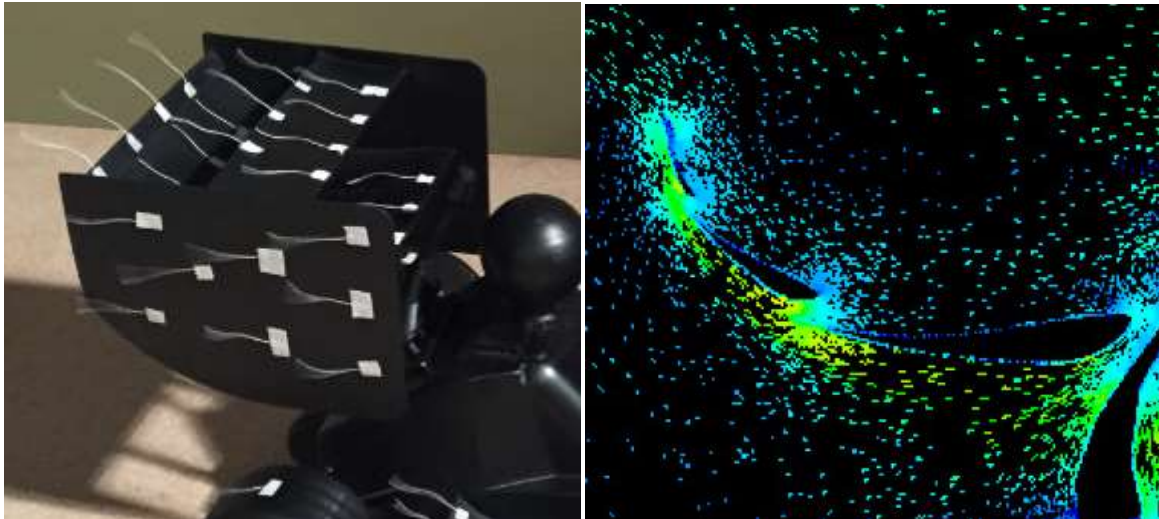
Rys. 28. Widok z boku z widocznym kierunkiem przepływu powietrza za górnymi krawędziami płatów skrzydeł

## 6. Podsumowanie wyników

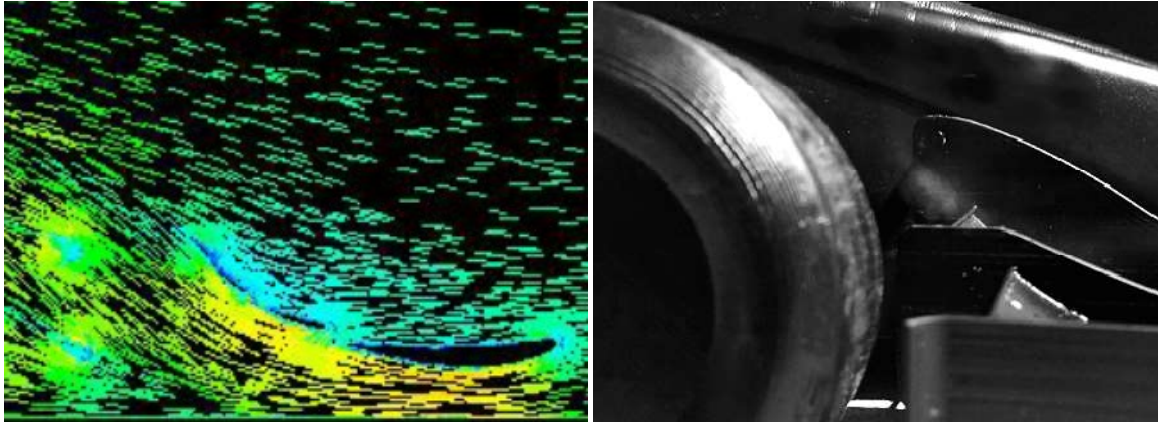
Zarówno badania ilościowe, wykonane za pomocą symulacji komputerowych, jak i jakościowe, przeprowadzone na pomniejszonym modelu potwierdzają teoretyczne zachowanie się powietrza podczas przepływów. I chociaż nie w każdej badanej na fizycznym pojeździe sytuacji strugi powietrza wędrują w sposób identyczny jak wykazany w symulacjach, to należy pamiętać, że analiza CFD symuluje warunki idealne. Każda nierówność lub zmiana chropowatości na wydruku 3D powoduje tworzenie się mikrowirów, które wraz z przepływem propagują do większych rozmiarów zakłócając obieg powietrza i doprowadzając do turbulencji. Na poniższych rysunkach (Rys. 29 – 31) zestawiono badania, których wyniki pokrywają się pomiędzy symulacjami numerycznymi a tymi dokonanymi w tunelu.



Rys. 29 Moment pojawienia się wirów w miejscu przejścia karoserii do kokpitu kierowcy



Rys. 30 Wektory oraz nici skierowane wyraźnie w górę przy wyjściu z położonego najwyżej płata



Rys. 31. Unoszące się po wyjściu ze skrzydła strugi powietrza

## 7. Literatura

Praca zbiorowa pod redakcją W.H.. Hucho, 1988 Aerodynamika samochodu. Od mechaniki przepływu do budowy pojazdu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

J. Kowalczyk, 2018, Analiza aerodynamiczna przedniego spoileru bolidu wyścigowego klasy Formuła Student, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Piechura J., 2000, Podstawy aerodynamiki pojazdów, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności

McBeath S., 2017, Competition car aerodynamics, Veloce Publishing

# Modelowanie numeryczne kompozytu w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych

Michał Kucewicz <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Warszawa

Michał Kucewicz: [michal.kucewicz@wat.edu.pl](mailto:michal.kucewicz@wat.edu.pl)

## Streszczenie

W pracy przedstawiono symulacje numeryczne rzeczywistych testów normatywnych dla kompozytów na przykładzie laminatu UD S-2 Glass/SC15. Modelowaniu poddano jednoosiowe ściskanie płyty z otworem oraz uderzenie w okrągłą płytę bijakiem z prędkością 5 m/s. Model konstytutywny został sprawdzony za pomocą symulacji jednego elementu oraz obliczeń analitycznych, wykazując bardzo dobrą zdolność do opisu zachowania materiału w pełnym zakresie obciążenia (do zniszczenia).

**Słowa kluczowe:** Kompozyt, bijak, modelowanie

## Numerical modelling of Composite lamina under static and dynamic loading conditions

### Summary

The paper consists a numerical simulations of actual normative tests for composites based on UD S-2 Glass / SC15 laminate. The modeling covered an uniaxial compression of the plate with the hole and the impact of rigid punch into the round plate withspeed of 5 m/s. The constitutive model has been validated with experimental parameters using simulation of one element and analytical calculations with good agreement

**Keywords:** composite, punch test, modelling

### 1. Wstęp

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat nastąpił dynamiczny rozwój materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu. Stosowana do tej pory stal została wyparta przez równie wytrzymałe i dodatkowo znacznie lżejsze materiały, jakimi są kompozyty. Jako kompozyt definiujemy materiał o niejednorodnej strukturze, złożony, z co najmniej dwóch lub więcej komponentów o zróżnicowanych właściwościach. Wypadkowa wytrzymałość materiału kompozytowego nigdy nie jest sumą lub średnią parametrów materiałów go tworzących, a zazwyczaj charakteryzuje się znacznie wyższą wytrzymałością. Jeden z komponentów stanowi zbrojenie, które w znacznej mierze determinuje wytrzymałość kompozytu na naprężenia rozciągające/ścinające, podczas gdy drugi stanowi osnowę odpowiedzialną za łączenie poszczególnych warstw zbrojenia. Należy zauważyć, że kompozyty bardzo często cechują się anizotropią właściwości – czyli różną sztywnością i wytrzymałością w zależności od kierunku ich obciążenia. Wzrost popularności kompozytów może być fakt, że w znacznej mierze wyparły one równie lekkie aluminium stosowane przy produkcji samolotów w przemyśle lotniczym

(np. w przypadku Boeinga 787 stanowią one ponad 50 % wszystkich materiałów (The New York Times)).

Na przełomie lat powstało wiele prac opisujących właściwości wytrzymałościowe kompozytów bazujących na mechanice ciała stałego, także dla modelowanego w niniejszej pracy laminatu UD S-2 Glass / SC15. W pracy (Bazle i in) przedstawiono dynamiczne testy eksperymentalne uderzenia w wykonany z tego materiału laminat. W artykule (Carpenter i in.) przedstawiono modelowanie tego materiału w mezoskali uzyskując zadowalające wyniki. Praca Key (Key) dotyczy badań i symulacji kompozytu przy dużych prędkościach uderzenia, gdzie cząstki osiągają prędkość do 2 km/s i wyznaczany jest punkt HEL (HugoniotElastic Limit). W pracy (Mazurkiewicz i in.) przedstawili sposób ochrony rur przez warstwowe obejmy poddane obciążeniu udarowemu pochodzącemu od nacisku zęba koparki. W książce (German) przedstawione zostały rozwiązania analityczne uwzględniające ortotropię właściwości kompozytów, pozwalające na określenie wytrzymałości bazując na zasadach mechaniki ośrodków ciągłych.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości modelowania kompozytów w systemie LS Dyna oraz przeprowadzenie statycznych i dynamicznych symulacji materiału UD S-2 Glass / SC15, a także walidacja modelu konstytutywnego z danymi eksperymentalnymi. Rozszerzone sformułowanie problemu znajduje się w rozdziale 2.

## 2. Sformułowanie problemu

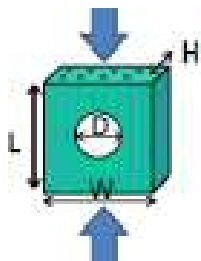
Celem pracy jest przeprowadzenie komputerowych symulacji badań materiałowych w teście statycznym i dynamicznym dla materiału UD S-2 Glass/SC15 będącego kompozytem na bazie włókna szklanego, w którym ułożenie wzmocnienia ma charakter jednokierunkowy (UD – Uni Directional). Badane w pracy kompozyty składają się z kilku warstw, zatem możemy mówić w tym przypadku o laminacie. Laminat to zbiór warstw (lamin) ułożonych jedna na drugiej i trwale połączonych ze sobą. Z reguły główne osie materiałowe poszczególnych warstw są obrócone względem siebie, jednak w przypadku materiału UD mamy laminat jednokierunkowo zbrojony włóknami. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów naprężenie-odkształcenie lub siła-przemieszczenie oraz dokonana została uproszczona walidacja zbudowanych modeli na podstawie bilansu energetycznego.

Przeprowadzone zostaną dwa testy numeryczne:

Statyczny – ściskanie elementu z otworem (karbem). Schemat próbki wraz z wymiarami przedstawiony został na (Rys. 5) **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..** Jest to test, który ma dostarczyć informacji o wpływie karbu na wytrzymałość i niszczenie próbek. Jest

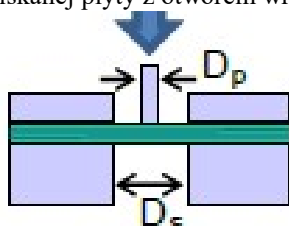
ona szeroko stosowana między innymi na rzecz przemysłu lotniczego. Do badań przyjęto kompozyt składający się z 8 warstw.

Dynamiczny – Uderzenie sztywnym bijakiem w promieniowo utwierdzoną dwudziestowarstwową płytkę z prędkością początkową 5 m/s. (Rys. 6)



Wymiary gabarytowe płyty z otworem:  
 $L = 25 \text{ mm}$   
 $W = 25 \text{ mm}$   
 $H = 8 \text{ mm}$   
 $D = 8 \text{ mm}$   
 Obciążenie przemieszczeniem  
 Ponadto każda warstwa ma grubość 1 mm.

Rys. 5. Schemat ściskanej płyty z otworem wraz z wymiarami gabarytowymi



Wymiary gabarytowe płyty:  
 $D_s = 25 \text{ mm}$   
 Stosunek  $D_s/D_p = 1.5$   
 Prędkość bijaka = 5 m/s

Rys. 6. Schemat badania dynamicznego panelu kompozytowego wraz z wymiarami gabarytowymi i warunkami utwierdzenia

### 3. Opis modelu fizycznego oraz matematycznego

- **Opis modelu konstytutywnego**

Analizowany materiał UD S-2 Glass/SC15 można zaliczyć do materiałów ortotropowych, których uogólnieniem są materiały anizotropowe. Podstawowe fizyczne równanie liniowej teorii sprężystości materiałów anizotropowych ma postać (German):

$$\sigma_{ij} = Q_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

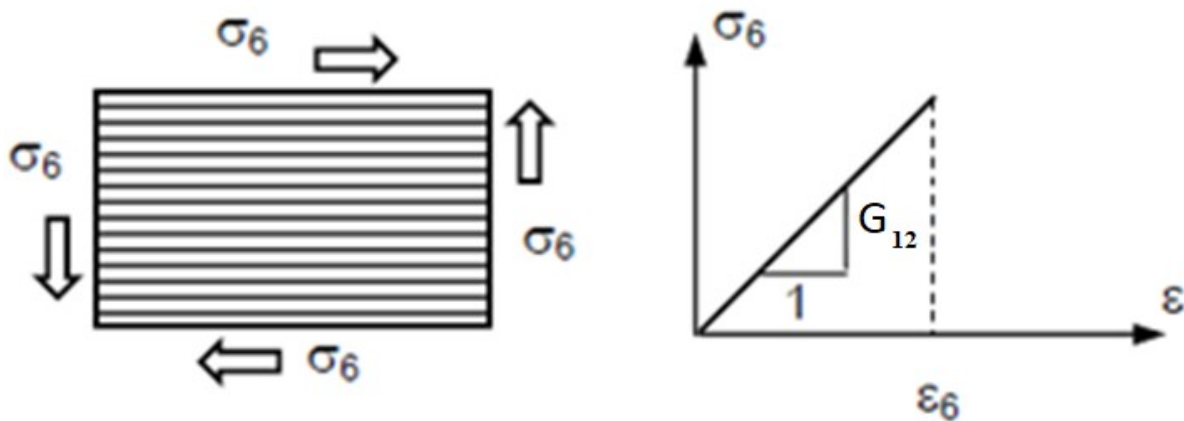
,gdzie  $\sigma_{ij}$  – składowe tensora naprężenia,  $\varepsilon_{kl}$  – składowe tensora odkształcenia,  $Q_{ijkl}$  – tensor sztywności. W przypadku materiałów ortotropowych równanie to można zapisać w postaci macierzowej jako (ponieważ występuje symetria ortotropowa) (German):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Na podstawie tego równania widać, że ortotropia jest szczególnym przypadkiem anizotropii, dla którego w głównych osiach materiałowych nie występuje sprzężenie naprężeń normalnych z odkształceniami stycznymi, naprężeń stycznych z odkształceniami normalnymi

ani też naprężeń stycznych z odkształceniami stycznymi odpowiadającymi różnym płaszczyznom(German).

W analizowanych w pracy przypadkach istotną rolę odgrywa ścinanie (determinują to wpływ działania karbu oraz kierunek uderzenia bijaka), poniżej przedstawiono schemat wyznaczania stałych inżynierskich modułu na ścinanie w płaszczyźnie ułożenia włókien:



Rys. 7. Schemat wyznaczania stałych materiałowych przy ścinaniu(German)

Bazując na schemacie przedstawionym na Rys. 7 można określić, że odkształcenia spowodowane działaniem obciążeń ścinających możemy wyznaczyć na podstawie ich wartości oraz modułu sztywności na ścinanie (tzw. Modułu Kirchhoffa) (German):

$$\varepsilon_6 = \frac{1}{G_{12}} \sigma_6 \quad (3)$$

Rozwijając macierz podatności dla materiału ortotropowego o eksperymentalnie wyznaczone parametry materiałowe przyjmuje ona postać (German).

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:  $E_1, E_2, E_3$  – to kolejno moduły sprężystości w kierunkach 1, 2 oraz 3,  $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$  – to współczynniki Poissona odpowiednio w płaszczyznach 1-2, 2-3, 1-3, natomiast  $G_{12}, G_{23}, G_{13}$  –to moduły sprężystości na ścinanie odpowiednio w płaszczyznach 1-2, 2-3, 1-

3. Jak więc widać, liczba niezależnych stałych materiałowych dla ortotropii w konfiguracji osiowej jest równa 9.

- **Opis modelu fizycznego**

W celu prawidłowego rozwiązania określonych zadań niezbędna jest świadomość sformułowań matematycznych wykorzystanych podczas rozwiązywania problemu. W tym celu niezbędne jest skorzystanie z teorii sprężystości i plastyczności. Jeżeli ciało znajduje się w równowadze to wypadkowa wszystkich sił działających na to ciało, zwana także wektorem głównym, jest równa zero. Oznacza to, że suma całek wszystkich sił powierzchniowych i objętościowych musi być równa 0. Głównym równaniem, jakie rozwiązujemy w każdym problemie mechaniki ośrodków ciągłych jest równanie równowagi ciała odkształconego, które w ujęciu lokalnym ma postać (Hallquist):

$$\sigma_{j,i,j} + p_i = 0 \quad (5)$$

gdzie  $\sigma_{j,i,j}$  oznacza dywergencję tensora naprężenia, a  $p_i$  gęstość sił objętościowych (masowych).

Ponieważ w celu rozwiązania dowolnego zagadnienia teorii sprężystości niezbędne jest wyznaczenie dla danego ciała naprężeń, odkształceń i przemieszczeń podczas gdy znamy tylko warunki obciążenia i podparcia, musimy wyznaczyć niewiadome składowe tensora stanu naprężenia, odkształcenia oraz wektora przemieszczeń. Poza przytoczonym powyżej równaniem równowagi wykorzystujemy w tym celu także:

- równanie geometryczne (Cauchy'ego)  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$
- równanie fizyczne związane z materiałem  $\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk}$

gdzie:  $\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia,  $u_{i,j}$ ,  $u_{j,i}$  – dywergencja przemieszczeń,  $\mu$ ,  $\lambda$  – stałe Lamego,  $\delta_{ij}$  – delta Kroneckera.

Możliwość znalezienia ścisłego rozwiązania problemów brzegowych ogranicza się tylko do niektórych zagadnień, w związku, z czym stosuje się dyskretyzację układów (np. metodą elementów skończonych), w celu poszukiwania niewiadomych nie, jako pól naprężeń, odkształceń i przemieszczeń, lecz jako wartości tych pól w skończonej liczbie punktów. Uwalnia to nas od problemu różniczkowego, sprowadzając rozwiązanie do układu równań algebraicznych. W przemieszczeniowej wersji MES, istotne jest to, że w przemieszczeniach węzłów zawarta jest cała informacja o zachowaniu układu (przez związki geometryczne deklarujemy w ten sposób odkształcenia, a co za tym idzie wykorzystując związki konstytutywne – naprężenia).



Podstawowym równaniem macierzowym wykorzystywanym w metodzie elementów skończonych jest:

$$[Q] = [K][q] \quad (6)$$

gdzie  $Q$  – to wektor obciążeń węzłowych,  $K$  – macierz sztywności,  $q$  – wektor przemieszczeń. W zależności od rodzaju problemu, to liniowe równanie może przyjąć charakter nieliniowy, dla którego macierz  $K$  zależy od przemieszczenia. W przypadku równania nieliniowego niezbędne jest zastosowanie metod iteracyjnych do uzyskania rozwiązania.

W analizie dynamicznej podstawowe równanie MES uzupełnione jest o dodatkowe człony reprezentujące bezwładność oraz siły tłumienia:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t), \quad (7)$$

gdzie:  $M$  – macierz mas,  $C$  – macierz tłumienia,  $K$  – macierz sztywności,  $\ddot{q}(t)$  – wektor przyspieszenia,  $\dot{q}(t)$  – wektor prędkości,  $q(t)$  – wektor przemieszczenia,  $F(t)$  – wektor sił zewnętrznych. W powyższym równaniu wektory przemieszczenia, prędkości oraz przyspieszenia są zależne od czasu.

#### 4. Prezentacja modeli numerycznych

W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych wykorzystano pakiet LS Dyna, pozwalający na przeprowadzenie zarówno analiz statycznych i dynamicznych. Modelowanie kompozytu w podanym pakiecie odbywa się za pomocą doboru odpowiedniego modelu konstytutywnego. W przypadku wskazanego software'u jest to MAT\_58\_LAMINATED\_COMPOSITE\_FABRIC (Halquist), który służy do odwzorowywania laminatów włóknistych.

Modelowanie materiału wymaga wyznaczenia

Tabela 1. Właściwości mechaniczne badanego materiału UD S-2 Glass/SC15 (Xiao i in.)

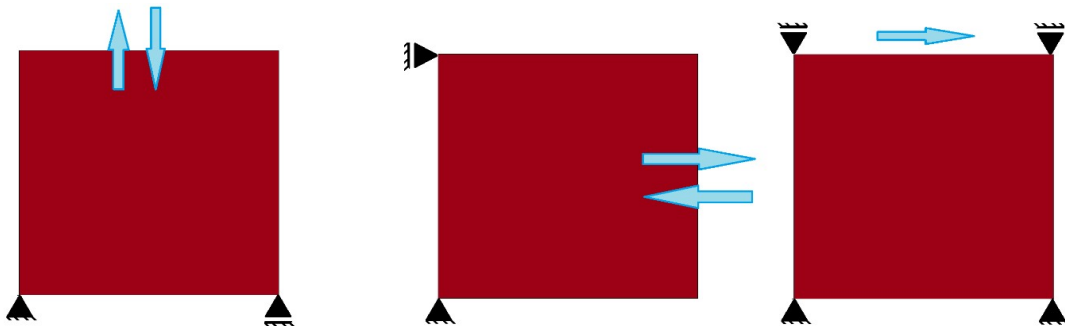
Parametr	Symbol, jednostki	UD S-2 Glass/SC15
Moduł Younga	E1, GPa	64
Moduł Younga	E2, GPa	11.8
Moduł Younga	E3, GPa	11.8
Wsp. Poissona	v21	0.0535
Wsp. Poissona	v31	0.0535
Wsp. Poissona	v32	0.449
Moduł Kirchhoffa	G12, GPa	4.3
Moduł Kirchhoffa	G23, GPa	3.7
Moduł Kirchhoffa	G31, GPa	4.3
Wytrzymałość na rozciąganie	X1T, MPa	1380
Wytrzymałość na ściskanie	X1C, MPa	770
Wytrzymałość na rozciąganie	X2T, MPa	47
Wytrzymałość na ściskanie	X2C, MPa	137
Wytrzymałość na rozciąganie	X3T, MPa	47
Wytrzymałość na ścinanie	S12, MPa	76
Wytrzymałość na ścinanie	S23, MPa	38

Wytrzymałość na ścinanie	S31, MPa	76
Gęstość	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	1.2

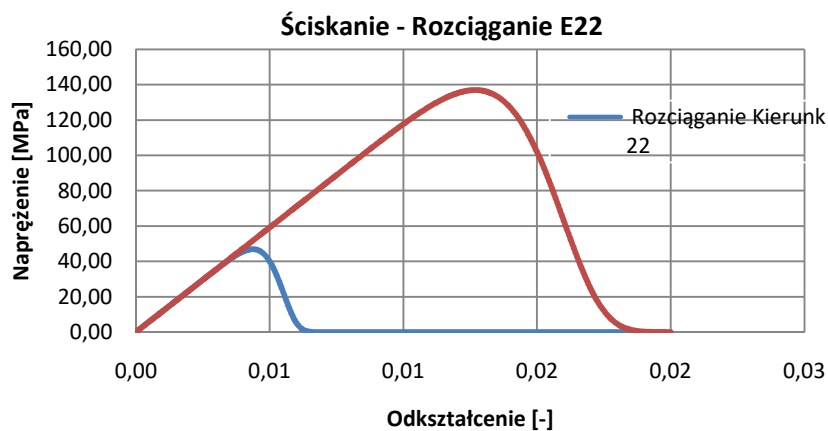
Ponadto niezwykle istotne w przypadku

W celu zdefiniowania grubości kompozytu zastosowano kartę PART\_COMPOSITE (Halquist). Jej działanie pozwala na określenie dla każdego punktu całkowania względem grubości elementu powłokowego osobnej warstwy materiału zdefiniowanej pod określonym kątem i posiadającej określoną grubość. Ponadto istnieje możliwość wyboru teorii wytrzymałościowej opisującej cały komponent i stan naprężenia panujący w nim.

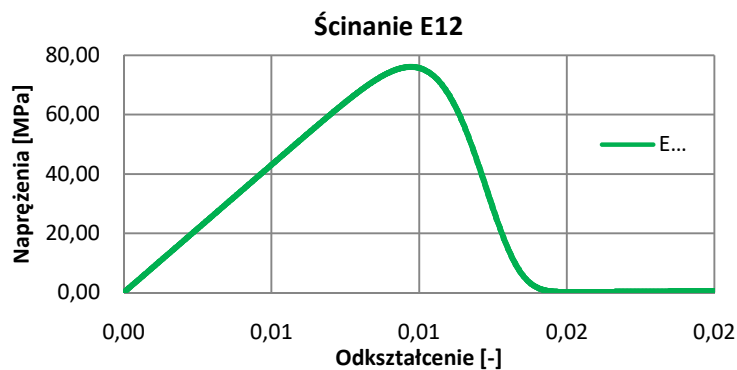
Podstawowym testem walidacyjnym są badania



Rys. 8. Warunki brzegowe i schemat obciążenia w Na podstawie przeprowadzonych symulacji

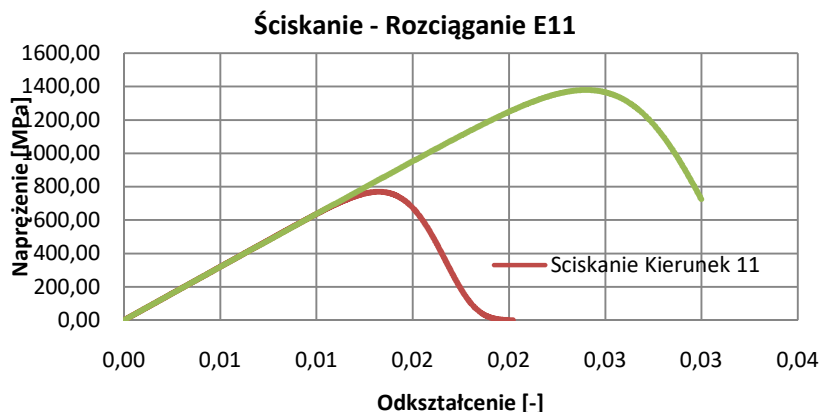


$$E_{22} = \frac{35,3192}{0,0029985} = 11800 \text{ MPa} = 11,8 \text{ GPa}$$

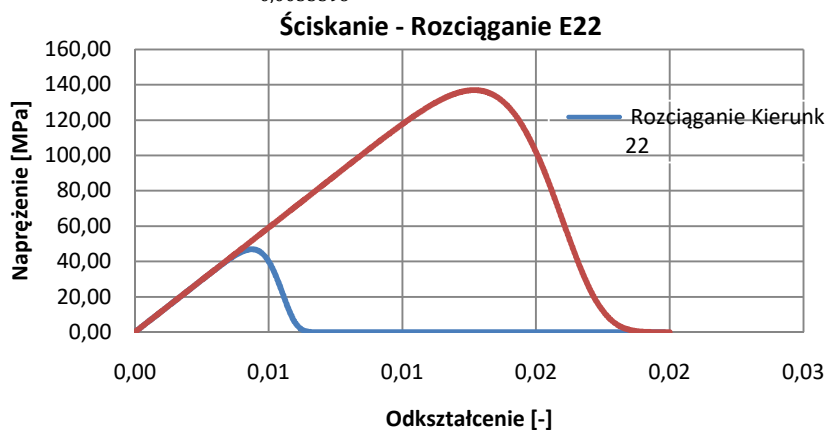


$$G_{12} = \frac{\sigma_6}{\varepsilon_6} = \frac{\tau_{12}}{2\varepsilon_{12}} = \frac{60,7547}{2 \cdot 0,007087} = 4300 \text{ MPa}$$

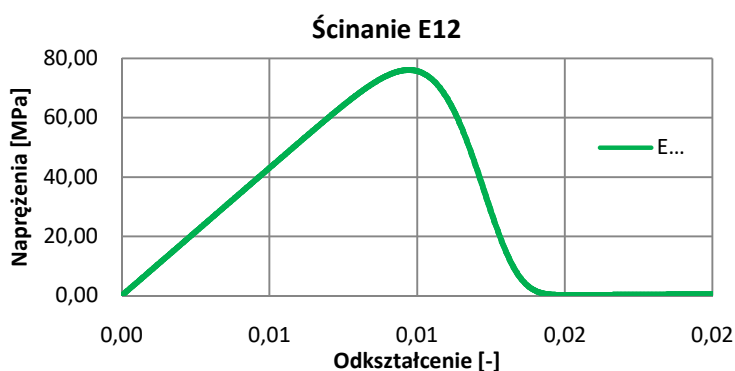
Rys. 9) można zaobserwować, że maksymalne wartości naprężenia dla poszczególnych prób są zgodne z wartościami eksperymentalnymi.



$$E_{11} = \frac{341,729}{0,0053396} = 63999,99 \text{ MPa} \approx 64 \text{ GPa}$$



$$E_{22} = \frac{35,3192}{0,0029985} = 11800 \text{ MPa} = 11,8 \text{ GPa}$$



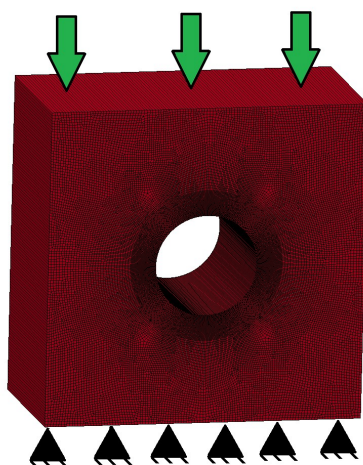
$$G_{12} = \frac{\sigma_6}{\varepsilon_6} = \frac{\tau_{12}}{2\varepsilon_{12}} = \frac{60,7547}{2 \cdot 0,007087} = 4300 \text{ MPa}$$

Rys. 9. Wykresy naprężenie - odkształcenie dla badań pojedynczego elementu

Ponadto wykresy te pozwoliły określić odkształcenia niszczące dla każdego wariantu obciążenia, które wykorzystane zostaną w opisie testu dynamicznego. Zweryfikowane zostały

także parametry określające sztywność materiału: Moduł Younga w każdym z kierunków oraz moduł Kirchhoffa (obliczony z zależności prawidłowych dla materiałów ortotropowych).

W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych płyty z otworem przygotowano model dyskretny składający się z 16200 czterowęzłowych elementów powłokowych. Model przygotowano w środowisku Hyper Mesh. Na Rys. 10 przedstawiono rzut izometryczny modelu z nałożonymi warunkami początkowo - brzegowymi. Model zorientowano zgodnie ze schematem tak, by obciążenie działało w kierunku ściskania włókien. Ponownie ze względu na charakter zjawiska wykorzystano iteracyjną procedurę rozwiązania równania MES (6). Dodatkowo ze względu na zastosowanie elementów powłokowych odebrana została wszystkim węzłom możliwość ruchu w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płyty.

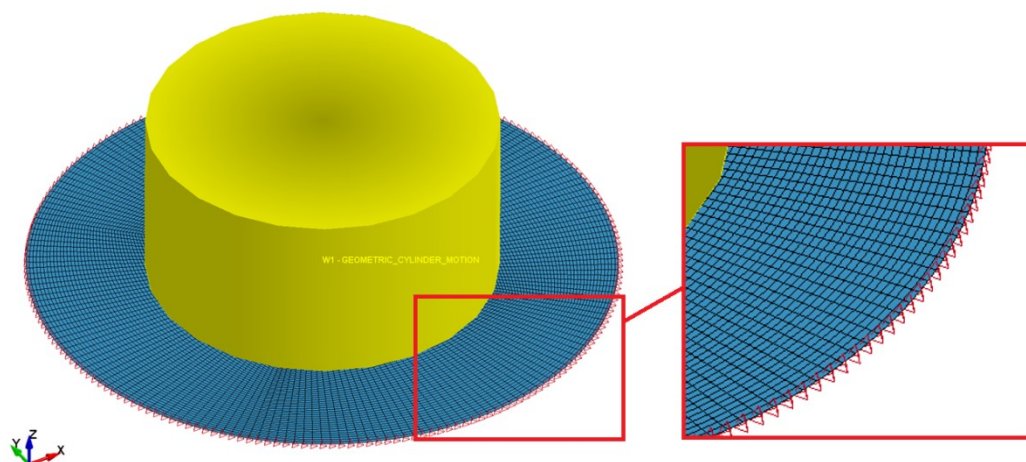


Rys. 10. Model dyskretny płyty z otworem z nałożonymi warunkami początkowo - brzegowymi – wyświetlenie grubości

Kolejną przeprowadzoną symulacją jest badanie uderzenia bijakiem w okrągły panel o średnicy 100 mm wykonany z analizowanego kompozytu. Model dyskretny składa się z 12300 elementów powłokowych. Ponownie w celu zdefiniowania kompozytu zastosowano PART\_COMPOSITE. Włókna ułożone są zgodnie ze zwrotem osi Y. Wymuszenie realizowane było za pomocą ciała sztywnego RIGIDWALL\_MOVING\_CYLINDER, które pozwala na zdefiniowanie walca o określonej średnicy i wysokości. Karta ta dodatkowo implementuje algorytm kontaktowy funkcji kary do modelu (Hallquist). Współczynnik tarcia pomiędzy bijakiem a panelem określono, jako  $\mu=0,2$ . Płyta zgodnie ze schematem eksperymentu utwierdzona została na krawędziach poprzez odebranie jej wszystkich translacyjnych i rotacyjnych stopni swobody.

W realizowanym teście tym istotną rolę pełni zniszczenie analizowanego kompozytu, wyznaczone w symulacjach z zastosowaniem jednego elementu odkształcenia niszczące zostały wprowadzone do modelu konstytutywnego (Tab. 2). Ponieważ zadanie rozwiązane zostało za pomocą jawnego schematu całkowania (równanie 7), umożliwiło to zastosowanie

erozji doraźnej, czyli usuwania elementów, które uległy zniszczeniu na podstawie warunków wytrzymałościowych.

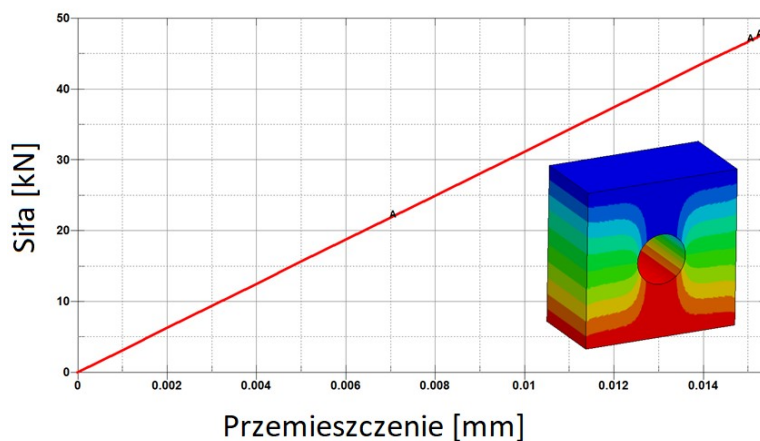


Rys. 11. Model dyskretny panelu poddanego obciążeniu bijakiem

## 5. Opracowanie wyników

Rozdział ten poświęcony został omówieniu wyników uzyskanych w symulacjach numerycznych opisanych w rozdziale 4.

Na podstawie symulacji otrzymano wyniki ściskania płyty z otworem. W efekcie uzyskano wykres siły w funkcji przemieszczenia zaprezentowany na Rys. 12. Jak widać wykres ma charakter liniowy a maksymalna siła wynosi 47900 N przy przemieszczeniu 0,0154 mm. Wykres kończy się w tym miejscu z powodu zniszczenia kompozytu w okolicach otworu, co nie pozwoliło na uzyskanie zbieżności rozwiązania a w efekcie zakończyło analizę. W Tab. 2 przedstawiono warunki wytrzymałościowe materiału oraz wartości naprężeń uzyskane z analizy numerycznej. Jak widać zniszczenie nastąpiło na skutek ścinania w płaszczyźnie (1-2) po przekroczeniu 76 MPa. Pozostałe warunki zostały zachowane. Na podstawie analiz można stwierdzić, że otwór wprowadził korb geometryczny powodujący spiętrzenia naprężenia na jego krawędziach.

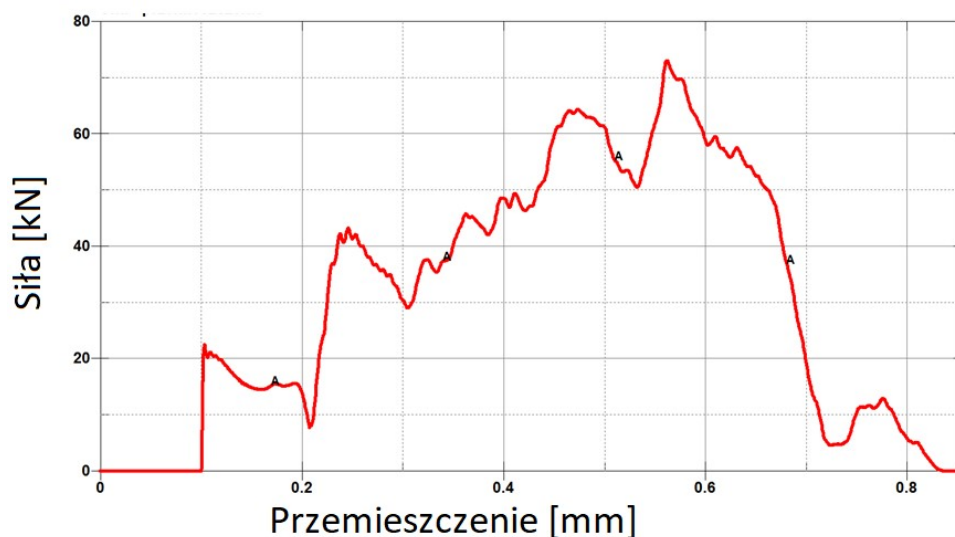


Rys. 12. Wykres siła – przemieszczenie płyty z otworem

Tab. 2. Opis warunków wytrzymałościowych wraz z wartościami uzyskanymi z analizy. Czerwonym kolorem oznaczono warunek zniszczenia kończący symulację

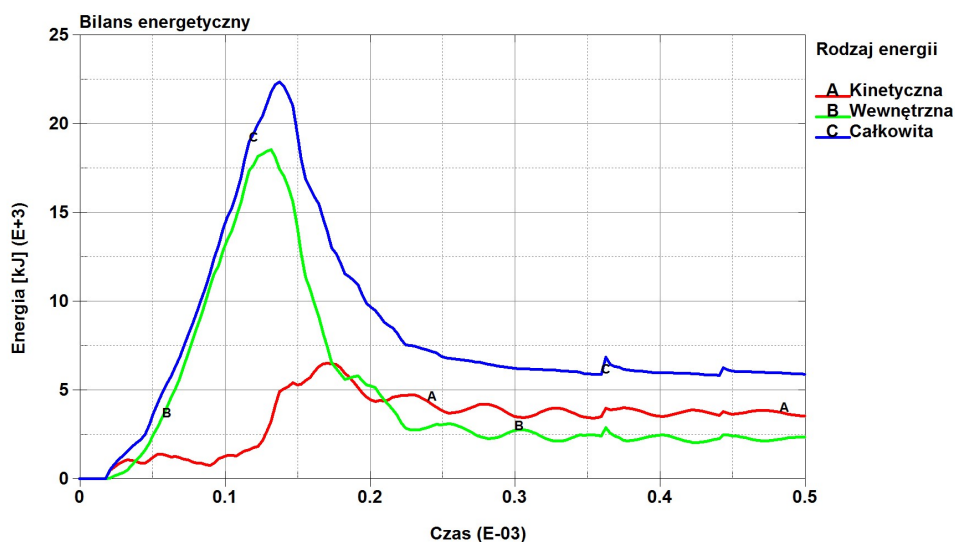
Warunek wytrzymałościowy	Naprężenie dopuszczalne [MPa]	Naprężenie uzyskane z symulacji [MPa]
Wytrzymałość na rozciąganie E11	1380	2,78
Wytrzymałość na ściskanie E11	770	603
Wytrzymałość na rozciąganie E22	47	32,4
Wytrzymałość na ściskanie E22	137	39,5
Wytrzymałość na ścinanie E12	76	76

Na podstawie przeprowadzonych symulacji dynamicznych uderzenia bijaka w kompozytową płytę otrzymano wykres siła – przemieszczenie działające na ciało sztywne w regionie kontaktu z płytą kompozytową. Na wykresie widać wyraźnie momenty, w których elementy panelu ulegały erozji, co objawiało się spadkiem sił działających w układzie. Maksymalna siła, jaką jest w stanie wytrzymać płyta wyniosła ok 73 000 N, po czym nastąpił jej spadek do zera – wewnętrzna część panelu oderwała się od utwierdzenia. Przemieszczenie bijaka jakie potrzebne było do zniszczenia panelu wyniosło ok 0,8 mm.



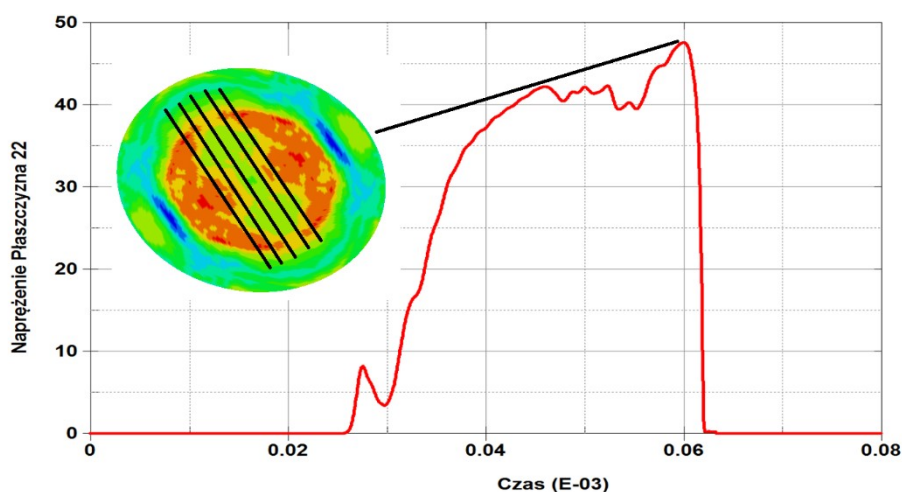
Rys. 13. Wykres siła kontaktowa - przemieszczenie bijaka

Dodatkowej weryfikacji poprawności modelu dokonano na podstawie bilansu energetycznego Rys. 14. Jak widać, wraz z upływem czasu rosła energia wewnętrzna odkształcenia, przy jednoczesnym wzroście energii kinetycznej – wynika ona z ruchu elementów pod wpływem uderzenia z dużą szybkością. Energia całkowita jest równa sumie wszystkich energii, przy czym energia Hourglass została ograniczona do minimum i nie ma wpływu na wyniki analizy.



Rys. 14. Bilans energetyczny testu z bijakiem

Na Rys. 15 zaznaczono wykres naprężenia w osi X dla elementu znajdującego się na krawędzi utwierdzenia płyty. Jak widać, uległ on erozji dla czasu 0,00006 s z warunku przekroczenia naprężenia rozciągającego w osi X.



Rys. 15. Naprężenie Rozciągające w osi X (czarne linie wskazują ułożenie włókien czyli oś Y)

## 6. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych symulacji dowiedziono, że wykorzystanie modelu konstytutywnego materiału MAT\_58 w systemie LS-Dyna umożliwia z dużą dokładnością modelować komponenty wykonane z laminatów jednokierunkowych. Model materiałowy udało się z dużą zgodnością skorelować wynikami badań eksperymentalnych. Udało się także odwzorować proces niszczenia płyty kompozytowej poddanej dynamicznym obciążeniom. Okazało się, że MAT\_58 umożliwia modelowanie w pojedynczym elemencie zachowania po zniszczeniu, co przejawia się spadkiem sztywności aż do zera. Na podstawie testów stwierdzono, że płytka z otworem o wymiarach 25x25x13 mm jest w stanie przenieść siłę

47 000 N bez zniszczenia. W przypadku testu dynamicznego maksymalna siła wyniosła ok 73 000 N.

## **7. Literatura**

Haque, B., Harrington, J., Gillespie, J., 2012, "Multi-hit ballistic impact on S-2 glass/SC15 thick-section composites: experiments", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 47, 7

Carpenter, A., Chocron, S., Anderson, C., 2016, "Mesoscale modeling of S-2 Glass/SC-15 epoxy composites: 3D-weave architecture", *Journal of Composite Materials*, 50, 24, pp. 3231-3443,

Key, C., 2017, "Dynamic Shock Response of an S2 Glass/SC15 Epoxy Woven Fabric Composite Material System", *Engineering Solutions Through Science, APS-SCCM Meeting*, Czerwiec 9-14.2017, Materiały konferencyjne,

German, J., 1996, "Podstawy Mechaniki Kompozytów Włóknistych", Kraków, Skrypt dla studentów szkół wyższych,

Halquist, J., 2017, "LS-DYNA theory manual", Livermore Software Technology Corporation  
The New York Times, The Jump to a Composite Plane,  
<https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/interactive/2013/07/29/business/The-Jump-to-a-Composite-Plane.html>.,

Xiao, J., Gama, B., Gillespie, J., 2007, "Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading", *Composite Structures*, 78, 182-196,

Mazurkiewicz, Ł, Małachowski, J., Tomaszewski, M., Baranowski, P., Yurkymets, P., 2017, „Performance of steel pipe reinforced with composite sleeve”. *Composite Structures*, 183, pp. 199-211,



# Przegląd możliwości z zakresu modelowania materiałów skalnych

Michał Kucewicz <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Warszawa

Michał Kucewicz: [michal.kucewicz@wat.edu.pl](mailto:michal.kucewicz@wat.edu.pl)

## Streszczenie

W pracy przedstawiona została problematyka modelowania materiałów skalnych z wykorzystaniem nowoczesnych metod komputerowych. Poruszone zostały główne aspekty modelowania: dobór odpowiedniego modelu konstytutywnego odwzorowującego właściwości mechaniczne skał oraz metody obliczeniowej odpowiedzialnej za rozwiązanie równań równowagi w celu określenia przemieszczenia oraz naprężenia w modelowanym materiale skalnym. W pracy skupiono się na dwóch metodach: Metodzie Elementów Skończonych (MES) oraz Metodzie Cząstek Hydrodynamicznych (SPH). Praca ma charakter przeglądowy i zawiera w sobie najważniejsze pozycje literaturowe obejmujące badany obszar wiedzy.

**Słowa kluczowe:** MES, skały, modelowanie, SPH,

## Comparison of Rock Modelling methods

### Summary

The paper covers the problem of modeling rock materials with the use of modern numerical methods. The main aspects of modeling were discussed: selection of an appropriate constitutive model that represents the mechanical properties of rocks and a modelling method responsible for solving equilibrium equations to determine the displacement and stress in the modeled rocks. This paper focus on two most popular methods: Finite Element Method (FEM) and Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Also the different constitutive models binding relationship between stress and strain were described and discussed. This paper consists the most important literature papers from the selected field of science.

**Keywords:** rock, modeling, fracture, constitutive model

### 1. Wstęp

Dynamiczny rozwój metod komputerowych doprowadził do ich szerokiego wykorzystania w wielu dziedzinach przemysłu w tym z uwzględnieniem przemysłu górniczego. W przypadku wydobywania rud materiałów takich jak np. miedź, zawartych w skałach o dużej wytrzymałości, podstawową metodą urabiania skały jest metoda strzałowa, polegająca na nawiercaniu otworów włomowych, umieszczeniu w nich ładunków wybuchowych oraz ich detonacji. W przypadku skał miękkich jak np. węgiel używa się tzw. kombajnów górniczych, urabiających skałę w sposób mechaniczny poprzez kruszenie. Opracowanie metody przewidywania zachowania skał poddanych opisanym sposobom urabiania stanowi duże wyzwanie dla współczesnych metod obliczeniowych, jednak zaletą opracowania go może być optymalizacja wskazanych sposobów pod kątem oszczędności pieniędzy np. poprzez zmniejszenie wykorzystania ilości ładunków wybuchowych. Podstawowe trudności związane z modelowaniem skał wynikają przede wszystkim z ich właściwości takich jak:

- nieregularna struktura wewnętrzna związana ze sposobem powstawania,

- występowanie w strukturze wewnętrznej porów, spękań,
- anizotropia właściwości – czyli duży wpływ kierunkowości na wytrzymałość mechaniczną skały,
- duża kruchość i praktycznie brak zakresu plastycznego podczas deformacji,
- duża różnorodność właściwości mechanicznych nawet w obrębie pojedynczego rodzaju skał,
- zmiana wytrzymałości skał na skutek zwiększenia szybkości odkształcenia – czyli wprowadzenia efektów dynamicznych.

Poniższa praca ma charakter przeglądu, mający na celu przedstawienie znanych z literatury podejść do modelowania komputerowego materiałów skalnych z wykorzystaniem metod numerycznych. Problem został podjęty przez wiele wiodących ośrodków obliczeniowych w Polsce i na Świecie. Spośród zaprezentowanych metod wybrana zostanie jedna, zdaniem autorów najlepsza metoda, która w kolejnych pracach zaimplementowana zostanie do modelowania Dolomitu w warunkach obciążeń dynamicznych związanych z detonacją ładunków wybuchowych wewnątrz skały.

## 2. Przegląd metod modelowania skał

W rozdziale tym przedstawione zostaną sposoby modelowania materiałów skalnych z wykorzystaniem systemów obliczeniowych bazujących w głównej mierze na Metodzie Elementów Skończonych, głównie z wykorzystaniem systemu LS Dyna.

Pojęcie modelowania może być rozumiane bardzo szeroko, głównie ze względu na to, że modelowanie numeryczne uwzględnia: dobór odpowiedniego modelu konstytutywnego, dokładności odwzorowania analizowanej geometrii, zastosowania odpowiednich warunków brzegowych zgodnych z tymi z badań eksperymentalnych itp. Głównym celem modelowania jest uzyskanie działającego, wiarygodnego modelu numerycznego, odzwierciedlającego poprawnie mechanikę zjawisk zachodzących podczas przykładania obciążeń zewnętrznych w postaci np. grawitacji, obciążenia siłami skupionymi lub impulsem ciśnienia pochodzącego od detonacji ładunku wybuchowego do modelowanego medium.

### • Dobór modelu Konstytutywnego

Model konstytutywny jest podstawowym równaniem opisującym zależność odkształcenia i naprężenia w materiale. Z punktu widzenia matematycznego jest on tensorem 4 rzędu z 81 składowymi, w którym naprężenia są opisane równaniem (1) (Piechnik).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (1)$$

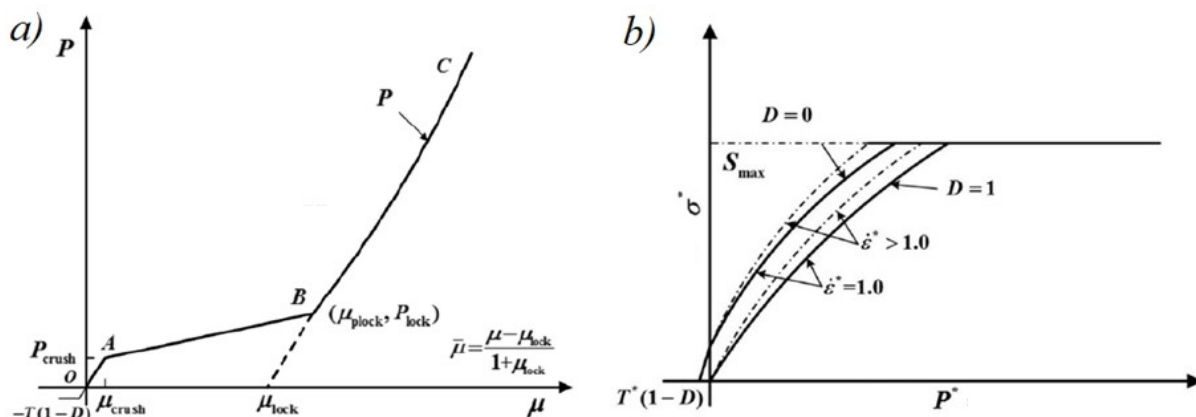
gdzie:  $C_{ijkl}$  – tensor sztywności,  $\varepsilon_{kl}$  – tensor odkształcenia. Jak wspomniano we wstępie, skały ze względu na swoją budowę cechują się właściwościami anizotropowymi.

Uwzględnienie tego w modelu konstytutywnym prowadzi do dużych komplikacji w wyznaczeniu parametrów materiałowych, dlatego wiele z podejść do modelowania pomija ten aspekt, bazując na modelach izotropowych, w których właściwości materiału nie zależą od kierunku obciążenia. Takie podejście redukuje tym samym liczbę niewiadomych tensora do 6. Za powszechne uważa się stosowanie materiałów przeznaczonych do symulacji betonów w aspekcie modelowania skał.

Jednym z najszerzej stosowanych modeli konstytutywnych jest Johnson Holmquist Concrete (Holmquist i in.), z założenia przeznaczony do modelowania betonów w zakresie dużych szybkości odkształcenia, znacznych deformacji oraz przy uwzględnieniu zjawisk falowych w materiale. Model ten wiąże zależność pomiędzy naprężeniem a ciśnieniem hydrostatycznym równaniem (2) (Holmquist i in.).

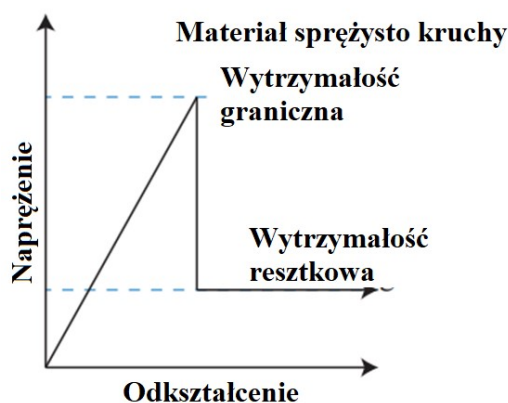
$$\sigma_{eq} = f_c' \left[ A(1-D) + B \left( \frac{p}{f_c'} \right)^N \right] \left[ 1 - C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie:  $f_c'$  – wytrzymałość graniczna materiału poddanego jednoosiowemu ścisłaniu,  $A$  – spójność nienaruszonego materiału,  $D$  – parametr zniszczenia, odpowiadający za skalowanie spójności materiału,  $B, C, N$  – współczynniki numeryczne pozwalające na korelację modelu do przeprowadzonych eksperymentów,  $p$  – ciśnienie wewnętrzne w materiale wywołane obciążeniem zewnętrznym (jest to część hydrostatyczna aksjatora tensora naprężenia) [Jaeger i in.],  $\dot{\epsilon}$  – aktualna szybkość odkształcenia materiału,  $\dot{\epsilon}_0$  – referencyjna szybkość odkształcenia przyjęta, jako 1/s. Na Rys. 16 przedstawiono zależności ciśnienia od odkształceń objętościowych oraz naprężenia. Na jego podstawie (a) można zaobserwować, że ścisłanie skał dzieli się na trzy etapy: zakres sprężysty OA, zamknięcie wszelkich porów w materiale AB oraz ścisłanie w pełni zagęszczonego materiału BC. Dodatkowo na (b) widać, że wraz ze wzrostem zniszczenia  $0 < D < 1$ , gdzie 1 oznacza materiał w pełni zniszczony. Następuje jego osłabienie i spadek naprężenia. Ponadto w stanie zniszczonym materiał nie przenosi naprężeń normalnych ze względu na to, że w tym momencie znajduje się w postaci zupełnie skruszonej. Model JHC został z sukcesem zaimplementowany w wielu pracach, związanych głównie z przebicciem lub kruszeniem materiałów skalnych, przedstawionych w dalszej części tego opracowania



Rys. 16. Zależność ciśnienia od odkształceń objętościowych (określająca równanie stanu) (a) oraz zależność ciśnienia od naprężenia powstałego w materiale (Holmquist i in.)

Drugim z modeli, dużo bardziej uproszczonym, i nie rozróżniającym stanu obciążenia wynikającego ze ściskania i rozciągania jest materiał izotropowy sprężysto kruchy (Smed i in. 2012). Możliwość zastosowania takiego materiału wynika z kruchości skał – a co za tym idzie brakiem uplastycznienia. Charakterystykę naprężenie – odkształcenie w formie graficznej zaprezentowano na Rys. 17. Podobnie jak w przypadku poprzedniego modelu JHC, także tutaj po osiągnięciu granicznej wytrzymałości następuje spadek sztywności, jednak nie do wartości zerowej, ze względu na to, że zniszczona skała zachowuje część wytrzymałości na ściskanie.



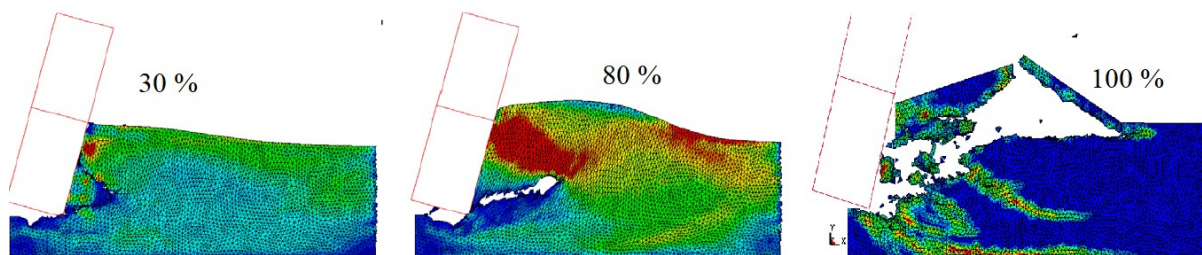
Rys. 17. Zależność naprężenie – odkształcenie dla materiału sprężysto kruchego (Smed i in. 2012)

Trzecim znaczącym w literaturze modelem jest model Karagozian and Case Concrete (KCC) (Malvar i in.), którego główną zaletą jest możliwość automatycznego generowania parametrów wytrzymałościowych, jedynie na podstawie wytrzymałości materiału na jednoosiowe ściskanie. Model ten podobnie jak poprzedni jest materiałem izotropowym, sprężysto plastycznym. Wspomniany model KCC posiada zaimplementowane trzy analogiczne jak dla modelu JHC płaszczyzny zniszczenia, które powodują osłabienie materiału na skutek progresywnego niszczenia. Model ten rozróżnia wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, co zwiększa możliwość implementacji do problemów obejmujących złożony stan obciążenia, jakim są np. wybuchy w górotworze.

- **Dobór metody odwzorowania skały**

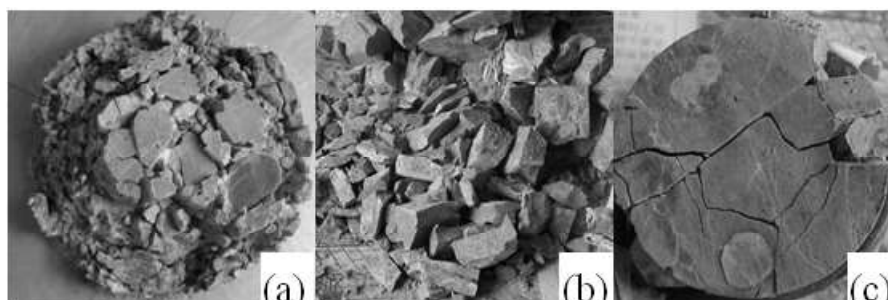
Drugim z najważniejszych wyborów jest określenie metody wykorzystanej do prowadzenia obliczeń (rozwiązywania układu równań równowagi), z których najszerszej stosuje się Metodę Elementów Skończonych (ang. FEM) oraz Metodę Elementów Dyskretnych (ang. DEM). Pierwsza z nich bazuje na podziale ośrodka ciągłego na elementy skończone, a rozwiązanie zadania polega na znalezieniu pola przemieszczenia, odkształcenia a także naprężenia dla każdego z elementów. Do głównych zalet tej metody należy zaliczyć łatwość przygotowania modelu oraz możliwość stosowania różnych technik odwzorowania modelowanego ośrodka. Metoda ta współpracuje z domenami opisanymi we współrzędnych Lagrange’a, Eulera oraz ze sprzężeniem obu wspomnianych metod (tzw. ALE). Wiele prac odnośnie modelowania skał korzysta z MES. Część z nich została przytoczona poniżej.

W pierwszej pracy (Jaime 2011) odwzorowywano proces cięcia (skrawania) granitu za pomocą nieodkształcalnego narzędzia, porównując ze sobą wyniki numeryczne oraz eksperymentalne. W pierwszym etapie porównane zostały różne sposoby odwzorowania geometrii – począwszy od rodzaju elementów: o kształcie prostokątnym (HEX) oraz ostrosłupa o podstawie trójkąta (TETRA). Głównym kryterium porównawczym był pomiar sił kontaktowych, które oddziaływały na głowicę tnącą. Wyniki obliczeń wykazały, że nieregularnie ułożone elementy trójkątne w znacznie lepszy sposób odwzorowują propagację pęknięć, ze względu na to, że ścieżka rozwoju pęknięcia nie jest zdeterminowana przez regularne ułożenie węzłów tworzące linię najmniejszych energii pęknięcia. Drugim z kluczowych badań był wpływ modelu konstytutywnego a co za tym idzie maksymalnych odkształceń, jakie mogą powstać w materiale, a po których przekroczeniu nastąpi erozja numeryczna. Polega ona na usunięciu zniszczonego elementu z macierzy sztywności rozwiązania. Porównano ze sobą dwa materiały: Bardzo złożony model RHT (Riedel-Hiermaier -Thoma) oraz KCC (opisany powyżej). Badaniom numerycznym poddano zakres odkształceń 30 – 100%. Na rysunku 3 przedstawione zostały wybrane mapy zniszczenia powstałego w granicie. W przypadku najniższej wartości odkształceń niszczące pęknięcie miało charakter lokalny w pobliżu powierzchni czołowej narzędzia roboczego, podczas gdy dla wartości maksymalnej pęknięcie wygenerowało się na znacznie większej długości próbki, zbliżając się do rozwiązania eksperymentalnego.



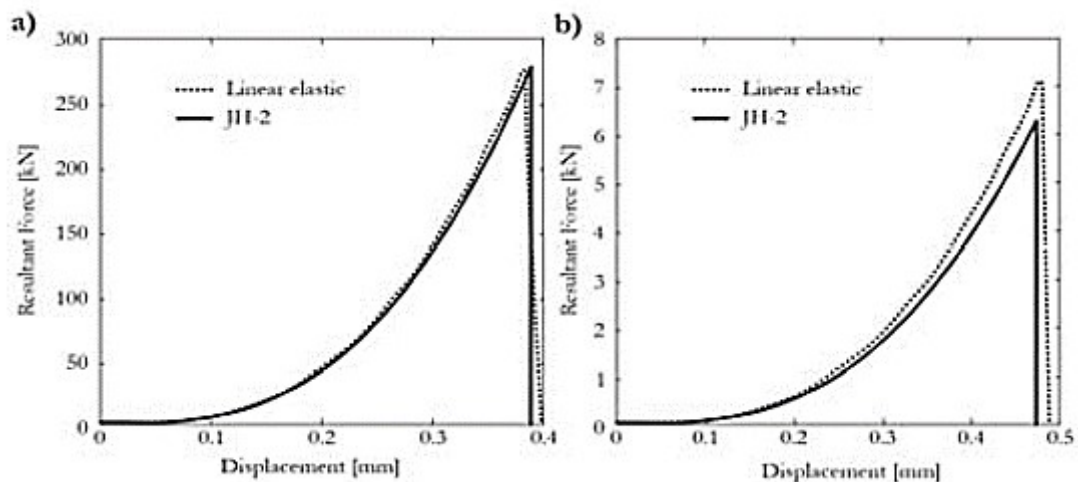
Rys. 18. Porównanie deformacji dla różnych wartości odkształceń niszczących dla dwóch modeli materiałowych: 30% oraz 80 % w przypadku modelu

Kolejna praca (Gao i in.) dotyczy badań właściwości mechanicznych skał poddanych uderzeniom z wysoką energią. W przypadku tego zagadnienia decydującą rolę odgrywały efekty falowe. W badaniach wykorzystany został test płyta – płyta, który pozwala generować prędkość liniową cząstek materiału do poziomu kilkunastu km/s, pozwalając materiałowi na osiągnięcie punktu granicznego Hugoniota – momentu, w którym ciało stałe zaczyna zachowywać się jak ciecz (traci znaczną część wytrzymałości na ścinanie). Główną zaletą tego testu jest możliwość wyznaczenia równania stanu (EOS) determinującego zachowanie modelu materiałowego Johnson Holmquist Ceramics (Holmquist i in., Holmquist) w zakresie bardzo dużych szybkości odkształcenia. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowana Metoda Elementów Skończonych pozwala na efektywne modelowanie opisanego zjawiska. Ponadto zauważono, że efekty dyspersji fali naprężenia są związane z lepkością oraz mikrostrukturą materiału, która jak wspomniano we wstępie nie jest jednorodna. Dodatkowo skała poddana oddziaływaniu impulsowemu charakteryzuje się trzema odmiennymi stanami niszczenia – czołowe niszczenie to skutek kruszenia się materiału – Rys 4. (a), niszczenie części środkowej następuje na skutek oddziaływania fali rozciągająco – ściskającej a ilość zniszczenia zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości) – Rys. 4 (b) oraz zniszczenie tylnej części próbki, w której propaguje się duża ilość pęknięć – Rys. 4 (c). Głównym kryterium porównawczym były charakterystyki naprężenie – czas, przedstawiające dużą zgodność badań eksperymentalnych i numerycznych przy porównaniu różnych średnic próbek.



Rys. 19. Sposoby niszczenia próbek skalnych na skutek oddziaływania uderzenia z dużą energią (Gao i in.)

W kolejnej pracy (Baranowski i in.) przeprowadzili porównanie modelowania numerycznego skał z wykorzystaniem dwóch modeli konstytutywnych: modelu Johnson Holmquist Ceramics (Holmquist i in.) oraz przedstawionego wcześniej uproszczonego modelu sprężysto kruchego w przypadku badania jednoosiowego ściskania oraz trójpunktowego zginania próbek z granitu. Uzyskane w ten sposób charakterystyki siła – przemieszczenie wykazały duże podobieństwo pomiędzy złożonym i uproszczonym modelem konstytutywnym, co świadczy, że w przypadku badań statycznych wprowadzenie uproszczonego modelu materiałowego nie wpływa na jakość rozwiązania.

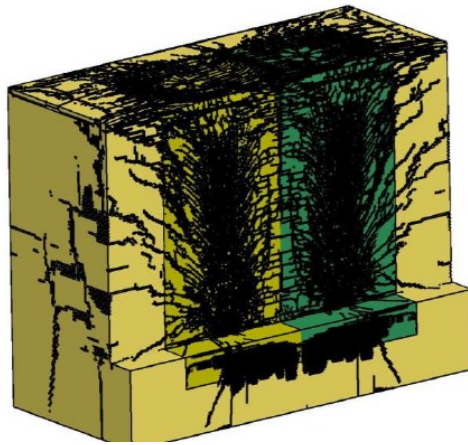


Rys. 20 Porównanie wykresów siła – przemieszczenie w przypadku jednoosiowego ściskania oraz trójpunktowego zginania (Baranowski i in.)

Kolejna praca (Wang i in.) poświęcona została wyznaczeniu parametrów modelu konstytutywnego JH Ceramics dla granitu w sposób analityczny, bazując na teorii rozchodzenia się fal w ośrodkach sprężystych. Zaletą zastosowania tej metody jest brak konieczności przeprowadzania wielu czasochłonnych i kosztownych eksperymentów. Oszacowane w ten sposób parametry wytrzymałościowe posłużyły do walidacji modelu konstytutywnego na bazie testów mikro wybuchów przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych, a następnie do numerycznych testów przeprowadzonych w wyrobiskach podziemnych. Ponadto autorzy przedstawili wpływ zastosowania opóźnienia w detonacjach ładunków wybuchowych w ścianie podziemnego tunelu na ogólny profil zniszczenia a także profil prędkości cząstek skały napędzonej przez detonację, uwzględniając przy tym warstwową budowę górotworu cechującą się zmiennymi właściwościami.

W pracy (Sjoberg i in.) zajęli się problemem detonacji ładunków wybuchowych w próbkach betonowych, przeprowadzając serię badań eksperymentalnych oraz numerycznych badając w ten sposób propagację pęknięć w materiale znajdującym się pomiędzy otworami włomowymi, w których umieszczone zostały ładunki wybuchowe.

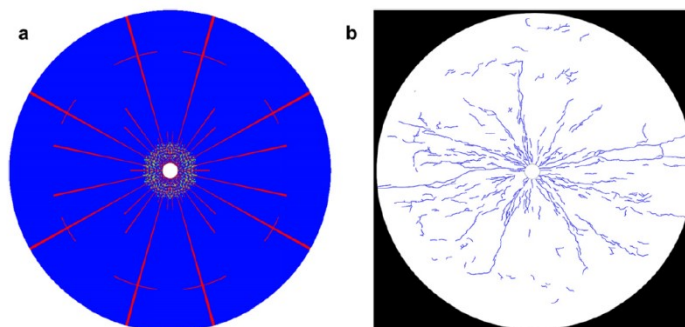
W swojej pracy panowie wykorzystali sprzężenie ósrodków gazowego (Eulera) oraz stałego (Lagrange'a). Pozwoliło to na dokładne odwzorowanie zachowania produktów detonacji wewnątrz otworów, a także określenie ciśnienia, jakie oddziaływało na otaczający je materiał. Zbadany został także wpływ wielkości elementu dyskretnego na dokładność rozwiązania, a także zaproponowano metodę pozwalającą na szacowanie ilości urobku z wykorzystaniem post procesora LS-Prepost. Zgodnie z oczekiwaniami stwierdzono, że największy wpływ na przebieg pęknięć ma ilość ładunków wybuchowych oraz rozmieszczenie otworów. Największych zniszczeń dokonało wprowadzenie opóźnienia o wartości pozwalającej na przejście fali naprężenia przez kolejne otwory strzałowe, jeszcze przed ich detonacją. Równoczesne odpalenie ładunków wybuchowych skutkowało nakładaniem się fal naprężenia, co zmniejszało całkowite zniszczenia w materiale.



Rys. 21. Zniszczenie powstałe na skutek równoczesnej detonacji dwóch ładunków wybuchowych (Sjoberg i in.)

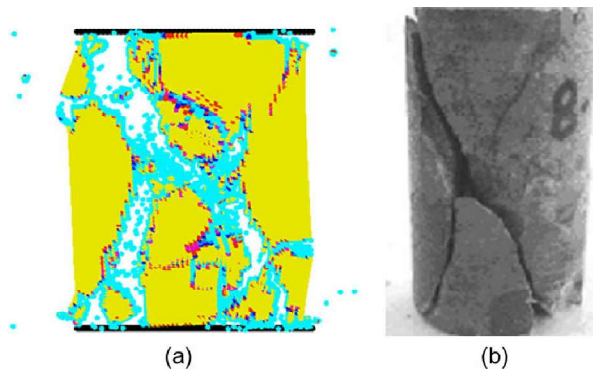
W innej pracy (Banadaki i in.) skupili się na analizach numerycznych oraz badaniach eksperymentalnych próbek skalnych z nawierconym otworem, w którym umieszczono TNT. Na tej podstawie udało się określić, że w okolicy wybuchu znajdują się osobne strefy wpływu różnego rodzaju zniszczenia wynikające ze ściskania oraz rozciągania w różnych lokalizacjach próbki. Dodatkowo w modelu numerycznym uwzględniona została szczegółowa budowa modelu numerycznego, w którym uwzględniono miedzianą obejmę wokół ładunku, warstwę polietylenu itp. Jako model materiałowy ponownie wykorzystany został Johnson Holmquist Ceramics. Porównanie wyników numerycznych i eksperymentalnych wykazało dużą zgodność, a propagacja pęknięć przedstawiona została na Rys. 7. Dodatkowo obserwowany został efekt odbicia fali naprężenia od powierzchni swobodnych próbki.





Rys. 22. Porównanie zniszczenia uzyskanego na drodze numerycznej oraz eksperymentalnej w cylindrycznych próbkach (Banadaki i in.)

Metoda cząstek Hydrodynamicznych przedstawiona w pracy (Das i in.) wykorzystana została do modelowania niszczenia skał. W centrum zainteresowania autorów znalazł się kształt i dokładność odwzorowania próbek. Sprawdzone zostały: kształt cylindryczny, cylindryczny z otworem oraz prostopadłościenny. Autorzy stwierdzili, że największą zaletą metody SPH jest możliwość poddania modelowanego kontinuum bardzo dużym deformacjom, uwzględniającym wzajemne kontaktowanie się powstałych fragmentów skały. Dodatkowo nierównomierne rozdystrybuowanie cząsteczek pozwala na bardziej stochastyczne podejście do modelowania, ze względu na losowe tworzenie się powierzchni ścinania. Dodatkowo każdorazowo powierzchnie te generują się pod określonym kątem, określającym najslabszą płaszczyznę i wynikającą z tarcia wewnętrznego oraz tarcia skały o trawersy. Kształt odłupanych fragmentów skalnych jest silnie zależny od kształtu próbki. Geometria próbki determinuje tzw. mode pęknięcia, czyli mechanizm propagujący pęknięcie.



Rys. 23. Porównanie zniszczenia uzyskanego metodą cząstek hydrodynamicznych (SPH) oraz badania eksperymentalnego (Das i in.)

### 3. Podsumowanie

W poniższej pracy przedstawiono różne podejścia do modelowania skał z wykorzystaniem mniej lub bardziej złożonych związków konstytutywnych oraz różnych metod odwzorowania geometrii oraz zniszczenia. Na tej podstawie można stwierdzić, że model Johnson Holmquist Concrete w sposób najwierniejszy odwzorowuje zachowanie skał w całym zakresie szybkości odkształcenia, uwzględniając przy tym wzmocnienie

kinematyczne oraz izotropowe. W przypadku metod modelowania za najbardziej efektywną można przyjąć SPH – ze względu na opis matematyczny korzystający z funkcji Kernela zachowujący ciągłość i interakcję pomiędzy cząsteczkami nawet w przypadku zniszczenia materiałów.

Kolejne prace poświęcone zostaną modelowaniu numerycznemu skał z wykorzystaniem zaprezentowanych w poniższym opracowaniu metod modelowania oraz modeli materiałowych. Walidacji poddane zostaną wykonane testy eksperymentalne jednoosiowego ściskania, trójosiowego ściskania oraz testu rozciągania metodą brazylijską.

#### **4. Literatura**

Smed E.M. & Cundall P, 2012 "Elasto-plasto Strain Hardening Mohr-Coulomb Model-Derivation and Implementation, Aalborg, Denmark";

Jaime M. C., 2011, Numerical Modeling Of Rock Cutting And Its Associated Fragmentation Process Using The Finite Element Method, University of Pittsburgh, PracaDoktorska;

Gao, F., Hou, A., Yang, X.,; 2010, "Numerical Analysis of Dynamic Mechanical Properties for Rock Sample under Strong Impact Loading", International Journal of Information Engineering and Electronic Business, 2:10-16;

Holmquist, T., Johnson, G. R., Grady, D. E., Lopatin, C. M., Hertel Jr. E. S., 1995, "High Strain Rate Properties and Constitutive modelling of glass", 15<sup>th</sup> International Symposium of Ballistics, Jerusalem, Israel, 21 – 24 May;

Holmquist, T., Johnson, G. R., 2003, "Modeling prestressed ceramic and its effect on ballistic performance", International Journal of Impact Engineering;

Baranowski, P., Małachowski, J.; 2017; Possibilities of rock constitutive modelling and simulation, 22-nd Computer Methods in Mechanics, Lublin, Poland;

Wang, J., Yin, Y., Luo, C.; 2018; "Johnson–Holmquist-II(JH-2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting", Applied Science;

Sjöberg, J., Schill, M., Hilding, D., Yi, C., Nyberg, U., Johansson, D., 2012, "Computer simulations of blasting with precise initiation" Eurock;

Banadaki, M. M., Mohanty, B., 2012, „Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock", International Journal of Impact Engineering;

Das, R., Cleary, P. W., 2010, "Effect of rock shapes on brittle fracture using Smoothed Particle Hydrodynamics", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 47 – 60;

Piechnik, S., 2007, „Mechanika Techniczna Ciała Stałego", Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, Polska;

Malvar, J., L., Crawford, J., E., Wesevich, J., W., Simons, D., 1997, "A plasticity concrete material model for Dyna3D", International Journal of Impact Engineering, 847-874;

# Metody pozyskiwania wodoru - review

Marcin Opalski <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska  
Marcin Opalski: marcin.opalski@gmail.com

## Streszczenie

Artykuł zawiera opis zarówno najnowszych i najczęściej eksploatowanych metod pozyskiwania wodoru. W pracy przedstawiono najczęściej stosowane sposoby pozyskiwania surowca z paliw kopalnych, takich jak reforming czy piroliza. W kolejnej części artykułu, opisano aktualnie wykorzystywane metody pozyskiwania wodoru z odnawialnych źródeł energii, takich jak zgazowanie biomasy, biofotoliza, elektroliza wody czy fotoelektroliza.

**Słowa kluczowe:** wodór, reforming, piroliza, fotoliza, elektroliza

## Method of hydrogen generation - review

### Summary

The main topic contain newest and most common methods of hydrogen gathering. In article were described most popular ways of gathering hydrogen from fossil fuels like reforming or pyrolysis. In the next part of article we can found current methods basing on renewable sources of energy like biomass gasification, biophotolysis, water splitting process in electrolysis or photolysis process.

**Key Words:** hydrogen, reforming, pyrolysis, photolysis, electrolysis

### 1. Wstęp

Czyste paliwo, o największym cieple spalania, którego produktem utleniania jest para wodna, brzmi jak chwytliwy tytuł nagłówka gazety z zakresu pop-science. Rosnące ceny paliw kopalnych jak i zaostrzające się normy emisyjne zmuszają gospodarki państw europejskich do zwrócenia się w stronę odnawialnych źródeł energii. Wodór, najbardziej powszechny pierwiastek, będący zarazem niewyczerpalnym, wydaje się, więc atrakcyjną alternatywą konwencjonalnych paliw. Jednym z pomysłów wykorzystania technologii wodorowej miałyby być ogniwa paliwowe, które już w 2018 roku zostały zaimplementowane, np. w pociągach produkowanych przez firmę Alstom. Na tę chwilę technologie pozyskiwania wodoru, możemy podzielić na dwie gałęzie:

- Metody pozyskiwania przy użyciu paliw kopalnych
- Metody pozyskiwania przy użyciu odnawialnych źródeł energii

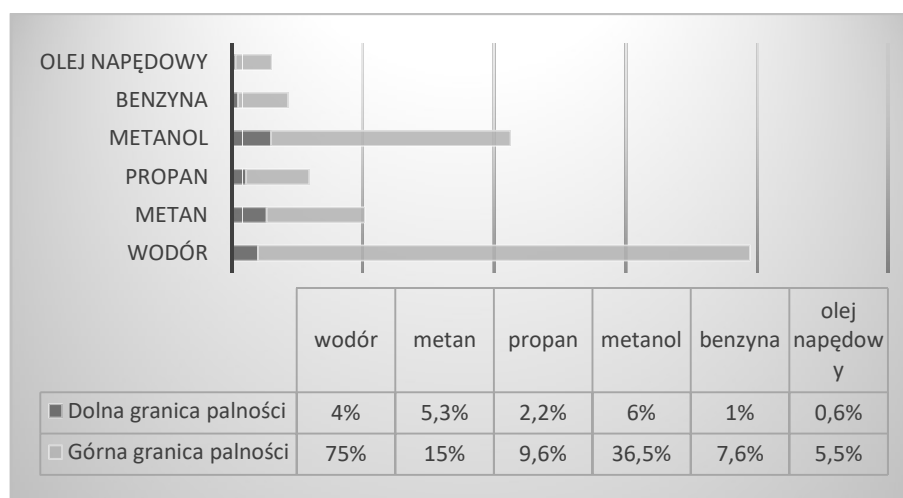
### 2. Wodór w liczbach

Wodór w stanie wolnym występuje w powietrzu w liczbie 0,5 ppm (Mazur), co oznacza, że pomimo stanowienia 75% masy wszechświata (Viatcheslav, 2005), w stanie wolnym na Ziemi praktycznie nie występuje. Jest bezwonny, bezbarwny, spala się niebieskim płomieniem. Wodór w stanie gazowym jest najlżejszym pierwiastkiem, jego gęstość wynosi  $0,082 \text{ kg/m}^3$  (David, 2009). Jako paliwo konwencjonalne posiada największe ciepło spalania i

wartość opałową (Bader & Błogowska, 2008), wśród eksploatowanych na tę chwilę paliw (Tabela 3). Posiada jedną z najszerszych granic palności (Barbalace, 1995 - 2018) w porównaniu z innymi konwencjonalnymi paliwami (Rys. 24). Produkcja wodoru na rok 2016 w skali globalnej wyniosła około 61 mln ton z czego, aż 51% wykorzystano do produkcji amoniaku. Następnym w kolejności był proces rafinacji 20% i produkcja metanolu 8% (McWilliams, 2018). Pomimo ekologicznego wydźwięku technologii wodorowej należy pamiętać, że 96% jego produkcji pochodzi z paliw kopalnych (Kothari, Buddhi, & Sawhney, 2008), co zostało przedstawione na diagramie (Rys. 25).

Tabela 3 Ciepło spalania i wartości opałowe konwencjonalnych paliw (Bader & Błogowska, 2008)

	ciepło spalania	wartość opałowa
	MJ/kg	MJ/kg
wodór	141,9	119,9
metan	55,5	50,5
etan	51,9	47,8
metanol	20	18,1
benzyna	47,5	44,5
diesel	44,8	42,5



Rys. 24 Zakres palności paliwa w powietrzu (Barbalace, 1995 - 2018)



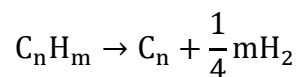
Rys. 25 Udział surowców energetycznych w produkcji wodoru (Kothari, Buddhi, & Sawhney, 2008)

### 3. Metody pozyskiwania przy użyciu paliw kopalnych

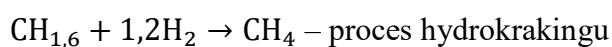
Metody możemy podzielić na dwie osobne gałęzie w zależności od wykorzystania w nich pary wodnej. Pierwszą z nich będzie proces niewykorzystujący pary wodnej - piroliza, a drugą reforming, który możemy przeprowadzić na różne sposoby. Będą to reforming parowy, auto reforming czy reforming dwu-stopniowy.

#### 3.1 Piroliza węglowodorów

Źródłem pochodzenia otrzymywanego wodoru w tym procesie jest pozyskiwanie go w wyniku rozpadu termicznego węglowodorów ukazanego poniżej.



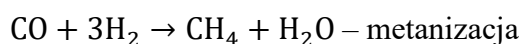
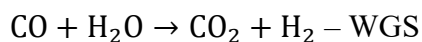
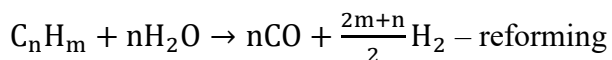
Rozpad lekkich węglowodorów opiera się na rozpadzie na cząsteczkowy wodór i węgiel. W przypadku cięższych frakcji, gdzie temperatura wrzenia przekracza 350°C, wodór otrzymywany jest w dwustopniowym procesie hydrokrakingu i krakingu metanu.



Kraking najłatwiej wytłumaczyć, jako proces „pęknięcia” długich łańcuchów węglowodorów na krótsze w otoczeniu wysokiego ciśnienia i temperatury. Główną wadą tej metody jest problem związany z separacją wodoru, która wynika z jego niskiego ciśnienia parcjalego oraz trwałością membrany nastawianą na wysokie temperatury. Cena produkcji wodoru nie uwzględniająca kosztów CAPEX w procesie pirolizy znajdowała się w zakresie od 1,60 do 1,80 \$/kgH<sub>2</sub> (Pavlos & Andreas, 2016).

### 3.2 Reforming parowy

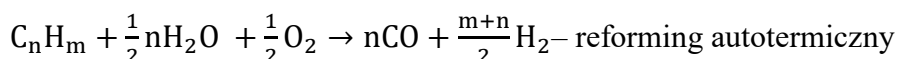
Reforming parowy polega na konwersji węglowodorów na katalizatorze niklowym przy udziale pary wodnej do wodoru i tlenków węgla. Składa się z trzech części: reformingu, konwersji CO (WGS – water-gasshift) oraz metanizacji.



Substratem reformingu parowego mogą być węglowodory lekkie po ciężkie nafty. W przypadku zanieczyszczenia siarką, przed reformerem znajduje się instalacja odsiarczania, by nie uszkodziła ona niklowego katalizatora (Miroslaw, Megaritis, & S.). Reforming parowy z użyciem metanu jest najczęstszą metodą pozyskiwania wodoru, sprawność konwersji szacuje się na około 80%, odbywa się ona w temperaturze 850-900°C. Koszty produkcji wynoszą 2,08 \$/kgH<sub>2</sub>. W przypadku gdy chcemy gromadzić CO<sub>2</sub>- 2,27\$/kgH<sub>2</sub> (Bartels, Pate, & Olson, 2010).

### 3.3 Reforming autotermiczny

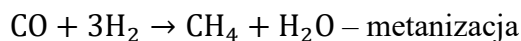
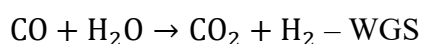
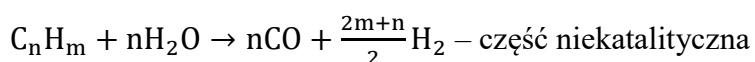
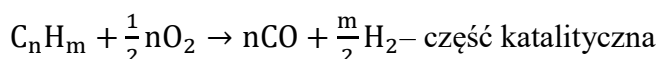
Reforming autotermiczny, w opozycji do tradycyjnego reformingu parowego, jest reakcją egzotermiczną, polega na pozyskiwaniu ciepła poprzez częściowe utlenianie metanu tlenem bądź w przypadku zamiaru pozyskania gazu syntezowego do produkcji amoniaku, powietrzem wzbogaconym w tlen. Proces możemy opisać przy pomocy poniższego wzoru.



W reformingu autotermicznym, w opozycji do parowego, mamy mniejszy nadmiar pary wodnej oraz brak konieczności zastosowania rur katalitycznych (PAŃCZYK & BOROWIECK, 2012). Proces wymaga wysokiego nakładu kapitału, koszt tlenowni stanowi 40% całej instalacji (Borowiecki, Ryczkowski, Franczyk, Gołębiowski, & Kowalik). Koszty produkcji wynoszą około 1,50 \$/kgH<sub>2</sub> (Damen, Troost, Faaij, & Turkenburg, 2006).

### 3.4 Reforming-dwustopniowy.

Reforming-dwustopniowy (POX- partialoxidation) polega na konwersji pary wodnej, tlenu i węglowodorów na wodór i tlenki węgla. Dzieli się on na dwa etapy. W pierwszym przeprowadzany jest katalityczny proces z użyciem tlenu, zachodzi on w temperaturze około 900 °C, podczas którego lżejsze węglowodory ulegają rozpadowi. Podczas drugiego etapu niekatalitycznego, bez substratu w postaci tlenu, zachodzi rozpad cięższych węglowodorów przy czym w większych temperaturach z zakresu 1150-1315°C (Pavlos & Andreas, 2016). Procesy te opisać można przy pomocy poniższych wzorów:



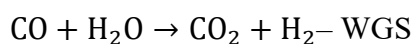
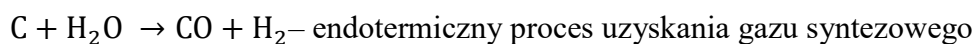
Reforming dwustopniowy stosowany jest głównie dla ciężkim paliw i węgla. Podobnie jak w przypadku klasycznego reformingu parowego zainstalowana jest instalacja odsiarczania oraz z wynikającego zapotrzebowania na tlen – tlenownie. Proces pomimo niskich kosztów produkcji, które wynikają z egzotermicznego charakteru procesu i wymiany ciepła wewnątrz instalacji, jest bardzokapitałochłonny. Koszty produkcji oscylują w granicach 1,34-1,60 \$/kgH<sub>2</sub> (R.Bartels, B.Pate, & Norman, 2010).

#### 4. Metody pozyskiwania wodoru z odnawialnych źródeł energii

Pomimo, iż węglowodory są w większości surowcem, z którego pozyskiwany jest wodór należy brać pod uwagę, że do 2022 roku, prognozowany jest wzrost o nawet 30% jego produkcji globalnej (McWilliams, 2018). Prognozy wzrostu eksploatacji, skończone zasoby konwencjonalnych paliw, jak i coraz bardziej intensywny efekt cieplarniany, pokazują potrzebę wzrostu udziału źródeł odnawialnych w jego produkcji. Podobnie jak w technologiach pozyskiwania wodoru ze źródeł nieodnawialnych możemy podzielić je na dwie główne gałęzie – procesy obróbki biomasy i procesy rozbijania atomu wody.

##### 4.1 Gazyfikacja biomasy

W porównaniu do czystego metanu, który masowo zawiera 25% wodoru, biomasa posiada go w granicach od 6-6,5% (WIĄCEK, 2011). Proces, podobnie jak w reformingu, wykorzystuje wysoką temperaturę pary wodnej (około 1330°C) do uzyskania gazu syntezowego, który pod wpływem pary wodnej, już egzotermicznie, ulega rozkładowi (Imperiya, Rahuma, & Eman, 2015). Procesy zachodzące w gazyfikacji opisać możemy poniższymi wzorami:



Należy pamiętać, że nieracjonalna gospodarka eksploatacji biomasy prowadzi do wycinki lasów, które poprzez fotosyntezę regulują cyrkulację CO<sub>2</sub> w ekosystemie. Opierając się na cenach drewna, koszty wahają się pomiędzy 1,77-2,05 \$/kgH<sub>2</sub> (R.Bartels, B.Pate, & Norman, 2010).

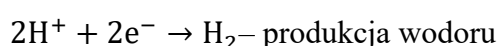
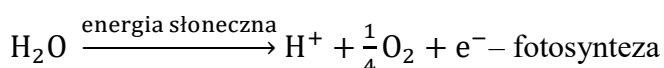
##### 4.2 Biofotoliza

Biofotoliza opiera się na wykorzystaniu procesu fotosyntezy i katalitycznym pozyskiwaniu wodoru przy pomocy białka, nazywanego hydrogenazą. Procesy te zachodzą między innymi

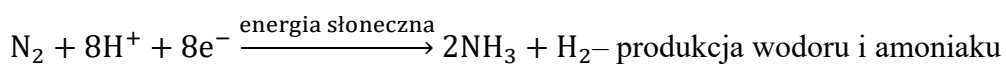
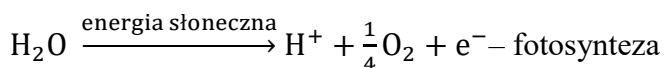


w chloropythach (pot. zielenice), w procesie biofotolizy bezpośredniej lub cyjanobakteriach (pot. sinice) w procesie biofotolizy pośredniej.

W przypadku biofotolizy bezpośredniej wodór zostaje uwolniony od kilku minutowej, do nawet godzinnej inkubacji beztlenowej, gdyż enzym hydrogenazy jest bardzo wrażliwy na tlen. Do przyspieszenia procesu produkcji wodoru hodowla zielenic zostaje umieszczona w środowisku o niskiej zawartości siarki, która to jest konieczna do syntezy białka odpowiadającego za produkcję tlenu i absorpcji dwutlenku węgla. W momencie ustania powyższych procesów tworzy się wodór. Możemy je opisać za pomocą poniższych równań:



W przypadku biofotolizy pośredniej wykorzystuje się cyjanobakterie, będące prokariotycznymi fotosyntezującymi organizmami. Procesem prowadzącym do produkcji wodoru jest fotoliza. Sinice nie mają dużych wymagań środowiskowych, potrzebują azotu, który pozyskują z powietrza, dwutlenku węgla, wody wzbogaconej solami mineralnymi i energii słonecznej. W pierwszym etapie, podobnie jak u roślin, zachodzi fotosynteza redukująca dwutlenek węgla do poziomu węglowodanów. W następnym etapie zachodzi fermentacja, która przy pomocy enzymu nitrogenazy będącego katalizatorem, przekształca cząsteczki azotu, wodór atomowy i wolne elektrony na amoniak i cząsteczkowy wodór. Możemy je opisać za pomocą poniższych równań (Sikora, 2008):

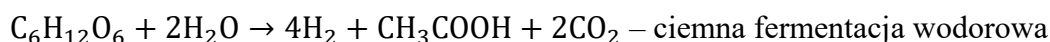


Należy mieć na uwadze, że proces ten nie jest bezpośrednio odpowiedzialny za produkcję gazów cieplarnianych, a ich redukcję. Redukuje on dwutlenek węgla z powietrza do poziomu węglowodanu w procesie fotosyntezy. Sprawność w idealnych warunkach dochodzi do 10%. (Imperiyka, Rahuma, & Eman, 2015). Koszty kapitałowe sięgają 135 \$/m<sup>2</sup>hodowli, natomiast koszty produkcji wynoszą 1,42 \$/kgH<sub>2</sub>. (C.Hallenbeck & R.Benemann, 2002) Bazując na niskich kosztach kapitałowych jak i produkcji, jest to jedna z najszybciej rozwijających i opłacalnych metod produkcji wodoru na masową skalę opartą na odnawialnych źródłach.

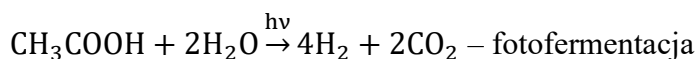
#### 4.3 Dwustopniowy proces fermentacji wodoru

Ciemna fermentacja wodorowa polega na konwersji cukrów prostych, przy udziale wody do wodoru, dwutlenku węgla do alkoholu lub kwasów organicznych. Surowcami fermentacji mogą być wysokokaloryczne płony o wysokiej zawartości cukrów są to, np. buraki cukrowe,

ziemniaki, słoneczniki czy nawet słoma. Należy jednak zwrócić uwagę, by, jako surowca nie stosować biomasy ligninocelulozowej, która w przeciwieństwie do celulozy i hemicelulozy hamuje wzrost mikroorganizmów katalizujących proces fermentacji. W przypadku, gdy substratem jest celuloza, a produktem kwas octowy, reakcję fermentacji wodorowej możemy opisać wzorem:



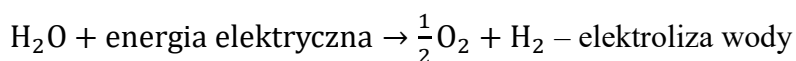
Kolejnym etapem produkcji wodoru jest zastosowanie procesu fotofermentacji w celu wykorzystania produktów fermentacji wodorowej. Bakterie brunatne absorbujące promieniowanie świetlne rozkładają wyżej pozyskany kwas octowy na mieszaninę gazową wodoru i dwutlenku węgla. Wymaga to jednak dedykowanego źródła promieniowania, gdyż proces zachodzi tylko w określonej długości fali od 400-900 nm (URBANIEC & GRABARCZYK) (KOZŁOWSKI, i inni, 2016).



Zależnie od etapu produkcji możemy wydzielić osobne koszty za każdy z powyższych procesów. Koszt produkcji wodoru z ciemnej fermentacji wynosił 2,57 \$/kgH<sub>2</sub> natomiast dla fotofermentacji 2,87 \$/kgH<sub>2</sub> (Dincer & Acar, 2016).

#### **4.4 Elektroliza wody**

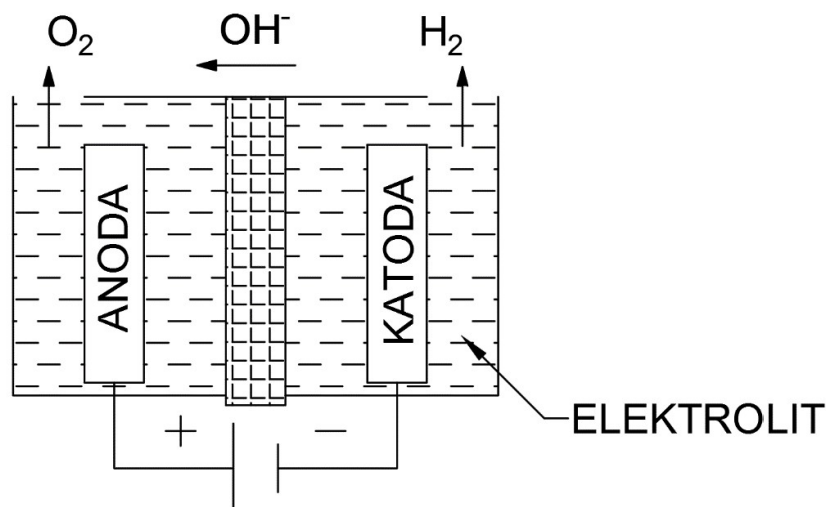
Elektroliza jest to proces, w którym cząsteczka wody zostaje rozbita na wodór i tlen przy udziale energii elektrycznej. Zapotrzebowanie na energię elektryczną, wraz ze wzrostem temperatury do przeprowadzenia tego procesu, maleje. Wysokotemperaturowe elektrolizy wydają się być opłacalne, ale jedynie w przypadku, gdy posiadamy niepotrzebne źródła ciepła z innych procesów. W najprostszym ujęciu proces ten możemy opisać równaniem (Chisholm & LeroyCronin, 2016):



##### **4.4.1 Elektroliza alkaiczna**

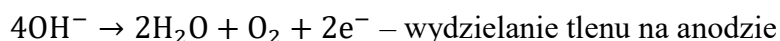
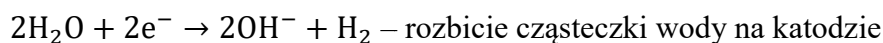
Elektroliza alkaiczna jest najbardziej powszechną technologią używaną w elektrolizie wody. Sprawność tego procesu sięga 82%, a otrzymany wodór posiada wysoki stopień czystości 99,7-99,9%. Typowy elektrolizer zawiera dwie elektrody zanurzone w elektrolicie i oddzielające je separatorem przepuszczającym wodę i jony wodorotlenkowe. Najczęściej występującym elektrolitem jest roztwór wodny wodorotlenku potasu, ale wykorzystywane są również roztwory wodorotlenku sodu czy chlorku sodu. Główną przewagą elektrolizerów alkaicznych nad elektrolizerów z membraną PEM, jest ich koszt. Proces przeprowadzany jest w temperaturze od 60 do 80°C w ciśnieniu do 25 barów (Janusz, Michał, Daniel, &

Włodzimierz, 2006). Schemat został przedstawiony na Rys. 26) Zapotrzebowanie energetyczne na produkcję 1 kg wodoru tym sposobem wynosi 53,4 kW/h. (Diéguez, A.Ursúa, P.Sanchis, C.Sopena, E.Guelbenzu, & L.M.Gandía, 2008)



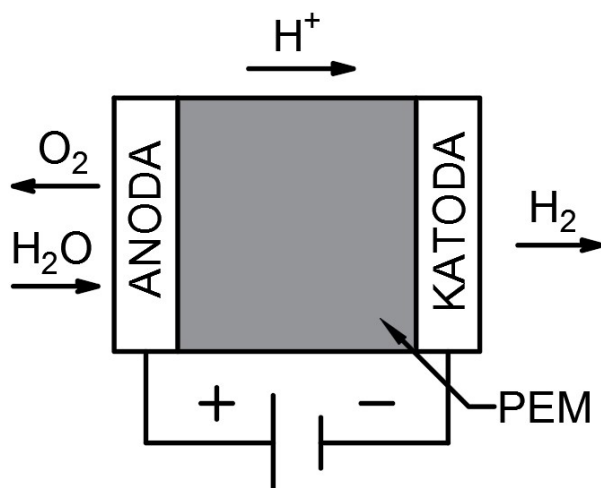
Rys. 26 Elektroliza alkaiczna

Reakcje odbywające się wewnątrz elektrolizera możemy opisać równaniami.



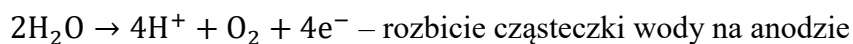
#### 4.4.2 Elektroliza wody z udziałem polimerowej membrany elektrolitowej (PEM - Proton Exchange Membrane)

Podstawową własnością elektrolizy PEM jest brak występowania płynnego elektrolitu, co w znacznym stopniu ułatwia projektowanie takiego elektrolizera. Membrany PEM, mogą zostać wykorzystywane w środowisku wysokiego ciśnienia sięgającego 100 barów, pracując w temperaturach od 50 do 80°C. Główną wadą elektrolizerów tego typu jest zużywalność membrany. Elektrolizery PEM posiadają statycznie 4,5-krotnie krótszy okres eksploatacji w opozycji do elektrolizerów alkaicznych (Chisholm & LeroyCronin, 2016). Przewagą PEM nad alkaicznymi jest brak płynnego elektrolitu, kompaktowa budowa i praca na wyższych ciśnieniach. Odwrotnie niż w przypadku do elektrolizy alkaicznej, cząsteczka wody rozbijana jest na anodzie (Bielecki, 2018). Sprawność tego procesu można szacować na około 70% (Imperiyka, Rahuma, & Eman, 2015). Schemat PEM został przedstawiony na Rys. 27).



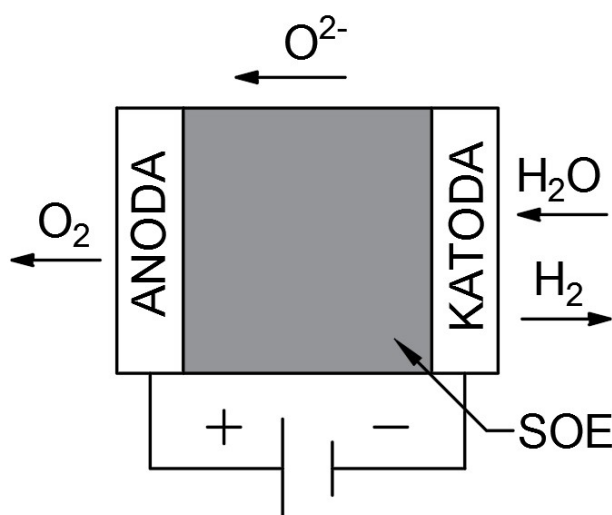
Rys. 27 Elektroliza z wykorzystaniem membrany PEM

Reakcje odbywające się wewnątrz elektrolizera możemy opisać równaniami.



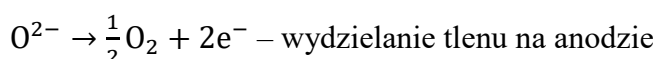
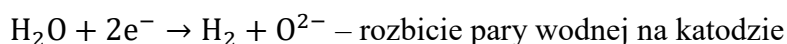
#### 4.4.3 Elektroliza wysokotemperaturowa

Elektroliza wysoko temperaturowa nazywana inaczej stało tlenkową elektrolizą (SOE - Solid Oxide Electrolysis), bazuje głównie na tym, iż energia wiązań atomów wody jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury, przez co o wiele prościej taki atom zjonizować. Procesy te wykorzystuje się z użyciem stało tlenkowych elektrolizerów w temperaturze z zakresu 800-1000°C. SOE podobnie jak PEM, posiadają elektrolit w formie stałej, jest to membrana ceramiczna najczęściej wykonana z tlenku cyrkonu. W tym typie elektrolizy para wodna pod wysokim ciśnieniem rozbijana jest na katodzie na aniony jednoatomowego tlenu i cząsteczki wodoru, co zostało pokazane na Rys. 28). Sprawność pomimo zapotrzebowania na tak wysokie temperatury sięgać może 50% (Olszowiec, 2005). Głównym założeniem elektrolizy wysokotemperaturowej jest ograniczenie zużycia energii elektrycznej, a nie cieplnej (Chisholm & LeroyCronin, 2016), (Sapountzi, Gracia, Weststrate, & Niemantsverdriet, 2017).



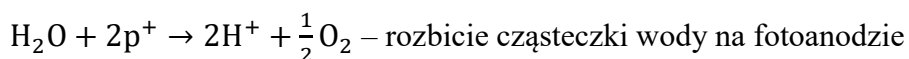
Rys. 28 Elektroliza wysokotemperaturowa

Reakcje odbywające się wewnątrz elektrolizera możemy opisać równaniami.



#### 4.4.4 Fotoliza

Ogniwa fotoelektrochemiczne, podobnie jak w instalacjach fotowoltaicznych, absorbują promieniowanie słoneczne przy użyciu materiału półprzewodnikowego. Powstające pary elektronu i dziury elektronowej reagują z elektrolitem powodując powstawanie wodoru i tlenu. Kwant promieniowania zaabsorbowany przez półprzewodnik typu n generuje powstanie dziury elektronowej, która na fotoanodzie wydziela tlen i wodór atomowy. Na katodzie wodór atomowy łączy się z elektronami tworząc wodór atomowy. Sprawność procesu jest proporcjonalna do ilości pochłoniętego promieniowania słonecznego, w konsekwencji jest ona narażona na zmiany pogodowe (Bieńkowski & Gdula, 2010). Koszt produkcji wodoru przy pomocy fotoelektrolizy, pomijając nakłady kapitałowe, wynosi 10,37 \$/kgH<sub>2</sub>. (Dincer & Acar, 2016). Procesy wewnątrz elektrolizera możemy opisać następującymi równaniami:



#### 4.5 Podsumowanie metod pozyskiwania wodoru elektrolizą

Koszty produkcji wodoru przy pomocy elektrolizy, w dużej mierze zależą od nakładu kapitału oraz możliwości zastosowania poszczególnych elektrolizerów jak i tego czy posiadamy nadwyżki energii cieplnej, by przeprowadzić elektrolizę wysokotemperaturową. Na tę chwilę najbardziej opłacalnym sposobem pozyskiwania wodoru jest wykorzystywanie nadwyżek produkcji prądu oraz ciepła z elektrowni atomowych, co nie oznacza, że nie wykorzystuje się

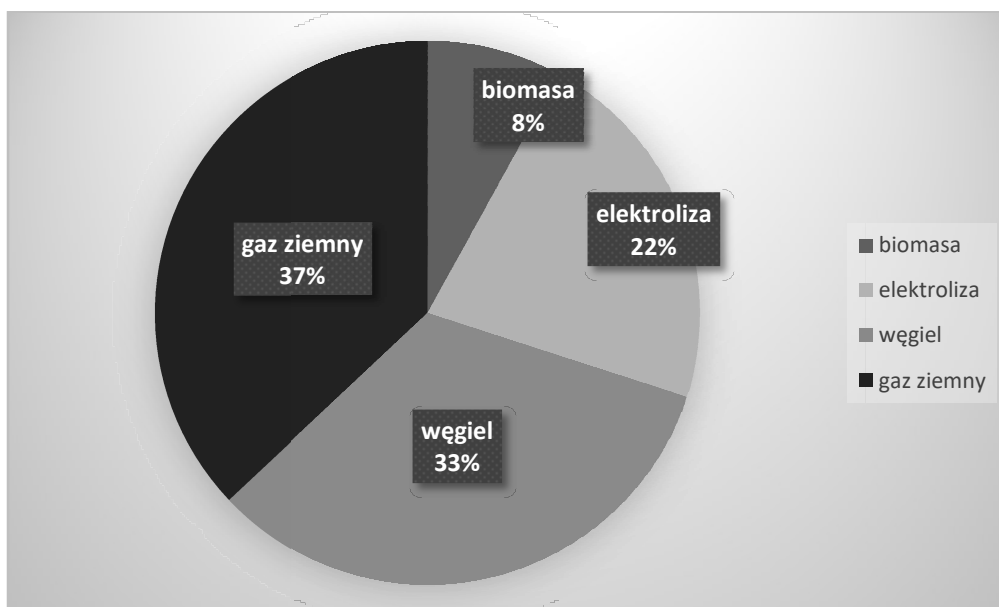
do tego turbin wiatrowych czy paneli słonecznych. Koszty poszczególnych metod zostały przedstawione w tabeli (Pavlos & Andreas, 2016) Tabela 4).

Tabela 4 Porównanie kosztów metod pozyskiwania wodoru w procesie elektrolizy (Pavlos & Andreas, 2016)

proces	źródło energii	koszty, \$/kgH <sub>2</sub>
termoelektroliza	atom	2,17-2,63
fotoelektroliza	słońce	10,36
elektroliza wiatrowa	wiatr	5,89-6,03

## 5. Podsumowanie

Nie jesteśmy w stanie oszacować potencjalnego znaczenia wodoru, jako paliwa energetycznego w przyszłości. Wiadomym jest jednak, że dalej odgrywać on będzie ogromne znaczenie w przemyśle chemicznym przy produkcji amoniaku i alkoholi. W niedalekiej przyszłości najszerzej eksploatującą wodór gałęzią przemysłu okazać może się transport, który oparty miałby być na ogniach wodorowych. Możliwym jest wykorzystanie wodoru jako paliwa konwencjonalnego w turbinach gazowych, poprzez spalenie go w postaci czystej lub jako mieszaniny z gazem ziemnym. Wodór służyć może również, jako jeden z nośników energii, przy czym należy pamiętać, iż dzisiejsze technologie magazynowania nie zapewniają idealnej szczelności, przez co duża jego część dyfunduje do otoczenia. Zakładając, iż prognozy na rok 2050 Rys. 29] znajdują, chociaż minimalne odzwierciedlenie w rzeczywistości, możemy oczekiwać w najbliższych latach rewolucję w metodyce jak i eksploatacji metod pozyskiwania wodoru opartych na odnawialnych źródłach energii (Cornell, 2017).



Rys. 29 Prognozy udziału surowców energetycznych w produkcji wodoru 2050r. (Cornell, 2017)

## 6. Literatura

M. Mazur, Systemy ochrony powietrza, Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne.

M. Viatcheslav, *Physical Foundations of Cosmology*, Cambridge University Press, 2005.

R. L. David, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Boca Raton: CRC Press, 2009.

P. Bader i K. Błogowska, *Laboratorium termodynamiki*, Warszawa: OWPW, 2008.

K. Barbalace, *Periodic Table of Elements - Hydrogen - H*, 1995 - 2018.

A. McWilliams, *The Global Hydrogen Economy: Technologies and Opportunities Through 2022*, bbcResearch, 2018.

R. Kothari, R. Buddhi i D. Sawhney, *Comparison of environmental and economic*, 2008.

N. Pavlos i P. Andreas, „A comparative overview of hydrogen production processes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 598-610, 15 September 2016.

L. Miroslaw, W. T. Megaritis i L. R. S., *Hydrogen from Exhaust Gas Fuel Reforming: Greener, Leaner and Smoother*, The University of Birmingham: Future Power Systems Group.

J. Bartels, M. Pate i N. Olson, „An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010.

M. Pańczyk i T. Borowieck, „Otrzymywanie i zastosowanie gazu syntezowego,” 2012.

T. Borowiecki, J. Ryczkowski, E. Franczyk, A. Gołębiowski i P. Kowalik, *Procesy i katalizatory pozyskiwania gazu syntezowego*, Wydział Chemii UMCS, Instytut Nawozów Sztucznych.

K. Damen, M. v. Troost, A. Faaij i W. Turkenburg, „A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO<sub>2</sub> capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies,” *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006.

J. R. Bartels, M. B. Pate i K. Norman, „An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 8 June 2010.

D. Wiącek, „Wodór jako paliwo przyszłość,” *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, pp. 446-452, 2011.

H. Imperiyka, N. Rahuma i B. Eman, „An Overview of Hydrogen Production Technologies,” *International Journal of Science and Research*, 2015.

A. Sikora, „Produkcja wodoru w procesach prowadzonych przez drobnoustroje,” *Postępy Mikrobiologii*, maj 2008.

P. C. Hallenbeck i J. R. Benemann, „Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes,” *International Journal of Hydrogen Energy*, December 2002.

- K. Urbaniec i R. Grabarczyk, „Kierunki badań nad wykorzystaniem biomasy do otrzymywania wodoru,” Politechnika Warszawska, Płock.
- K. Kozłowski, A. Lewicki, M. Cieślik, D. Janczak, W. Czekala, A. Smurzyńska I J. Dach, „Biologiczne metody produkcji wodoru,” pp. 26-28, maj 2016.
- I. Dincer i C. Acar, Review and evaluation of hydrogen production, 2016.
- G. Chisholm i LeroyCronin, „Chapter 16 - Hydrogen From Water Electrolysis,” Storing Energy, pp. 315-343, 2016.
- K. Janusz, J. Michał, W. Daniel i O. Włodzimierz, „Analysis of Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers,” Journal of Power Technologies, 2006.
- P. Diéguez, A.Ursúa, P.Sanchis, C.Sopena, E.Guelbenzu i L.M.Gandía, „Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: Experimental study and mathematical modeling,” December 2008.
- D. Bielecki, Praca Magisterska, " Produkcja wodoru w procesie elektrolizy przy zastosowaniu PEM", Promotor: dr hab. inż Halina Pawlak;Recenzent: dr inż. Daniel Smykowski, 2018.
- P. Olszowiec, Perspektywy rozwoju gospodarki wodorowej, Energetyka, 2005.
- F. Sapountzi, J. Gracia, C. J. Weststrate i H. Niemantsverdriet, „Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas,” Progress in Energy and Combustion Science, January 2017.
- K. Bieńkowski i M. Gdula, „Krótkie wprowadzenie do tematyki ogniw,” Materiały Elektroniczne, pp. 9-17, 2010.
- A. Cornell, „Hydrogen production by electrolysis,” w International Conference on Electrolysis, Copenhagen, 2017.



# Nawierzchnie na przejazdach kolejowo-drogowych

Maciej Rochel <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Instytut Inżynierii Drogowej, Kolejowej i Transportu, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
Maciej Rochel: maciek.rochel@gmail.com

## Streszczenie

Na nawierzchnię na przejeździe kolejowo-drogowym składają się dwa podstawowe komponenty: nawierzchnia kolejowa oraz nawierzchnia drogowa. W przypadkach, gdy nawierzchnie te stanowią jednolitą całość pod względem konstrukcyjnym, możemy mówić o zintegrowanej nawierzchni kolejowo-drogowej. Rozwiązanie takie jest dużym wyzwaniem dla projektanta. Projektując nawierzchnię na przejeździe kolejowo-drogowym musi on uwzględnić odmienną pracę konstrukcji drogi od pracy nawierzchni kolejowej oraz zaproponować rozwiązanie, które pozwoli wykonać trwały przejazd, bez nierówności, przy zmianie sztywności konstrukcji. Ponadto taka nawierzchnia musi spełniać wymagania zarządcy drogi publicznej, które odbiegają znacząco od warunków stawianych przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. W rezultacie miejsce styku linii kolejowej z drogą wymaga szczególnej uwagi. W artykule omówiono obecny stan prawny związany z projektowaniem przejazdów kolejowo-drogowych oraz przedstawiono rodzaje nawierzchni na przejazdach stosowane na sieci kolejowej PKP PLK S.A. Na koniec porównano wady i zalety poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** nawierzchnia drogowa, nawierzchnia kolejowa, przejazd kolejowo-drogowy

## Level crossing surfaces

### Summary

Railway crossing surface consists of two main elements: the rail track surface and the road pavement. When the road and the rail structures are unified structurally we call it an integrated railway crossing surface. That solution is a big challenge to engineers. The level crossing designer must consider a different type of interaction between the railway and the road. Also, he should propose a solution, which will be durable, with equalized stiffness at the entry area. Additionally, the railway crossing surface must fulfil requirements of the public road administration manager, which are different from the conditions set by PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. As a result, the contact point between the railway and the road requires special attention.

In the article the Author discusses the current legal status related to the design of level crossings and presents the types of surfaces used on the PKP PLK SA railway network. Finally, the advantages and disadvantages of individual construction solutions are compared.

**Keywords:** railway track, road surface, level crossing

### 1. Introduction

The level crossing is a one-level intersection of the railway track with a road or a path (Koc 2013). Railroad crossings in Poland can be divided into the following categories: A, B, C, D, E, F (Dz. U. 2015 poz. 1744). Regardless of the level crossing category, the following features should be determined: location, angle of crossing the road with the railway line, type and technical condition of the railway surface, width of roadways and pavements, existing profile with cross-sections of the railway line and road (Towpik 2004). Surfaces used on the railway network in Poland are, on many cases, outdated solutions with numerous defects. Modern solutions for the construction of level crossings must meet the current and future traffic requirements. Their main task is to improve safety and extend the life of the surface in the area of passage, while maintaining high operational parameters (Koc 2013).

## 2. Regulations and requirements for surfaces on level crossings

- Railroad crossing categories

In Poland, according to the national regulations (Dz. U. 2015 poz. 1744), railroad crossings are divided into six categories:

Table 1. Level crossing categories and their amount (Baza PLK)

Type	Description	Number
A	Public level crossings with barriers or without barriers, where traffic on the road is directed by authorized employees of the railway infrastructure manager either with hand signals or devices equipped with barriers closing the entire width of the road.	2 466
B	Public level crossings where traffic is routed using automatic systems equipped with traffic lights and traffic barriers closing traffic (only barriers in the direction of entry to the level crossing or in the direction of both entry and exit).	1 209
C	Public level crossings where traffic is routed using automatic systems equipped only with traffic lights.	1 405
D	Public level crossings not equipped with traffic protection systems and devices, marked only with saltire (St. Andrew's cross) to warn road users about a level crossing about a level crossing with no barriers whatsoever.	8 135
E	Public level crossings intended only for pedestrians and bicycles equipped with automatic systems or turnstiles and labyrinths.	506
F	Level crossings located on the internal non-public roads.	683
TOTAL		14 404

The level crossing category depends mainly on the traffic product (product of road and railway traffic), train speed, visibility at the crossing and the number of tracks. All crossings are protected by road warning signs, and depending on the category, also light or sound signaling and barriers. The railway infrastructure manager always deals with the maintenance of the railway crossings. It is recorded in the Act of railway transport (Dz.U. 2003 nr 86 poz. 789).

- Current national legislation

The basic document that defines the technical requirements for railroad crossings is the Regulation of the Minister of Infrastructure and Development of 20 October 2015 on technical conditions that should correspond to the intersection of railway lines with roads and their location (Dz. U. 2015 poz. 1744). It contains all the requirements for the design, construction, reconstruction, renovation and maintenance of railway line intersections and with public and internal roads. This document was updated in September 2018 with several changes in the design and executions of level crossings. The changes included: visibility conditions, the intersection angle, the longitudinal profile and route plan of the road and the railway line, as well as the location of multi-level crossing (Szabłowska i in. 2018).

In addition, detailed technical requirements can be found in:

- Regulation of the Minister of Transport and Maritime Economy of September 10, 1998 on technical conditions that should be met by railway structures and their location (with later changes) (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987),
- Instruction Id-1 "Technical conditions for maintaining the surface on railway lines" issued by PKP PLK S.A (Id-1 2005),
- Technical Standards Volume X "One-level railroad crossings and parallel paths; Detailed technical conditions for the modernization or construction of railway lines up to a speed  $V_{max} \leq 200$  km / h (for conventional rolling stock) / 250 km / h (for tilting rolling stock) "issued by PKP PLK S.A. (ST 2009).

Regulation (Dz. U. 2015 poz. 1744) focuses mainly on defining the requirements for the design of level crossings, their categorization and ways to secure them. The only information about the surface on the level crossing is found in § 30 para. 2:

"The construction of the road surface at the railroad crossing should be made using the same technical and material solutions over the entire length of the railway and road crossing and taking into account the traffic volume."

The Regulation (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987), in turn, describes the technical requirements for the railway surface at the crossing in:

§ 26 para. 1 - "Railway surface within the level crossing should have at least the same construction standard as the track surface adjacent to the crossing",

§ 26 para. 2 - "On the width of the level crossing and at a distance of 6 m on both its sides, it is not permissible to:

- change the type of sleepers and ballast in the track, as well as laying wooden sleepers within the level crossing, if the track is laid on concrete sleepers outside the crossing,
- use supported or hanging joints of rails and fenders; existing joints should be welded."

In addition, the document (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987) indicates which regulation defines the technical conditions to be met by railroad crossings, § 26 para. 3: "The technical conditions that level crossings should comply with are specified in the regulations on technical conditions that should correspond to the intersection of railway lines with roads and their location."

Instruction Id-1 issued by PKP PLK S.A. (Id-1 2005) describes the pavement requirements for rail level crossings in § 13. A part of the technical conditions derived from the regulation (Dz. U. 2015 poz. 1744) and (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987) was defined there, and the requirement to use the road surface structure from dismountable materials was added

in case of necessary works with repair and maintenance of the railway surface at the level crossing. Technical standards (ST 2009) do not introduce new requirements for road and road surface at crossings compared to Id-1 (Id-1 2005).

### 3. Types of surfaces on level crossings

An important issue when choosing a pavement construction is its durability, cost and car driving comfort. The basic materials from which the surface is made on crossings are concrete, rubber or gum-like materials. In addition, materials such as polyethylene, steel coated with epoxy and elastomers are used (Towpik 2004).

- Surfaces made of reinforced concrete slabs

Pavements made of reinforced concrete slabs are the most commonly used solution in Poland. There are two types of concrete surfaces: small-size panels for assembly without the use of heavy equipment and large-size panels.

First type of concrete level crossing surface is Mirosław type surface. This surface is used on level crossings with course of the track in the plan on straight sections and curves with a radius greater than 300m (Koc 2013). The structure consists of (Fig. 1):

- prefabricated reinforced concrete crossing plates,
- supporting beam with a length of 2.40 m (1.80 m),
- elastomeric shock absorber,
- a rubber cushioning belt,
- a rubber sealing strip (Sancewicz 2010).

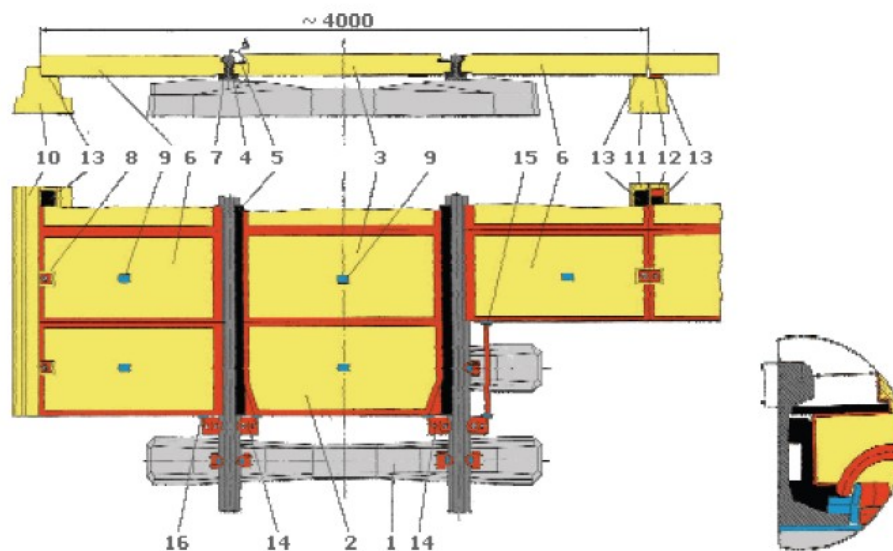


Fig. 1. Mirosław type surface (Koc 2013):1- railway sleeper; 2- outer end cross-drive plate; 3- internal drive plate; 4- internal shock absorber; 5- rubber belt; 6- external crossing plate; 7- external shock absorber; 8-screw; 9-polyurethane plug; 10,11-beam support;12-fixing strip; 13-rubber cushioning belt; 14- resistive handle; 15- way connector; 16-polyethylene cap.

The pavement elements are permanently connected to the tracks due to the elastic suspension of small-sized passage plates based on the feet of the rails. Therefore, the vertical position of the rails and the road surface are not displaced from each other during operation (Koc 2013). The advantage of the surface is the low weight of its elements, ease of assembly and disassembly of individual panels independently of each other (Sancewicz 2010) and the possibility of carrying out maintenance works in the area of passage. Disadvantage - the possibility of uneven loading of slabs in case of a sloping road to the axis of the railway line.

Other type of concrete railroad crossing surface is CBP surface. This surface is used on level crossings with course of the track in the plan on straight sections and curves with a radius greater than 800m. CBP plates have a standard length of 3 meters. In case of level crossings which width is not a multiple of 3 meters, the CBP plates are arranged with an appropriate margin. An unquestionable advantage is the proven construction of the surface (fig. 2), which consists of:

- reinforced concrete prefabricated internal drive plate,
- reinforced concrete, prefabricated inner intermediate driveway plate,
- reinforced concrete, prefabricated external crossing plate (Koc 2013).

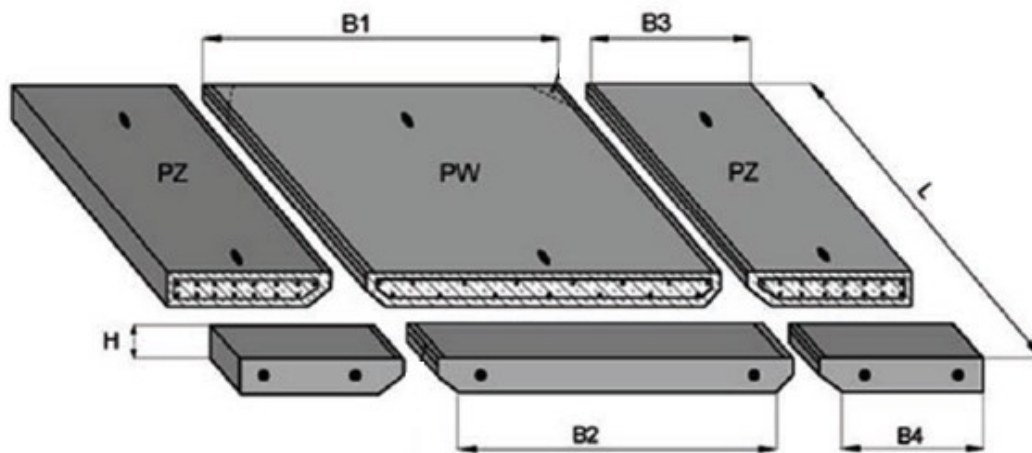


Fig. 2. CBP type surface (Koc 2013)

Large CBP boards are susceptible to pressing, moving plates and rotating them in relation to the track axis. This is due to the fact that the track surface is not permanently connected with the railway track (Massel 2010). There may also be problems with dehydration.

- Surfaces made of rubber elements

These types of surfaces significantly reduce the noise and vibration levels, they allow for adjustment to the curvature of the track. In addition, recycled materials can be used in production. Under high traffic, faster wear of pavement elements is possible.

First type of surface used commonly in Poland is STRAIL surface. STRAIL rubber plates are used on single or multi-track railroad crossings, on all types of sleepers, on straight sections of the track or in curves with radius  $R \geq 180$  m. Their structure consists of:

- external and internal rubber panels,
- concrete curb,
- cushions,
- elements connecting plates,
- steel security wedge (Koc 2013).

Rubber sheets are double-layered. The thickness of the outer layer made of high quality rubber is 7-8 mm. The inner layer is made of a vulcanising compound with reduced strength requirements (Sancewicz 2010). Depending on the application, it stands out:

- innoSTRAIL basic solution: used for heavy traffic at the intersection (length of the inner and outer plate: 90 cm),
- pontiSTRAIL: used with very high pressure on the vehicle axle or traffic (plate length 120 cm). External boards are placed on an additional aluminum plate,
- veloSTRAIL: used at pedestrian and bicycle crossings, where the traffic of rail vehicles takes place at low speed,
- pedeSTRAIL: arranged at stations and at pedestrian crossings (Koc 2013).



Fig. 3. pontiSTRAIL type surface on level crossing in Belgium (Strail www-site)

Other type of rubber level crossing surface is ELAS Track type surface. System used at junctions of railways with cars, bicycles or as pedestrian crossings. The construction of the panels allows the surface to be installed on all types of sleepers. It can be installed on single- or multi-track railway crossings, on straight sections, on transition curves or curves with radius  $R \geq 380$ m. The surface consists of (fig. 4):

- rubber plates: an internal railway plate placed between the track rails and an external railway plate placed between the track rails,
- rubber adaptation elements to properly match the rubber plates to the shape of the sleeper,
- reinforced concrete support curbs,
- structural elements connecting plates (Technical Approval 2015).

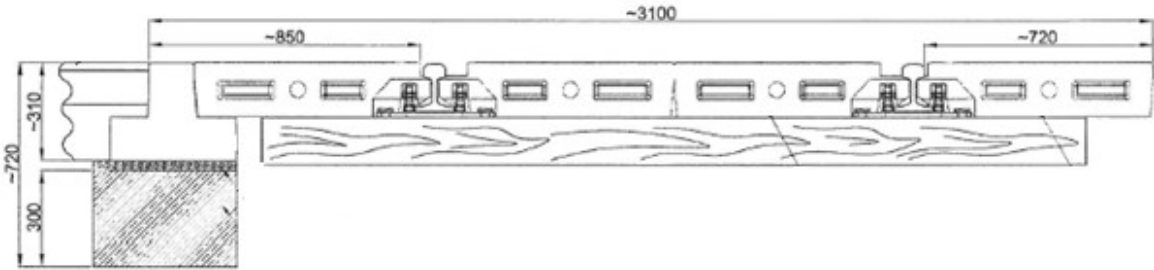


Fig. 4. Cross-section of ELASTrack level crossing surface (Technical Approval 2015)

- Integrated railroad crossing surfaces

A solution in which the railway surface together with the road surface form a uniform structure is called a integrated railroad crossing surface. The main part of this surface is a prefabricated reinforced concrete slab. The railway rails are fixed in channels using various fastening systems and filling masses. The example of integrated surface is Edilon LC-L type surface, which design ensures even and limited settling of the track and road. The basic element of the system is a prefabricated reinforced concrete slab. Steel profiles protect the edges of panels from damage by vehicle wheels. The boards can be 3.4 or 6 m long (Sancewicz 2010). Rails are fixed in the troughs with the use of flooding materials. They are also regulated by the use of washers and wedges. In this way, durability and tightness of the rail in the roadway is ensured. To adjust the position of the rail in the vertical plane, plastic washers with a thickness of approximately 60 cm are used (Sancewicz 2010).

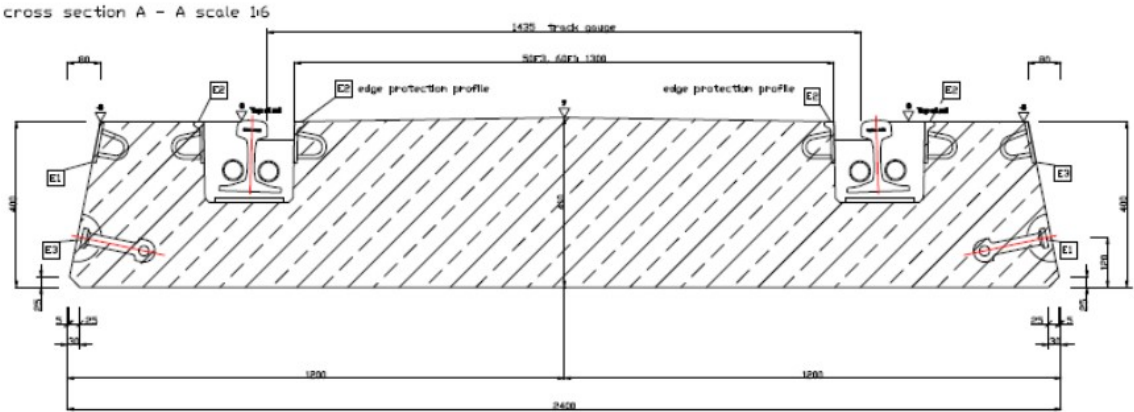


Fig. 5. Cross-section of the Edilon LC-L surface type (Tines www-site)

#### 4. Comparison of surfaces on level crossings

Table 2. Comparison of advantages and disadvantages of pavement on railroad crossings

Type of surface	Advantages	Disadvantages
Surfaces made of reinforced concrete slabs		
Mirolaw type	<ul style="list-style-type: none"> <li>• easy assembly and disassembly of individual boards independently of each other,</li> <li>• the possibility of carrying out maintenance works in the area of passage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• the possibility of uneven loading of slabs in the case of a slope at an incline to the axis of the railway line.</li> </ul>
CBP type	<ul style="list-style-type: none"> <li>• the possibility of relatively easy assembly and disassembly (the need to use heavy equipment),</li> <li>• proven design,</li> <li>• more suppliers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• the highest susceptibility to dynamic impact of vehicles (keying, moving plates and their rotation in relation to the axis of the track),</li> <li>• problems with dehydration,</li> <li>• poorly maintained surfaces generate high levels of vibration and noise.</li> </ul>
Surfaces made of rubber elements		
STRAIL type, ELASTrack type	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reduce noise and vibrations,</li> <li>• they allow adjustment to the curvature of the track,</li> <li>• recycled materials can be used in production.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• faster wear of pavement elements under intensive traffic.</li> </ul>
Integrated surfaces		
Edilon LC-L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• high durability and stability,</li> <li>• ensures even and limited settling of the track and road,</li> <li>• eliminates mutual movements of individual elements within the passage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• differences in the stiffness of the railway surface and trackbed within the level of the railway and road crossing and beyond crossing,</li> <li>• limited possibilities of disassembly of the integrated surface,</li> <li>• high price.</li> </ul>

#### 5. Summary

Many factors should be taken into consideration while choosing the right surface including from the amount of traffic at the crossing, the speed of road vehicles and trains, and the location of the level crossing in the surrounding area. Heavy integrated surface is great at crossings with large traffic, but is not necessary on all crossings due to it is higher price than standard CBP surface construction. 14 404 railroad crossings on the PKPPolskieLinie Kolejowe S.A. railway network give a large research area to test and select the appropriate passage construction.

The place where the railway line and road intersect requires special attention of the infrastructure manager, but the development of the pavement construction gives the opportunity, with the use of modern technologies, to reduce investment and maintenance costs.

#### 6. Literature

Act of railway transport of March 28, 2003 (Dz.U. 2003 nr 86 poz. 789).



Instruction Id-1 "Technical conditions for maintaining the surface on railway lines" issued by PKP PLK S.A (Id-1 2005).

Koc W., 2013. Drogi szynowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 169-185.

The Regulation of the Minister of Infrastructure and Development of 20 October 2015 on technical conditions that should correspond to the intersection of railway lines with roads and their location (Dz. U. 2015 poz. 1744).

List of railway crossings – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Massel A., 2010. Projektowanie linii i stacji kolejowych. Warszawa, 203-209.

Szablowska P., Rochel M., 2018. Projektowanie skrzyżowań dróg z liniami kolejowymi i bocznicami w świetle nowelizacji przepisów krajowych. Autobusy - technika, eksploatacja, systemy transportowe, r 12.

Regulation of the Minister of Transport and Maritime Economy of September 10, 1998 on technical conditions that should be met by railway structures and their location (with later changes) (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987).

Technical Standards Volume X "One-level railroad crossings and parallel paths; Detailed technical conditions for the modernization or construction of railway lines up to a speed  $V_{max} \leq 200$  km / h (for conventional rolling stock) / 250 km / h (for tilting rolling stock) "issued by PKP PLK S.A. (ST 2009).

Towpik K., 2004. Infrastruktura transportu kolejowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 146-152.

Sancewicz S., 2010. Nawierzchnia kolejowa. Warszawa, 80-87.

Strail www-site, <http://www.strail.de/>, (date of access: 13.01.2019 r.).

Technical Approval, 2015. AT-07-2015-0319-00. Warszawa.

Tines www-site, <http://www.tines.pl/>, (date of access: 15.01.2019 r.).

# Ocena użyteczności przyrządu Lubri-Sensor jako narzędzia do mierzenia zawartości zanieczyszczeń w oleju silnikowym

Kacper Pawlikowski <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Institut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie  
Kacper Pawlikowski: kacper.pawlikowski@wat.edu.pl

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań 18 próbek olejów silnikowych pod kątem zawartości zanieczyszczeń. Badane próbki były starzone eksploatacyjnie w samochodach ciężarowych marki MAN. Pojazdy miały różne przebiegi pomiędzy wymianami (od 0,4 do 97,6 tys. km), okresy pomiędzy wymianami (od 5,0 do 18,2 miesiąca) oraz przebiegi całkowite (od 1,1 do 1360,5 tys. km). Badania miały za zadanie ocenę użyteczności przyrządu Lubri-Sensor jako narzędzia do kontroli stanu oleju w czasie eksploatacji. Działanie przyrządu Lubri-Sensor polega na mierzeniu różnicy stałej dielektrycznej wg skali urządzenia oleju starzonego i oleju świeżego. Na podstawie wyników badań można określić rodzaj zanieczyszczeń (związki kwasowe, cząstki metali, woda, paliwo itp.) w badanym oleju. Wyniki badań były porównywane do wyników zawartości zanieczyszczeń przy użyciu badania metodą grawimetryczną. Zanieczyszczenia były oddzielone od oleju mechanicznie przy pomocy wirówki. Z analizy wyników badań można wysunąć wniosek, że urządzenie Lubri-Sensor dobrze spełnia zakładane wymagania. Wyniki obydwu badań mają wysoki współczynnik korelacji.

**Słowa kluczowe:** olej silnikowy, zanieczyszczenia stałe, właściwości dielektryczne, Lubri-Sensor

## Investigation of the influence of solid impurities on the change of dielectric properties of engine oil

### Summary

The article presents the results of testing 18 engine oil samples for the content of impurities. The tested samples were aged in MAN trucks. Vehicles had different mileages between oil exchanges (from 0.4 to 97.6 thousand km), periods between exchanges (from 5.0 to 18.2 months) and total mileage (from 1.1 to 1360.5 thousand km). The tests were designed to assess the usefulness of the Lubri-Sensor as a tool to control the oil condition during operation. The principle of the Lubri-Sensor device is measurement of oil's dielectric constant. On the basis of the test results, it is possible to determine the type of impurities in oil (acidic compounds, metal particles, water, fuel, etc.). The test results were compared to the results obtained using the gravimetric impurity test. The impurities were separated from the oil mechanically. From the analysis of the test results it can be concluded that the Lubri-Sensor device fulfils the assumed requirements well.

**Keywords:** engine oil, solid impurities, dielectric properties, Lubri-Sensor

### 1. Wstęp

Jednym z najważniejszych płynów eksploatacyjnych w samochodach z silnikami spalinowymi jest olej silnikowy. Jego głównym zadaniem jest zmniejszenie tarcia pomiędzy poruszającymi się względem siebie elementami silnika (Baczewski i in. 2010). Pozwala to przede wszystkim na zmniejszenie ich zużycia, ale również obniżenie strat mocy powstających wskutek tarcia. Przenoszenie dużych obciążeń jest możliwe dzięki powstającemu na powierzchni trącej filmu olejowego. Mimo że do smarowania układu wystarczyłaby niewielka ilość oleju silnikowego, to do układu wprowadza się jego dużo większe ilości. Ma to zapewnić spełnianie dodatkowych funkcji i wymagań stawianych olejom silnikowym. Dzięki temu, oraz jego ciągłej cyrkulacji, możliwe jest m.in. prawidłowe

odprowadzanie ciepła powstającego podczas procesów tarcia. Dodatkowo olej powinien uszczelniać luzy współpracujących elementów, usuwać oraz unosić osady, chronić przed korozją, czy też ułatwiać uruchomienie silnika w trudnych warunkach (Golec i in. 1993).

Olej silnikowy podczas eksploatacji, ale również podczas przechowywania, ulega starzeniu, prowadzi to do powstania wielu niepożądanych składników, które negatywnie oddziałują na smarowany układ. Prowadzące do tego czynniki to głównie procesy utleniania. Powodują one powstawanie kwaśnych substancji, a to prowadzi do korozji elementów silnika i wydzielenia osadów, szlamów czy nagarów. Oprócz tego do oleju przedostają się różnego rodzaju zanieczyszczenia (zewnętrzne oraz wewnętrzne): cząstki stałe, woda, paliwo, produkty zużycia elementów silnika, płyn chłodniczy, spaliny oraz wszelkie substancję powstające podczas spalania (m.in. sadze, kwas siarkowy) (Niewczas i in. 2010). Wszystkie te czynniki powodują pogorszenie właściwości oleju silnikowego jako środka smarnego i mogą prowadzić do przyspieszenia procesu zużycia silnika. Rozpuszczalne zanieczyszczenia krążą w oleju po całym układzie smarowania, a te nierozpuszczalne powodują powstanie osadów, które unoszą się w oleju, bądź też osadzają się na elementach silnika. Gdy układ jest smarowany cienkim filmem olejowym, to dużym problemem stanowią cząsteczki stałe które powodują zużycie ścierne silnika. Przedostawanie się zanieczyszczeń stałych pomiędzy współpracujące elementy powoduje skrawanie ich powierzchni (Dziubak 2016). W celu określenia momentu, w którym olej nie spełnia już dobrze swoich zadań wprowadza się system monitorowania stanu oleju.

Dużym problemem, z którym trzeba się zmierzyć podczas monitorowaniu oleju są badania laboratoryjne, które najczęściej są bardzo pracochłonne i dostarczają informacji o ich stanie z dużym opóźnieniem. Poszukiwane są, więc, alternatywne metod, które zapewnią szybką analizę stopnia zesterzenia, przy zachowaniu dużej dokładności. Do tego celu wykorzystuje się różne metody m.in. (Baczewski i in. 2003):

- spektroskopia w podczerwieni - ustalenie grup funkcyjnych w oleju metodą absorpcyjnej spektroskopii IR;
- pochłanianie drgań akustycznych - wiskozymetry akustyczne mierzą stratę mocy fali w ośrodku (w oleju) która jest zależna od impedancji akustycznej, pozwala to na określenie lepkości;
- właściwości dielektryczne –porównanie stałej dielektrycznej oleju świeżego z olejem przepracowanym.

Artykuł skupia się na przedstawieniu metody pomiaru właściwości dielektrycznych, a dokładniej na pomiarze różnicy stałej dielektrycznej oleju przepracowanego i oleju

świeżego. Olej silnikowy jest cieczą niepolarną i zawiera niewielkie ilości substancji o charakterze polarnym, zawartych w dodatkach wykorzystywanych do jego komponowania (Baczewski i in. 2010). Ciecze niepolarne praktycznie nie zmieniają swojej przenikalności elektrycznej, niezależnie od przyłożonego napięcia (Olszewski 2001). Substancje powstające w czasie starzenia są cząsteczkami o charakterze polarnym, co powoduje zmianę właściwości dielektrycznych olejów silnikowych. Na tej podstawie można teoretycznie określić ilość i rodzaj zawartych zanieczyszczeń.

Artykuł ma na celu sprawdzenia przydatności urządzenia Lubri-Sensor, mierzącego wyżej opisane właściwości, jako przyrządu do monitorowania zawartości zanieczyszczeń. W tym celu, porównano otrzymane wyniki zmiany stałej dielektrycznej próbek olejów, (w których nie stwierdzono zanieczyszczeń w postaci wody i paliwa), do rzeczywistej zawartości zanieczyszczeń stałych, zmierzonych za pomocą metody grawimetrycznej. Do badań zostało wykorzystane 18 próbek olejów silnikowych starzonych eksploatacyjnie, pobranych z układu smarowania samochodów ciężarowych marki MAN.

## 2. Materiały i metodyka badań

### 2.1. Próbki

Do badania użyto 14 próbek oleju o klasie lepkości SAE 5W/30 oraz 4 próbki olejów o klasie lepkości SAE 10W/40. Próbki pochodzą zakładu Bury Sp. z o.o. mieszczącego się w Radomiu i zostały pobrane z samochodów ciężarowych marki MAN. Ich wykaz został przedstawiony w tabeli 1.

Tabela 2. Wykaz pobranych próbek olejów. Źródło: Opracowanie własne

Numer próbki	Model pojazdu	Przebieg całkowity, tyś. km	Przebieg między wymianami oleju, tyś. km	Okres między wymianami oleju, miesiące
1	2	3	4	5
<b>Olej spełniający normy SAE 5W/30, ACEA E4/E6/E7/E9, API CH-4/CI-4/CJ-4</b>				
1	TGM 13.250	54,7	9,8	11,4
2	TGM 13.290	1,4	1,4	12,7
3	TGM 13.290	2,1	1,1	11,7
4	TGM 18.340	1,1	1,1	11,3
5	TGM 13.290	2,1	0,4	8,9
6	TGM 13.290	3,2	1,3	11,5
7	TGX 18.440	363,8	97,6	9,5
8	TGX 18.440	367,4	85,3	18,2
9	TGX 18.440	253,4	82,0	5,2
10	TGX 18.480	113,4	53,5	5,3

1	2	3	4	5
11	TGX 18.480	171,5	77,8	11,7
12	TGS 18.440	269,1	90,1	8,9
13	TGS 18.440	269,0	81,7	8,6
14	TGS 18.440	159,0	82,9	5,0
<b>Olej spełniający normy SAE 10W/40, ACEA E6/E7, API CI-4</b>				
15	TGA 18.440	872,9	83,7	7,0
16	TGS 26.400	231,1	55,3	11,6
17	TGS 41.400	139,0	30,9	11,2
18	TGA 26.362	1360,5	44,5	11,5

Próbki były przechowywane w szklanych pojemnikach o pojemności ok. 0,5 dm<sup>3</sup>. Przed przystąpieniem do badania próbki były postawione obok siebie w celu wyrównania ich temperatury, a następnie energicznie wytrząsane przez około 2 minuty w celu równomiernego rozmieszczenia zanieczyszczeń w całej próbce.

## 2.2 Metodyka badania zawartości zanieczyszczeń metodą grawimetryczną

Badanie zostało wykonane wg metodyki własnej. W celu oddzielenia zanieczyszczeń stałych od oleju wykorzystano wirówkę K26D (rys. 1).



Rys. 1 Widok wirówki K 26D do oznaczania zawartości zanieczyszczeń. Źródło: Opracowanie własne. Siła bezwładności, która powstaje podczas wirowania, powoduje osadzanie się cząstek stałych na dnie próbki badawczej. W celu zrównoważenia układu i pozbycia się ewentualnych drgań powstających w czasie pracy urządzenia z dużą prędkością, wirowaniu zawsze podlegają dwie lub cztery próbki, o zbliżonej masie całkowitej (masa próbki

i próbki). W celu wyważenia próbek wykorzystano wagę o dokładności 0,1 g, natomiast do oznaczania zawartości zanieczyszczeń wykorzystano wagę analityczną o dokładności 0,0001 g.

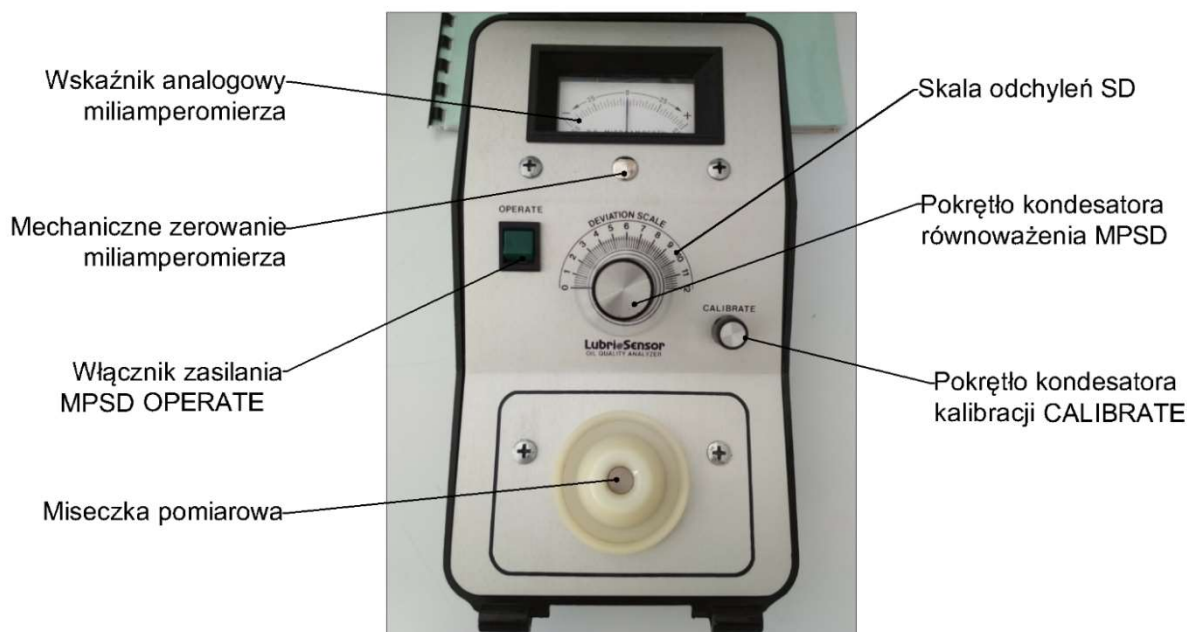
Do badania wykorzystano około 4 g próbek oleju silnikowego. W celu wymycia zanieczyszczeń z oleju wykorzystano rozpuszczalnik, benzynę ekstrakcyjną, która wcześniej została przesączona przez filtr w celu pozbycia się ewentualnych zanieczyszczeń. Rotor urządzenia wirował z prędkością ok. 3000 obr./min przez 20 minut. Dodatkowo, próbki były schładzane podczas pracy urządzenia w celu zmniejszenia ilości opar benzyny, które mogłyby stanowić zagrożenie. Powstały roztwór (olej-benzyna) był następnie zdekantowany z nad wydzielonego osadu. Wirowanie było powtarzane aż do całkowitego wymycia oleju, było to oceniane wzrokowo na podstawie zmiany koloru roztworu po wirowaniu. W praktyce oznaczało to wymywanie oleju rozpuszczalnikiem 3-4 razy. Następnie w celu całkowitego pozbycia się resztek rozpuszczalnika, próbki były suszone w suszarce w temperaturze ok. 105-110°C przez 20 minut. Probówki były chłodzone w eksykatorze w celu uniemożliwienia osadzania się wilgoci podczas ochładzania, co miałoby wpływ na wynik pomiaru. Po ostygnięciu, próbki były ponownie ważone na wadze analitycznej. Wynikiem oznaczenia była średnia dwóch wyliczeń procenta masowego zanieczyszczeń w oleju, wyznaczonego wg wzoru:

$$X = \frac{\text{masa zanieczyszczeń}}{\text{masa naważonej próbki}} \cdot 100\% \quad (1)$$

### **2.3 Metodyka badania stopnia zatarzenia olejów silnikowych za pomocą przyrządu Lubri-Sensor**

Badania przeprowadzono wg metodyki własnej. Przed przystąpieniem do właściwego badania należało skalibrować urządzenie Lubri-Sensor (rys. 2) za pomocą oleju świeżego. W tym celu należało umieścić niewielką ilość czystego oleju na miseczce pomiarowej, na której znajduje się kondensator pomiarowy. Przy pomocy pokrętła CALIBRATE należało ustawić wartość 0 na wskaźniku analogowym mikroamperomierza. Po skalibrowaniu urządzenia można było przystąpić do właściwego badania, który dzieli się na dwa etapy. W pierwszym, tak jak w przypadku oleju świeżego należy nanieść niewielką ilość próbki oleju na miseczce pomiarowej i niezwłocznie odczytać wskazanie analogowego miliamperomierza. Jeśli było to możliwe należało, poprzez manipulację pokrętłem kondensatora równoważenia mostka pomiarowego stałej dielektrycznej (MPSD), ponownie ustawić wskaźnik analogowy na wartość 0 i odczytać wartość ze skali odchylen stałej

dielektrycznej wg Lubri-Sensor. Etap drugi polega na ponownym odczytaniu obydwu wartości, co w etapie pierwszym po odczekaniu ok. 30 sekund.



Rys. 2. Przyrząd Lubri-Sensor. Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie otrzymanych wyników można określić zanieczyszczenia takie jak:

- kwasy, związki o charakterze kwaśnym, sadze, koks i produkty utleniania, jeśli kierunek zmiany stałej dielektrycznej jest w kierunku dodatnim oraz mieści się w przedziale od 0 do 50 i zachodzi zrównoważenie stałe (pomiar wykonany podczas etapu 1 jest taki sam jak w etapie 2);
- cząstki metali w przypadku, gdy wychylenie wskaźnika analogowego jest dodatnie ale wartość z etapu 1 oraz 2 nie są sobie równe, a wskazania analogowe uzyskują coraz większe wartości;
- woda lub ciecze chłodzące, gdy wychylenie jest dodatnie, ale nie można go zrównoważyć (wychylenie jest poza zakresem skali odchyłeń stałej dielektrycznej);
- paliwa, gdy kierunek zmiany stałej dielektrycznej na wskaźniku analogowym jest w kierunku ujemnym.

Za wynik badania przyjęto średnią wartość z trzech pomiarów, odchyłeń stałej dielektrycznej wg skali Lubri-Sensor. Za niepewność pomiaru przyjęto rozdzielczość urządzenia (0,1). Według literatury za wartość, która kwalifikuje syntetyczny olej silnikowy do wymiany jest wartość 7 na skali Lubri-Sensor. Zanieczyszczenia w postaci cząstek metali lub wody może świadczyć o niesprawności silnika. Stwierdzenie w badanym oleju zawartości paliwa nie dyskwalifikuje go z dalszej eksploatacji, jednak taki olej powinien zostać dodatkowo przebadany pod kątem m.in. lepkości (Baczewski i in. 2003).

### 3. Analiza wyników

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań zawartości zanieczyszczeń metodą grawimetryczną oraz przy pomocy urządzenia Lubri-Sensor. W celu zbadania czy obydwa oznaczane parametry są ze sobą powiązane zbadano ich statystyczne powiązania przy pomocy współczynnika r-Pearsona.

Tabela 3. Wyniki badań zawartości zanieczyszczeń metodą grawimetryczną oraz stałej dielektrycznej próbek olejów. Źródło: Opracowanie własne

Oznaczenie próbki	Średnia odchylen stałej dielektrycznej wg skali Lubri-Sensor		Zawartość zanieczyszczeń, % mas. (Y)	$X_i Y_i$	$X_i^2$	$Y_i^2$
	Etap I	Etap II (X)				
1	2,8	2,8	0,042	0,1166	7,84	0,0017
2	1,2	1,2	0,023	0,0270	1,44	0,0005
3	1,2	1,2	0,029	0,0346	1,44	0,0008
4	1,2	1,2	0,017	0,0209	1,44	0,0003
5	0	0	0,015	0,0000	0,00	0,0002
6	1,2	1,2	0,014	0,0171	1,44	0,0002
7	2,4	2,4	0,045	0,1091	5,76	0,0021
8	2,9	2,9	0,048	0,1399	8,41	0,0023
9	1,8	1,8	0,030	0,0539	3,24	0,0009
10	2	2	0,020	0,0396	4,00	0,0004
11	1,8	1,8	0,060	0,1071	3,24	0,0035
12	3,8	3,8	0,084	0,3201	14,44	0,0071
13	3,8	3,8	0,058	0,2198	14,44	0,0033
14	3,6	3,6	0,024	0,0871	12,96	0,0006
15	6,3	6,6	0,207	1,3635	43,56	0,0427
16	2,8	3,2	0,072	0,2301	10,24	0,0052
17	1,8	1,8	0,022	0,0402	3,24	0,0005
18	3,6	3,6	0,110	0,3959	12,96	0,0121
$\Sigma$		44,9	0,919	3,3226	150,09	0,0845
				<b>Współczynnik korelacji r</b>	<b>0,86</b>	

Obliczenia współczynnika korelacji r-Pearsona zostały wykonane na podstawie wzoru (Koronacki i in. 2001):

$$r = \frac{n * \sum X_i Y_i - \sum X_i * \sum Y_i}{\sqrt{[n * \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2][n * \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (2)$$

gdzie:

r – współczynnik korelacji liniowej Pearsona;



n – liczba próbek;

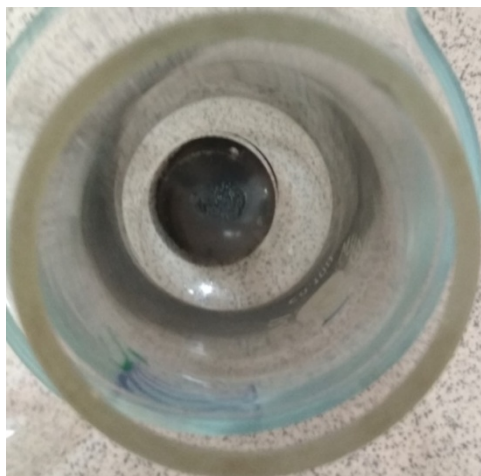
X – średnia odchylen stałej dielektrycznej wg skali Lubri-Sensor z etapu II;

Y – średnia zawartość zanieczyszczeń, % mas.

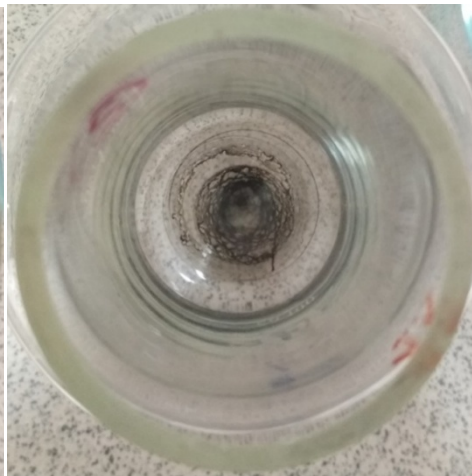
Współczynnik korelacji dla badań wynosi 0,86. Jest to korelacja dodatnia, oznacza to, że wartość obu wyników rośnie, bądź maleje w tym samym kierunku. Duży stopień korelacji oznacza, że istnieje związek między uzyskanymi wynikami.

Analizując wyniki uzyskane przy pomocy urządzenia Lubri-Sensor, można wywnioskować, że zanieczyszczenia w próbkach oleju stanowiły głównie związki o charakterze kwaśnym, sadze i koks. Tylko wyniki z próbek 15 i 16 nieznacznie różniły się w etapie I i II, ale są to na tyle małe różnice, że można je pominąć. Powstawanie kwasów, sadzy i innych zanieczyszczeń z tej grupy jest normalnym zjawiskiem w czasie eksploatacji silnika. Na podstawie uzyskanych wyników badań można założyć, że silniki wszystkich pojazdów są sprawne. Stwierdzenie braku paliwa w oleju świadczy, o szczelności wtryskiwaczy i komory spalania, natomiast brak cząstek metalicznych może świadczyć o dobrej kondycji elementów silnika.

Na rys. 3-4 przedstawiono zanieczyszczenia wymyte z próbek oleju o największym (próbka nr 15) i najmniejszym (próbka nr 6) zanieczyszczeniu.



Rys. 3. Zanieczyszczenia wydzielone z próbki nr 15  
Źródło: Opracowanie własne

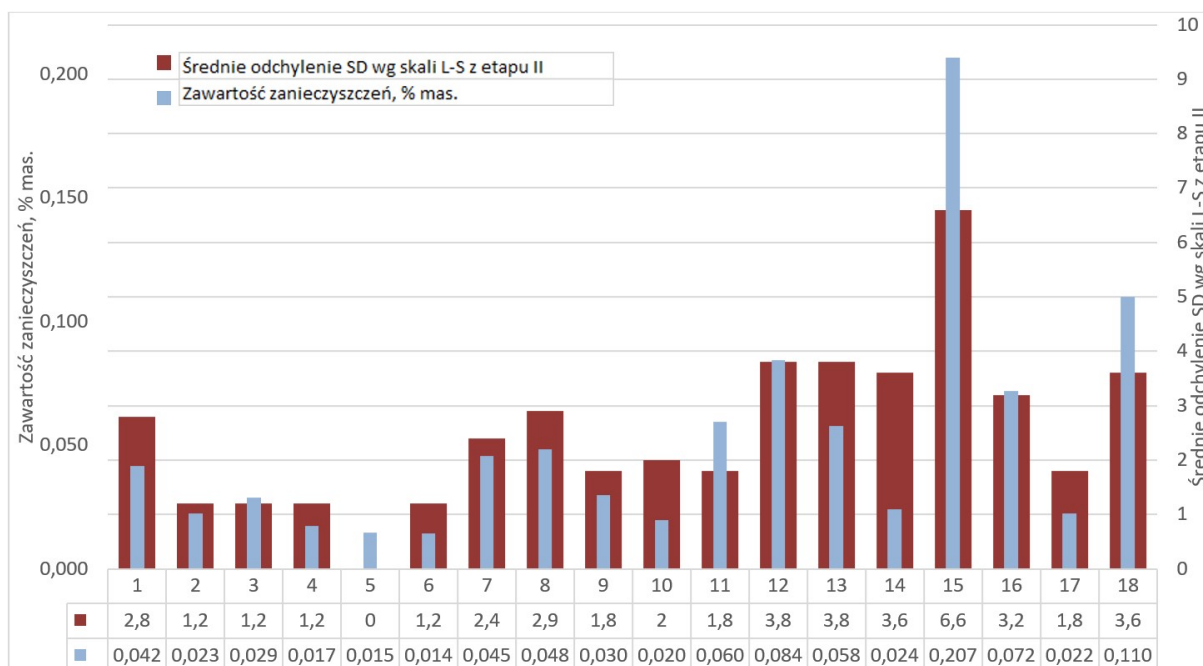


Rys. 4. Zanieczyszczenia wydzielone z próbki nr 6  
Źródło: Opracowanie własne

Wyniki zawartości nierozpuszczalnych zanieczyszczeń w próbkach mieścił się w przedziale od 0,014 do 0,207 % mas. Na podstawie tabeli 1 i 2 można zauważyć, że najmniej zanieczyszczeń miały próbki o najmniejszych przebiegach całkowitych i przebiegach pomiędzy wymianami oleju (próbki 2-6, 17) oraz próbki o większych przebiegach, ale o krótszych okresach między wymianami oleju (próbki 9, 10, 14). Natomiast największą ilość zanieczyszczeń posiadają próbki 15 i 18. Były one eksploatowane w silnikach o największych przebiegach całkowitych (odpowiednio 872,9 i 1360,5 tys. km),

może to świadczyć o nagromadzeniu się dużej ilości sadzy i nagarów w komorach silnika i układzie smarowania. Dodatkowo próbka 15 posiada niemal dwukrotnie większy przebieg niż próbka 18, co mogło przełożyć się na prawie dwukrotnie większą zawartość zanieczyszczeń w oleju.

Dodatkowo w celu lepszego zobrazowania wyniki badań zostały przedstawione w postaci wykresu (rys. 5).



Rys. 5. Średnie odchylenie SD wg skali Lubri-Sensor oraz średnia zawartość zanieczyszczeń. Źródło: Opracowanie własne

Skale obu wyników badań zostały tak dobrane, by jak najlepiej oddać korelacje między nimi. Jak widać wyniki nie pokrywają się idealnie, ale można zauważyć pewne zależności. Badanie metodą grawimetryczną nie bierze pod uwagę zanieczyszczeń pod postacią kwasów i związków kwasowych. W następnych badaniach należałoby wykonać dodatkowe oznaczenie liczby kwasowej olejów, oraz składu wydzielonych osadów podczas wirowania, a następnie przeanalizować ich wpływ na wskazania zmiany stałej dielektrycznej.

## 5. Wnioski

- Dokonując analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że urządzenie Lubri-Sensor dobrze, lecz niedoskonale, spełnia swoją rolę w badaniu zawartości zanieczyszczeń. Wyniki badań są silnie skorelowane z wynikami otrzymanymi przy użyciu metody grawimetrycznej (współczynnik korelacji r-Pearsona wynosi 0,86).
- W celu stwierdzenia przyczyn niepełnej korelacji wyników, należy wykonać dodatkowe badania laboratoryjne, takie jak oznaczenie liczby kwasowej, czy też skład wydzielonych osadów podczas wirowania.

- Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że największe zanieczyszczenia miały próbki olejów, które były eksploatowane w silnikach o największych przebiegach całkowitych. Mogło to świadczyć, o nagromadzeniu dużej ilości sadzy oraz nagarów na elementach silnika. Analogicznie najmniejsze zanieczyszczenia posiadały próbki, o najmniejszych przebiegach całkowitych oraz przebiegach pomiędzy wymianami.
- Na podstawie wyników badań oraz ich analizy można uznać, że przyrząd Lubri-Sensor może być stosowany, jako urządzenie do szybkiej i nieinwazyjnej oceny stanu oleju. Drobnym nieudogodnieniem jest przymus posiadania próbki czystego oleju, zastosowanego w układzie smarowania pojazdu w celu kalibracji urządzenia. Jednak na tle metody grawimetrycznej jest to niewielki niuans.
- W celu potwierdzenia wyników badań oraz sformułowania wniosków ogólnych należałoby wykonać większą ilość badań, na większej populacji. Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie słuszności i celowości prowadzenia dalszych badań w tym zakresie. Mogłoby to umożliwić ustalenie, wartości granicznych, które kwalifikują dany olej do wymian.

## 6 Literatura

- Baczewski K., Kałdoński T., 2003. Problemy monitorowania stanu olejów silnikowych. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, nr 1: 65-72.
- Baczewski K., Szczawiński P., Zielnik W., 2010. Płyny eksploatacyjne. Wstęp do zajęć laboratoryjnych. Wojskowa Akademia Techniczna: 192-198.
- Dziubak T., 2016. Operating fluids contaminations and their effect on the wear of elements of a motor vehicle's combustion engine. Archiwum Motoryzacji, Vol. 72, nr 2: 49-50
- Golec K., Stępień Z., 1993. Paliwa i oleje silnikowe: skrypt dla studentów Wyższych Szkół Technicznych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej: 185.
- Koronacki J., Mielniczuk J., 2001. Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: 260-272.
- Niewczas A., Wrona J., Wrona R., 2010. Zanieczyszczenia oleju smarującego oraz ich wpływ na trwałość silnika spalinowego. Autobusy Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, nr 6/2010: 2-5.
- Olszewski W, 2001. Możliwości oceny stanu jakości oleju silnikowego podczas eksploatacji za pomocą pomiaru własności dielektrycznych. Journal of Kones. Combustion Engines, Vol. 8, No 3–4: 84-85.

# Nawierzchnie na przejazdach kolejowo-drogowych

Maciej Rochel <sup>(1)</sup>

Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Instytut Inżynierii Drogowej, Kolejowej i Transportu, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
Maciej Rochel: maciek.rochel@gmail.com

## Streszczenie

Na nawierzchnię na przejeździe kolejowo-drogowym składają się dwa podstawowe komponenty: nawierzchnia kolejowa oraz nawierzchnia drogowa. W przypadkach, gdy nawierzchnie te stanowią jednolitą całość pod względem konstrukcyjnym, możemy mówić o zintegrowanej nawierzchni kolejowo-drogowej. Rozwiązanie takie jest dużym wyzwaniem dla projektanta. Projektując nawierzchnię na przejeździe kolejowo-drogowym musi on uwzględnić odmienną pracę konstrukcji drogi od pracy nawierzchni kolejowej oraz zaproponować rozwiązanie, które pozwoli wykonać trwały przejazd, bez nierówności, przy zmianie sztywności konstrukcji. Ponadto taka nawierzchnia musi spełniać wymagania zarządcy drogi publicznej, które odbiegają znacząco od warunków stawianych przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. W rezultacie miejsce styku linii kolejowej z drogą wymaga szczególnej uwagi. W artykule omówiono obecny stan prawny związany z projektowaniem przejazdów kolejowo-drogowych oraz przedstawiono rodzaje nawierzchni na przejazdach stosowana na sieci kolejowej PKP PLK S.A. Na koniec porównano wady i zalety poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** nawierzchnia drogowa, nawierzchnia kolejowa, przejazd kolejowo-drogowy.

## Level crossing surfaces

### Summary

Railway crossing surface consists of two main elements: the rail track surface and the road pavement. When the road and the rail structures are unified structurally we call it an integrated railway crossing surface. That solution is a big challenge to engineers. The level crossing designer must consider a different type of interaction between the railway and the road. Also, he should propose a solution, which will be durable, with equalized stiffness at the entry area. Additionally, the railway crossing surface must fulfil requirements of the public road administration manager, which are different from the conditions set by PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. As a result, the contact point between the railway and the road requires special attention.

In the article the Author discusses the current legal status related to the design of level crossings and presents the types of surfaces used on the PKP PLK SA railway network. Finally, the advantages and disadvantages of individual construction solutions are compared.

**Keywords:** railway track, road surface, level crossing.

### 1. Introduction

The level crossing is a one-level intersection of the railway track with a road or a path (Koc 2013). Railroad crossings in Poland can be divided into the following categories: A, B, C, D, E, F (Dz. U. 2015 poz. 1744). Regardless of the level crossing category, the following features should be determined: location, angle of crossing the road with the railway line, type and technical condition of the railway surface, width of roadways and pavements, existing profile with cross-sections of the railway line and road (Towpik 2004). Surfaces used on the railway network in Poland are, on many cases, outdated solutions with numerous defects. Modern solutions for the construction of level crossings must meet the current and future traffic requirements. Their main task is to improve safety and extend the life of the surface in the area of passage, while maintaining high operational parameters (Koc 2013).

## 2. Regulations and requirements for surfaces on level crossings

- Railroad crossing categories

In Poland, according to the national regulations (Dz. U. 2015 poz. 1744), railroad crossings are divided into six categories:

Table 1. Level crossing categories and their amount (Baza PLK)

Type	Description	Number
A	Public level crossings with barriers or without barriers, where traffic on the road is directed by authorized employees of the railway infrastructure manager either with hand signals or devices equipped with barriers closing the entire width of the road.	2 466
B	Public level crossings where traffic is routed using automatic systems equipped with traffic lights and traffic barriers closing traffic (only barriers in the direction of entry to the level crossing or in the direction of both entry and exit).	1 209
C	Public level crossings where traffic is routed using automatic systems equipped only with traffic lights.	1 405
D	Public level crossings not equipped with traffic protection systems and devices, marked only with saltire (St. Andrew's cross) to warn road users about a level crossing about a level crossing with no barriers whatsoever.	8 135
E	Public level crossings intended only for pedestrians and bicycles equipped with automatic systems or turnstiles and labyrinths.	506
F	Level crossings located on the internal non-public roads.	683
TOTAL		14 404

The level crossing category depends mainly on the traffic product (product of road and railway traffic), train speed, visibility at the crossing and the number of tracks. All crossings are protected by road warning signs, and depending on the category, also light or sound signaling and barriers. The railway infrastructure manager always deals with the maintenance of the railway crossings. It is recorded in the Act of railway transport (Dz.U. 2003 nr 86 poz. 789).

- Current national legislation

The basic document that defines the technical requirements for railroad crossings is the Regulation of the Minister of Infrastructure and Development of 20 October 2015 on technical conditions that should correspond to the intersection of railway lines with roads and their location (Dz. U. 2015 poz. 1744). It contains all the requirements for the design, construction, reconstruction, renovation and maintenance of railway line intersections and with public and internal roads. This document was updated in September 2018 with several changes in the design and executions of level crossings. The changes included: visibility conditions, the intersection angle, the longitudinal profile and route plan of the road and the railway line, as well as the location of multi-level crossing (Szabłowska i in. 2018).

In addition, detailed technical requirements can be found in:

- Regulation of the Minister of Transport and Maritime Economy of September 10, 1998 on technical conditions that should be met by railway structures and their location (with later changes) (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987),
- Instruction Id-1 "Technical conditions for maintaining the surface on railway lines" issued by PKP PLK S.A (Id-1 2005),
- Technical Standards Volume X "One-level railroad crossings and parallel paths; Detailed technical conditions for the modernization or construction of railway lines up to a speed  $V_{max} \leq 200$  km / h (for conventional rolling stock) / 250 km / h (for tilting rolling stock) "issued by PKP PLK S.A. (ST 2009).

Regulation (Dz. U. 2015 poz. 1744) focuses mainly on defining the requirements for the design of level crossings, their categorization and ways to secure them. The only information about the surface on the level crossing is found in § 30 para. 2:

"The construction of the road surface at the railroad crossing should be made using the same technical and material solutions over the entire length of the railway and road crossing and taking into account the traffic volume."

The Regulation (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987), in turn, describes the technical requirements for the railway surface at the crossing in:

§ 26 para. 1 - "Railway surface within the level crossing should have at least the same construction standard as the track surface adjacent to the crossing",

§ 26 para. 2 - "On the width of the level crossing and at a distance of 6 m on both its sides, it is not permissible to:

- change the type of sleepers and ballast in the track, as well as laying wooden sleepers within the level crossing, if the track is laid on concrete sleepers outside the crossing,
- use supported or hanging joints of rails and fenders; existing joints should be welded."

In addition, the document (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987) indicates which regulation defines the technical conditions to be met by railroad crossings, § 26 para. 3: "The technical conditions that level crossings should comply with are specified in the regulations on technical conditions that should correspond to the intersection of railway lines with roads and their location."

Instruction Id-1 issued by PKP PLK S.A. (Id-1 2005) describes the pavement requirements for rail level crossings in § 13. A part of the technical conditions derived from the regulation (Dz. U. 2015 poz. 1744) and (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987) was defined there, and the requirement to use the road surface structure from dismountable materials was added

in case of necessary works with repair and maintenance of the railway surface at the level crossing. Technical standards (ST 2009) do not introduce new requirements for road and road surface at crossings compared to Id-1 (Id-1 2005).

### 3. Types of surfaces on level crossings

An important issue when choosing a pavement construction is its durability, cost and car driving comfort. The basic materials from which the surface is made on crossings are concrete, rubber or gum-like materials. In addition, materials such as polyethylene, steel coated with epoxy and elastomers are used (Towpik 2004).

- Surfaces made of reinforced concrete slabs

Pavements made of reinforced concrete slabs are the most commonly used solution in Poland. There are two types of concrete surfaces: small-size panels for assembly without the use of heavy equipment and large-size panels.

First type of concrete level crossing surface is Mirosław type surface. This surface is used on level crossings with course of the track in the plan on straight sections and curves with a radius greater than 300m (Koc 2013). The structure consists of (Fig. 1):

- prefabricated reinforced concrete crossing plates,
- supporting beam with a length of 2.40 m (1.80 m),
- elastomeric shock absorber,
- a rubber cushioning belt,
- a rubber sealing strip (Sancewicz 2010).

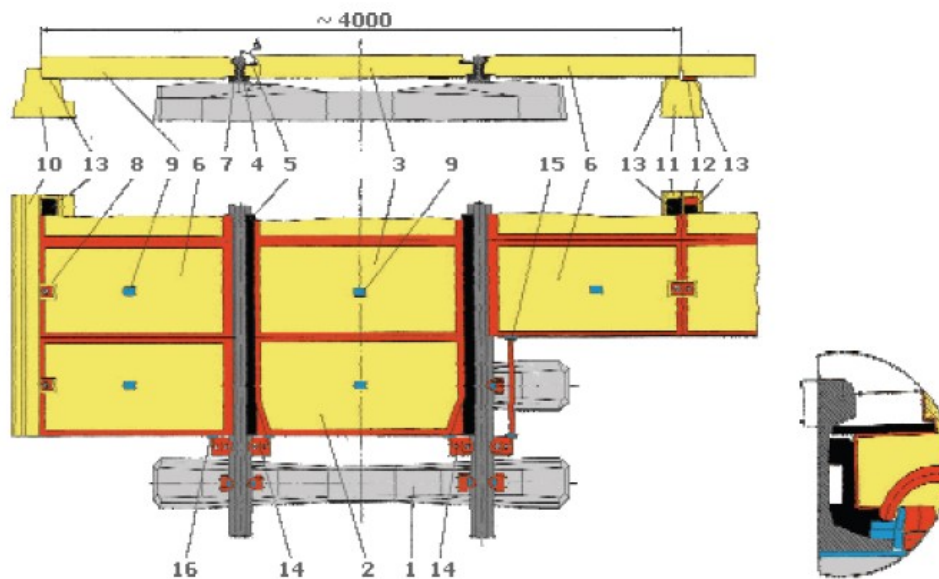


Fig. 1. Mirosław type surface (Koc 2013):1- railway sleeper; 2- outer end cross-drive plate; 3- internal drive plate; 4- internal shock absorber; 5- rubber belt; 6- external crossing plate; 7- external shock absorber; 8-screw; 9-polyurethane plug; 10,11-beam support;12-fixing strip; 13-rubber cushioning belt; 14- resistive handle; 15- way connector; 16-polyethylene cap.

The pavement elements are permanently connected to the tracks due to the elastic suspension of small-sized passage plates based on the feet of the rails. Therefore, the vertical position of the rails and the road surface are not displaced from each other during operation (Koc 2013). The advantage of the surface is the low weight of its elements, ease of assembly and disassembly of individual panels independently of each other (Sancewicz 2010) and the possibility of carrying out maintenance works in the area of passage. Disadvantage - the possibility of uneven loading of slabs in case of a sloping road to the axis of the railway line.

Other type of concrete railroad crossing surface is CBP surface. This surface is used on level crossings with course of the track in the plan on straight sections and curves with a radius greater than 800m. CBP plates have a standard length of 3 meters. In case of level crossings which width is not a multiple of 3 meters, the CBP plates are arranged with an appropriate margin. An unquestionable advantage is the proven construction of the surface (fig. 2), which consists of:

- reinforced concrete prefabricated internal drive plate,
- reinforced concrete, prefabricated inner intermediate driveway plate,
- reinforced concrete, prefabricated external crossing plate (Koc 2013).

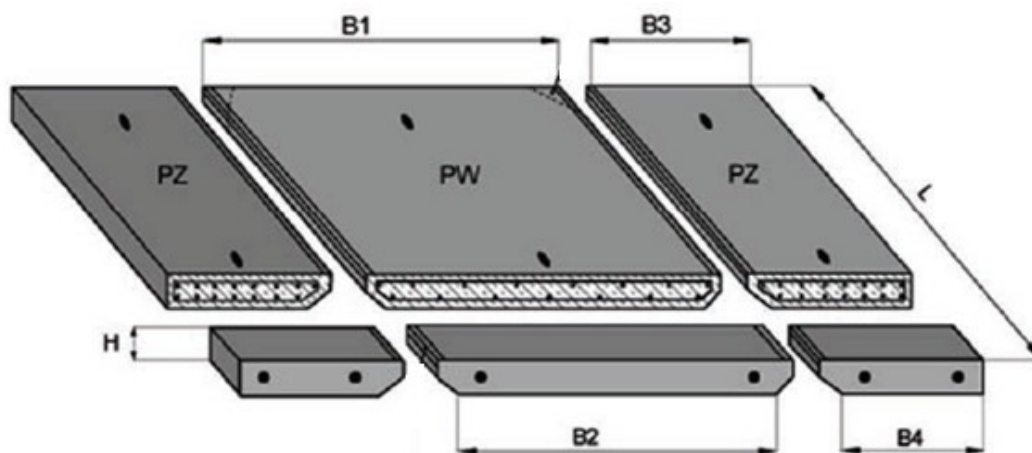


Fig. 2. CBP type surface (Koc 2013)

Large CBP boards are susceptible to pressing, moving plates and rotating them in relation to the track axis. This is due to the fact that the track surface is not permanently connected with the railway track (Massel 2010). There may also be problems with dehydration.

- Surfaces made of rubber elements

These types of surfaces significantly reduce the noise and vibration levels, they allow for adjustment to the curvature of the track. In addition, recycled materials can be used in production. Under high traffic, faster wear of pavement elements is possible.



First type of surface used commonly in Poland is STRAIL surface. STRAIL rubber plates are used on single or multi-track railroad crossings, on all types of sleepers, on straight sections of the track or in curves with radius  $R \geq 180$  m. Their structure consists of:

- external and internal rubber panels,
- concrete curb,
- cushions,
- elements connecting plates,
- steel security wedge (Koc 2013).

Rubber sheets are double-layered. The thickness of the outer layer made of high quality rubber is 7-8 mm. The inner layer is made of a vulcanising compound with reduced strength requirements (Sancewicz 2010). Depending on the application, it stands out:

- innoSTRAIL basic solution: used for heavy traffic at the intersection (length of the inner and outer plate: 90 cm),
- pontiSTRAIL: used with very high pressure on the vehicle axle or traffic (plate length 120 cm). External boards are placed on an additional aluminum plate,
- veloSTRAIL: used at pedestrian and bicycle crossings, where the traffic of rail vehicles takes place at low speed,
- pedeSTRAIL: arranged at stations and at pedestrian crossings (Koc 2013).



Fig. 3. Pontistrail type surface on level crossing in Belgium (Strail www-site)

Other type of rubber level crossing surface is ELASTrack type surface. System used at junctions of railways with cars, bicycles or as pedestrian crossings. The construction of the panels allows the surface to be installed on all types of sleepers. It can be installed on single- or multi-track railway crossings, on straight sections, on transition curves or curves with radius  $R \geq 380$ m. The surface consists of (fig. 4):

- rubber plates: an internal railway plate placed between the track rails and an external railway plate placed between the track rails,
- rubber adaptation elements to properly match the rubber plates to the shape of the sleeper,
- reinforced concrete support curbs,
- structural elements connecting plates (Technical Approval 2015).

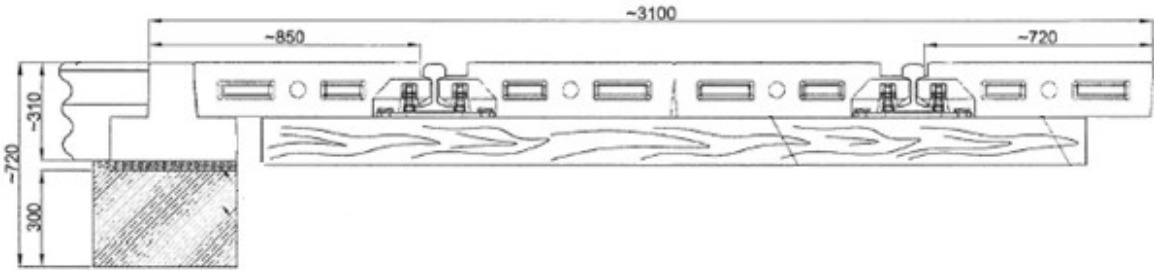


Fig. 4. Cross-section of ELASTrack level crossing surface (Technical Approval 2015)

- Integrated railroad crossing surfaces

A solution in which the railway surface together with the road surface form a uniform structure is called a integrated railroad crossing surface. The main part of this surface is a prefabricated reinforced concrete slab. The railway rails are fixed in channels using various fastening systems and filling masses. The example of integrated surface is Edilon LC-L type surface, which design ensures even and limited settling of the track and road. The basic element of the system is a prefabricated reinforced concrete slab. Steel profiles protect the edges of panels from damage by vehicle wheels. The boards can be 3.4 or 6 m long (Sancewicz 2010). Rails are fixed in the troughs with the use of flooding materials. They are also regulated by the use of washers and wedges. In this way, durability and tightness of the rail in the roadway is ensured. To adjust the position of the rail in the vertical plane, plastic washers with a thickness of approximately 60 cm are used (Sancewicz 2010).

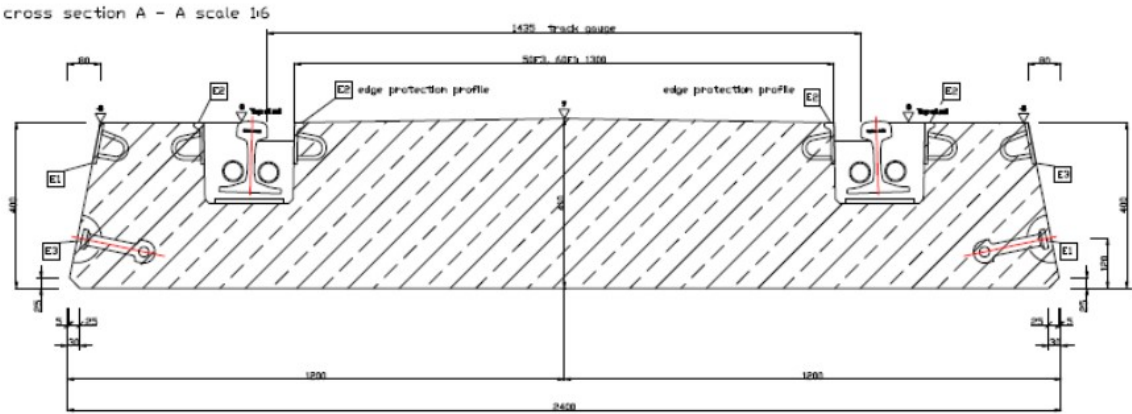


Fig. 5. Cross-section of the Edilon LC-L surface type (Tines www-site)

#### 4. Comparison of surfaces on level crossings

Table 2. Comparison of advantages and disadvantages of pavement on railroad crossings

Type of surface	Advantages	Disadvantages
Surfaces made of reinforced concrete slabs		
Miroslaw type	<ul style="list-style-type: none"> <li>• easy assembly and disassembly of individual boards independently of each other,</li> <li>• the possibility of carrying out maintenance works in the area of passage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• the possibility of uneven loading of slabs in the case of a slope at an incline to the axis of the railway line.</li> </ul>
CBP type	<ul style="list-style-type: none"> <li>• the possibility of relatively easy assembly and disassembly (the need to use heavy equipment),</li> <li>• proven design,</li> <li>• more suppliers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• the highest susceptibility to dynamic impact of vehicles (keying, moving plates and their rotation in relation to the axis of the track),</li> <li>• problems with dehydration,</li> <li>• poorly maintained surfaces generate high levels of vibration and noise.</li> </ul>
Surfaces made of rubber elements		
STRAIL type, ELASTrack type	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reduce noise and vibrations,</li> <li>• they allow adjustment to the curvature of the track,</li> <li>• recycled materials can be used in production.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• faster wear of pavement elements under intensive traffic.</li> </ul>
Integrated surfaces		
Edilon LC-L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• high durability and stability,</li> <li>• ensures even and limited settling of the track and road,</li> <li>• eliminates mutual movements of individual elements within the passage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• differences in the stiffness of the railway surface and trackbed within the level of the railway and road crossing and beyond crossing,</li> <li>• limited possibilities of disassembly of the integrated surface,</li> <li>• high price.</li> </ul>

#### 5. Summary

Many factors should be taken into consideration while choosing the right surface including from the amount of traffic at the crossing, the speed of road vehicles and trains, and the location of the level crossing in the surrounding area. Heavy integrated surface is great at crossings with large traffic, but is not necessary on all crossings due to it is higher price than standard CBP surface construction. 14 404 railroad crossings on the PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. railway network gives a large research area to test and select the appropriate passage construction.

The place where the railway line and road intersect requires special attention of the infrastructure manager, but the development of the pavement construction gives the opportunity, with the use of modern technologies, to reduce investment and maintenance costs.

#### 6. Literature

Act of railway transport of March 28, 2003 (Dz.U. 2003 nr 86 poz. 789).

Instruction Id-1 "Technical conditions for maintaining the surface on railway lines" issued by PKP PLK S.A (Id-1 2005).

Koc W., 2013. Drogi szynowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 169-185.

The Regulation of the Minister of Infrastructure and Development of 20 October 2015 on technical conditions that should correspond to the intersection of railway lines with roads and their location (Dz. U. 2015 poz. 1744).

List of railway crossings – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Massel A., 2010. Projektowanie linii i stacji kolejowych. Warszawa, 203-209.

Szablowska P., Rochel M., 2018. Projektowanie skrzyżowań dróg z liniami kolejowymi i bocznicami w świetle nowelizacji przepisów krajowych. Autobusy - technika, eksploatacja, systemy transportowe, r 12.

Regulation of the Minister of Transport and Maritime Economy of September 10, 1998 on technical conditions that should be met by railway structures and their location (with later changes) (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987).

Technical Standards Volume X "One-level railroad crossings and parallel paths; Detailed technical conditions for the modernization or construction of railway lines up to a speed  $V_{max} \leq 200$  km / h (for conventional rolling stock) / 250 km / h (for tilting rolling stock) "issued by PKP PLK S.A. (ST 2009).

Towpik K., 2004. Infrastruktura transportu kolejowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 146-152.

Sancewicz S., 2010. Nawierzchnia kolejowa. Warszawa, 80-87.

Strail www-site, <http://www.strail.de/>, (date of access: 13.01.2019 r.).

Technical Approval, 2015. AT-07-2015-0319-00. Warszawa.

Tines www-site, <http://www.tines.pl/>, (date of access: 15.01.2019 r.).

# Zasadność stosowania metody ekstrapolacji przepływów w zlewni kontrolowanej na przekroje niekontrolowane

Martyna Rukat <sup>(1)</sup>, Ewa Knap <sup>(1)</sup>, Jeremi Baran <sup>(2)</sup>, Radosław Stodolak <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Studenckie Koło Naukowe Hydrologów i Hydrotechników, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

<sup>2</sup> Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Martyna Rukat: martyna.rukat12@gmail.com

## Streszczenie

Metoda ekstrapolacji przepływów jest jednym z podstawowych narzędzi stosowanych do przenoszenia informacji wodowskazowej w zlewniach kontrolowanych. Informacja taka jest jedną z pierwszych danych, którą wykorzystuje się do wykonywania wszelkich obliczeń hydrologicznych i projektowych. Jednakże wzór stosowany we wspomnianej metodzie jest uproszczony i obciążony błędami, co tym samym przenosi się, na jakość otrzymywanej informacji.

Jako obszar badawczy wybrano trzy zlewnie górskie Beskidu Żywieckiego. Głównie zadanie pracy to wybór odpowiedniej do panujących warunków metody pomiaru prędkości przepływu oraz weryfikacja wyników pomiarów terenowych z danymi uzyskanymi w oparciu o metodę ekstrapolacji.

**Słowa kluczowe:** ekstrapolacja, Beskid Żywiecki, młynek hydrometryczny

## Relevance of using method of extrapolation of flows in the controlled catchment to in controlled sections

### Summary

The method of extrapolation of flows is one of the basic tools used to transfer water level indicator in formation in controlled catchments. This information is one of the first data to be used for all hydrological and design calculations. However, the model used in this method is simplified and subject to errors, which translates into the quality of the information received.

Three mountain basins of the Beskid Żywiecki were selected as there search area. The maint ask is to select a method of flowvelo city measurement appropriate to the prevailing conditions and to verify the results of field measurements with the data obtained based on the extra polation method.

**Keywords:** extrapolation, Beskid Żywiecki, current meter

## 1. Wstęp

Istotą wszelkich analiz i obliczeń stosowanych w hydrologii i w hydrotechnice jest wartość wielkości przepływu. Najprostszą drogą do uzyskania takiej informacji jest bezpośredni pomiar w terenie. Problem stanowią koszty wybudowania i eksploatacji stacji pomiarowo-kontrolnych, w odpowiednim zagęszczeniu na obszarze zlewni. Wg „Metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia...” opracowanej przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich w 2009 roku do określenie wielkości przepływu dla krótkich ciągów pomiarowych ( $N < 30$  lat) w zlewniach kontrolowanych, kiedy przekrój obliczeniowy nie pokrywa się z przekrojem wodowskazowym, powinno stosować się metodę ekstrapolacji przepływu. We wzorze tym najważniejszym parametrem fizjograficznym, który informuje o wielkości przepływu jest powierzchnia zlewni. Jednakże na wielkość odpływu wody wpływa szereg innych czynników

takich jak dynamiczna zmiana zagospodarowania i charakter użytkowania zlewni, spadki terenu, rozłożenie głównych dopływów czy chociażby szorstkość. Już sam fakt tego podaje w wątpliwość zasadność stosowania metody ekstrapolacji. Wszystkie te czynniki były przyczynkiem do zweryfikowania stosowania metody ekstrapolacji. Istnieje kilka technik bezpośredniego pomiaru przepływu wody w cieku. Zaliczyć do nich można metody takie jak pomiar prędkości młynkiem hydrometrycznym, pomiar prędkości prędkościomierzem akustycznym, metodę wolumetryczną czy metodę chemiczną. Dobór metody uzależniony jest od wielkości cieku, warunków przepływu wody, wymaganej dokładności pomiarów i od sprzętu, jaki mamy do dyspozycji.

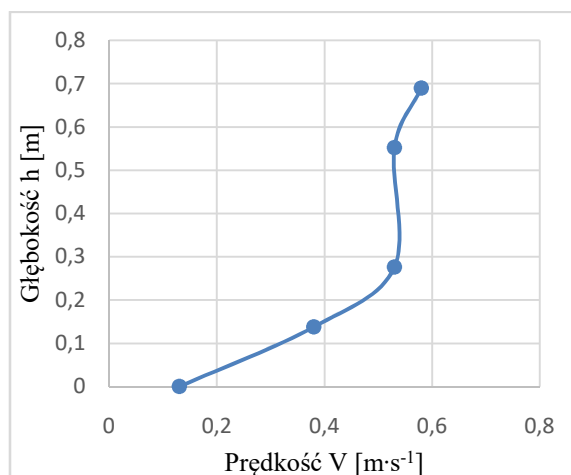
## **2. Młynek hydrometryczny**

Młynek hydrometryczny obok ADCP jest najczęściej stosowanym przyrządem do pomiaru prędkości płynącej wody. Pomiar polega na rejestracji liczby obrotów osadzonego na osi wirnika, którego ruch nadawany jest przez przemieszczającą się strugę. Zastosowany w pomiarach młynek to młynek typu europejskiego z poziomą osią, której wirnik stanowią łopatki. Pomiar wykonywany jest przez równoległe ustawienie młynka do kierunku płynącej strugi. Pomiar powinien być wykonywany na odcinkach prostych, na którym zwierciadło wody wolne jest od spiętrzeń. Unikać należy również odcinków o dużej burzliwości ruchu, gdyż uzyskane z pomiaru dane mogą być zaniżone (Byczkowski, 1999). Zasadę rozmieszczenia pionów pomiarowych w przekroju geometrycznym rzeki zostało ustalone przez IMGW. Należy zaznaczyć, że rozkład prędkości płynącej wody zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej nie jest równomierny. Rumowisko osadzone na dnie cieku powoduje znaczne opory ruchu, toteż przepływ w tym miejscu będzie osiągał najniższą wartość. Im bliżej strefy przypowierzchniowej, tym prędkości przepływu będą rosły. Zatem na kształt tachoidy, która prezentuje rozkład prędkości w pionie będzie miał wpływ szereg czynników takich jak rodzaj rumowiska, szorstkość koryta i brzegów i kierunek wiatru. Przykładową tachoidę wraz z wartościami prędkości dla rzeki Kamesznica prezentuje Tab. 3 oraz Rys. 1.

Mając pole ograniczone tachoidą, zwierciadłem wody i osiami współrzędnych oblicza się powierzchnię figury, a z niej prędkość średnią w danym pionie hydrometrycznym. Kolejny etap to obliczenie prędkości średniej w całym przekroju pionowym oraz poprzecznym. Mając pomierzony przekrój poprzeczny z prostej zależności prędkości przepływu i powierzchni, można obliczyć natężenie przepływu.

Tab. 5 Rozkład prędkości w pionie pomiarowym na rzece Kamesznica

Głębokość h [m]	Prędkość V [m·s <sup>-1</sup> ]
0	0.13
0.138	0.38
0.276	0.53
0.552	0.53
0.69	0.58



Rys. 30 Tachoida rozkładu prędkości w pionie

### 3. ADCP

Akustyczny dopplerowski przepływomierz profilujący podczas pomiaru wykorzystuje zjawisko Dopplera, które polega na zmianie częstotliwości fali akustycznej, przechodzącej przez ośrodek będący w ruchu – w tym przypadku rozwór wodny, wysłanej i odebranej przez źródło, które porusza się względem fali. Przyrząd mierzy przesunięcie Dopplera częstotliwości odbitych impulsów i na tej podstawie wylicza prędkość i przepływ w mierzonym przekroju. Zaletą ADCP jest fakt, że pomiar prędkości odbywa się w sposób ciągły i ostatecznie wyznacza on całkowity przepływ w przekroju (Wójcik K., Wdowikowski M. 2014). Pomiar odbywa się prostopadle do linii brzegu, a fala emitowana jest z czterech nadajników. Dodatkową zaletę stanowi fakt, że przy urządzeniach ADCP zainstalowany jest nadajnik GPS, dzięki czemu ściągając dane pomiarowe, mamy je zorientowane w przestrzeni.

### 4. Metoda ekstrapolacji

Wg Metodyki obliczania przepływów (Metodyka, 2009) w zlewniach kontrolowanych, gdy przekrój obliczeniowy pokrywa się z przekrojem wodowskazowym i istnieje długa, minimum 30 letnia seria czasowa przepływów maksymalnych rocznych, do obliczenia przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia stosuje się

metody statystyczne. W przypadku krótszych serii obserwacyjnych ( $N < 30$  lat) należy je uzupełnić korzystając z zależności regresyjnych. Jeżeli przekrój obliczeniowy na cieku kontrolowanym nie pokrywa się z przekrojem wodowskazowym, należy zastosować odpowiednio metodę interpolacji bądź ekstrapolacji przepływu. Jeśli przekrój obliczeniowy znajduje się powyżej przekroju wodowskazowego to powierzchnia jego zlewni nie powinna być mniejsza od połowy powierzchni zlewni wodowskazu. Wzór ekstrapolacyjny (Fal i Stachy 1986), (1) zawiera w sobie następujące dane:

$$Q_x = \left(Q_w \frac{A_x}{A_w}\right)^n \quad (1)$$

gdzie:

$Q_x$  – przepływ w przekroju niekontrolowanym [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$Q_w$  – przepływ w przekroju wodowskazowym [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$A_x$  – powierzchnia zlewni do przekroju niekontrolowanego [ $\text{m}^2$ ]

$A_w$  – powierzchnia zlewni do przekroju wodowskazowego [ $\text{m}^2$ ]

$n$  – parametr równania ekstrapolacyjnego; przyjęto  $n = 1$  dla przepływów niskich i średnich

Opisany wzór zakłada uproszczenie w postaci równości odpływów jednostkowych w przekroju obliczeniowym i przekroju kontrolowanym.

## 5. Opis obszarów badawczych

Obiektem badawczym były zlewnie trzech cieków Beskidu Żywieckiego: Ujsoty, Kameszniczanka oraz Żabniczanka. Wszystkie one są dopływami rzeki Soła i są zlewniami kontrolowanymi. Podstawowe informacje o ciekach oraz ich zlewniach zestawiono w Tab.1.

Tab. 6 Podstawowe informacje o ciekach

Nazwa	Długość [km]	Powierzchnia zlewni [ $\text{km}^2$ ]	Powierzchnia zlewni do wodowskazu [ $\text{km}^2$ ]
Ujsoty	14,32	105,90	102,86
Kameszniczanka	10,32	49,50	48,18
Żabniczanka	12,59	37,03	23,96

Wg podziału Kondrackiego (Kondracki, 2009) rozpatrywany obszar zalicza się do prowincji Zewnętrznych Karpat Zachodnich, mezoregionu Beskid Żywiecki. Przez obszar ten przebiega Wielki Europejski Dział wodny. Budowa geologiczna badanego obszaru to głównie skały fliszowe, piaskowce i zlepieńce (Stupnicka, 2007). Klimat zaliczany jest go klimatu górskiego z wysoką ilością opadów. Opad średni roczny wynosi około 1030 mm,



miesiącem najbardziej wilgotnym jest czerwiec i lipiec, zaś miesiącem o najmniejszej ilości opadu jest październik. Średnioroczna temperatura powietrza osiąga wysokość 5,2°C. Najcieplejszy miesiąc to lipiec ze średnią temperaturą 15°C, a najchłodniejszym jest styczeń ze średnią temperaturą -5,7°C. Okres wegetacyjny trwa około 160 dni (Lipski, Kostuch, Ryczek, 2005). Opracowywane zlewnie w przeważającej większości pokryte są lasami i gruntami ornymi (Corine Land Cover 2012). Podstawowe charakterystyki fizyczno-geograficzne prezentuje Tab.2.

Tab. 7 Charakterystyki fizyczno-geograficzne

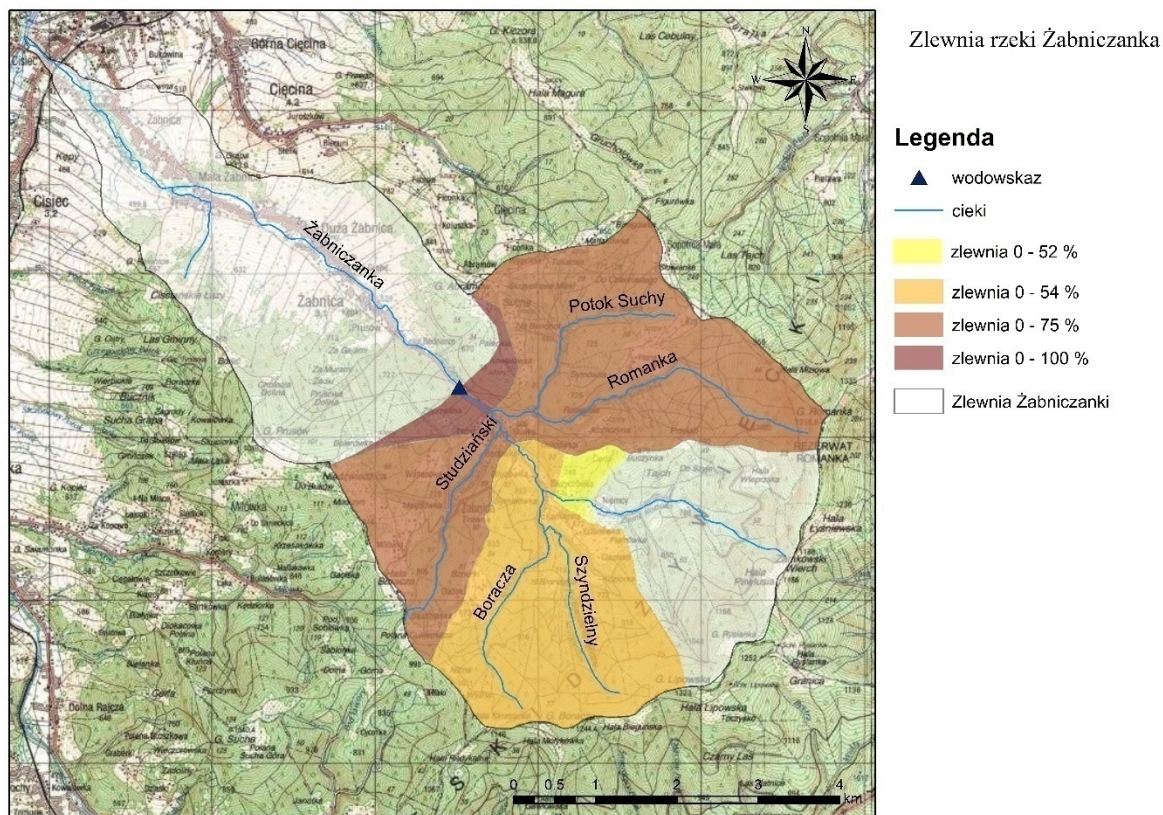
	Ujsoły	Kamesznica	Żabniczanka
Wysokość maksymalna zlewni [m n. p. m.]	1140,00	1219,00	1320,00
Wysokość maksymalna działu wód [m n. p. m.]	1140,20	1219,60	1323,30
Wysokość minimalna zlewni [m n. p. m.]	499,00	438,00	427,00
Wysokość minimalna działu wód [m n. p. m.]	499,00	438,00	427,00
Wysokość średnia zlewni [m n. p. m.]	320,50	390,50	446,50
Spadek średni zlewni [%]	6,23	11,09	14,68
Spadek rzeki [%]	2,87	5,38	5,78

## 5. Metodyka

Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie wyznaczono przekroje zamykające kolejne zlewnie cząstkowe w programie ArcGIS 10.4.1. opierając się na Mapie Hydrograficznego Podziału Polski w skali 1:10 000 w układzkie PUWG 1992. Przekroje te wg zaleceń umieszczono na prostych odcinkach rzeki. Należy zaznaczyć, że zlewnie te nie zmniejszają się z równomiernym interwałem, gdyż było to fizycznie niemożliwe, ze względu na dopływające do wybranych rzek cieków. Wyznaczone zlewnie cząstkowe dla rzeki Żabniczanka prezentuje Rys.1. Wyniki obliczeń w oparciu o wzór ekstrapolacji przepływów prezentuje Tab. 4.

Drugi etap polegał na przeprowadzeniu badań prędkości przepływu w wyznaczonych wcześniej przekrojach. Ze względu na niskie stany wody w czasie, w którym przeprowadzono badania oraz ze względu na ukształtowanie dna koryta cieków niemożliwym był pomiar ADCP, zdecydowano się na pomiar młynkiem hydrometrycznym. Składał się on z dwóch części: pomiaru głębokości przy użyciu sond oraz pomiaru prędkości przepływającej wody (Bodziony, 2006). Rozmieszczenie sondowań oraz pionów hydrometrycznych wyznaczono wg metody IMGW. Z uzyskanych danych pomiarowych określono tachoidy krzywych rozkładu prędkości, z których otrzymano średnią prędkość w pionie. Następnie obliczono

objętość przepływu w danym przekroju, jako sumę iloczynów pól cząstkowych oraz średnich prędkości przepływu wody. Ostatnim krokiem było porównanie otrzymanych wyników.



Rys. 31 Żabniczanka - zlewnie cząstkowe

Tab. 8 Natężenie przepływu uzyskane metodą ekstrapolacji

Ujsoły										
Przyrost zlewni [%]	100			70			68			50
Q ekstr. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	1.04			0.86			0.78			0.65
Kameszniczanka										
Przyrost zlewni [%]	100	97	93	80	68	64	62	54	52	50
Q ekstr. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.28	0.28	0.26	0.26	0.16	0.16	0.15	0.12	0.12	0.11
Żabniczanka										
Przyrost zlewni [%]	100			75			54			50
Q ekstr. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.33			0.27			0.23			0.21

## 6. Wyniki i dyskusja

Na podstawie pomiarów terenowych wyznaczono wartości natężenia przepływu w wybranych przekrojach rzek Beskidu Żywieckiego i porównano z wartościami uzyskanymi metodą ekstrapolacji przepływu. Wyniki te zestawiono w Tab. 5 – 7. Obliczono procentową różnicę w uzyskanych wartościach i przedstawiono na Rys. 3.

Tabela 9 Zestawienie wyników dla rzeki Ujsoły

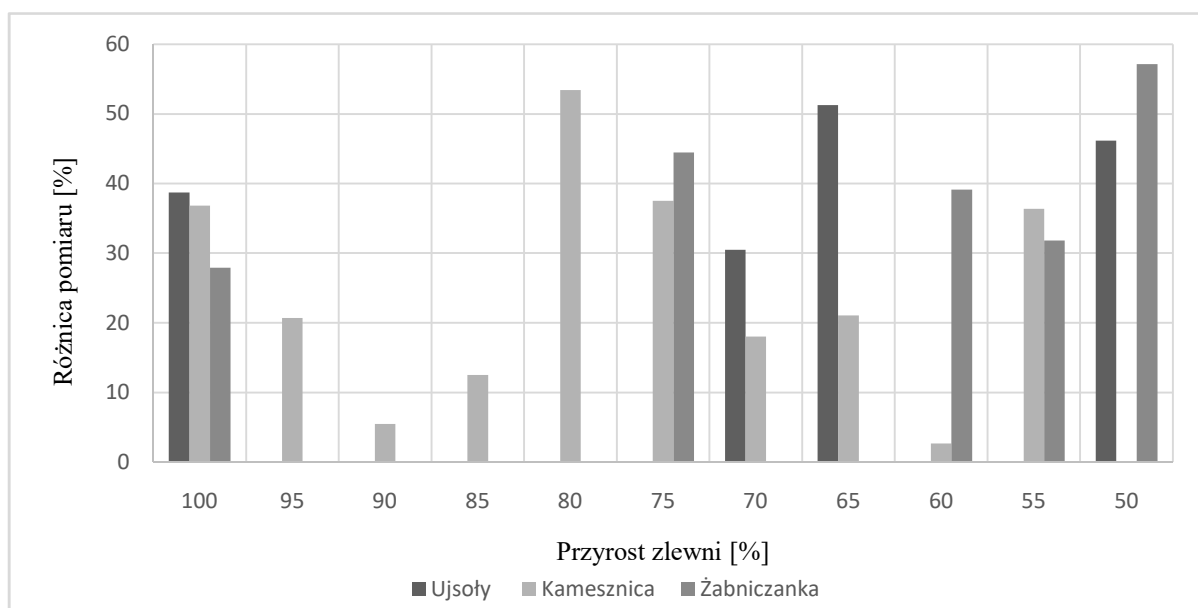
Przyrost zlewni [%]	100	70	68	50
Q ekstr. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	1.04	0.86	0.78	0.65
Q pom. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.64	0.57	0.38	0.35
Różnica [%]	39	30	51	46

Tabela. 10 Zestawienie wyników dla rzeki Kameszniczanka

Przyrost zlewni [%]	100	97	93	80	68	64	62	54	52	50
Q ekstr. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.28	0.28	0.26	0.26	0.16	0.16	0.15	0.12	0.12	0.11
Q pom. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.18	0.34	0.24	0.29	0.25	0.22	0.18	0.15	0.11	0.07
Różnica [%]	37	21	5	12	53	38	18	21	3	36

Tabela 11 Zestawienie wyników dla rzeki Żabniczanka

Przyrost zlewni [%]	100	75	54	52	50
Q ekstr. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.33	0.27	0.23	0.22	0.21
Q pom. [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	0.24	0.15	0.14	0.15	0.09
Różnica [%]	28	44	39	32	57



Rys. 32 Różnice między przepływem obliczonym i pomierzonym dla poszczególnych rzek

Jeśli wziąć pod uwagę fakt, że przepływ jest kluczową informacją służącą do projektowania budowli hydrotechnicznych, która między innymi decyduje o klasie obiektu, co jednoznacznie przekłada się na koszty jego budowy, różnice w uzyskanych wynikach są zdecydowanie zbyt duże. Informacja o przepływie wykorzystywana jest również w procesie kalibracji tworzonych modeli hydraulicznych i hydrologicznych, które służą między innymi do wyznaczania stref zalewu wody. Jest to kolejny dowód na to jak istotny problem został poruszony w artykule. Warto, więc zastanowić się czy nie należałoby zastosować korekty do wzoru ekstrapolacji, żeby uwzględnić wszystkie znaczące parametry, mające wpływ na ilość odprowadzanej wody ze zlewni. Należy również pamiętać, że pomiary zostały prowadzone w strefie stanów niskich, więc należałoby zweryfikować otrzymane dane prowadząc regularny ciąg pomiarowy.

## **7. Literatura**

Bodziony M., 2006. Hydrologia materiały pomocnicze, Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Zakład Hydrologii.

Byczkowski A., 1999 Hydrologia, wydanie II, Wydawnictwo SGGW, Warszawa

Fal B., Stachy J., 1986. Zasad obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych, Instytut Budowy Dróg i Mostów, Warszawa

Kondracki J. (2009) Geografia regionalna Polski, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN

Lipski C., Kostuch R., Ryczek M., 2005. Charakterystyka hydrologiczna górnej części zlewni Soły na tle warunków fizjograficznych, klimatu i użytkowania, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich

Stowarzyszenie Hydrologów Polskich, 2009. Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ

Stupnicka E., 2007. Geologia Regionalna Polski, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa

Wójcik K., M. Wdowiskowski, 2014. Współczesne metody instrumentalnego pomiaru prędkości przepływu wody w korytach otwartych

# Przegląd materiałów kompozytowych typu FML wraz z przykładową analizą MES

Paweł Stabla <sup>(1)</sup>, Michał Smolnicki <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska  
Paweł Stabla: pawel.stabla@pwr.edu.pl

## Streszczenie

Artykuł składa się z części opisowej charakteryzujące materiały kompozytowe z szczególnym uwzględnieniem laminatów metalowo-włóknistych (FML). Scharakteryzowano podstawowe własności i zadania elementów składowych materiału kompozytowego. Przedstawiono najważniejsze materiały obecnie stosowane oraz badania związane z FML z osnową termoplastyczną. Przeprowadzono przykładową symulację metodą elementów skończonych w środowisku ABAQUS. Symulacji poddano element składający się dwóch blach stalowych 42CrMo4 oraz warstwy prepregu z włóknem szklanym w osnowie poliamidu PA6. Dane materiałowe otrzymano wykorzystując oprogramowanie ElamX2, stosując różne modele materiałowe: zasada mieszanin, model Pucka, model Halpin-Tsai. Otrzymano wykres siły reakcji od przemieszczenia stempla. Nie zauważono znacznych różnic w wynikach dla różnych modeli materiałowych. Nieznacznie wyższe wartości siły reakcji otrzymano w przypadku modeli Pucka i Halpin-Tsai.

**Słowa kluczowe:** laminat metalowo-włóknisty, analiza MES, materiały kompozytowe, zginanie trójpunktowe

## FML composite materials: review and FEM analysis

### Summary

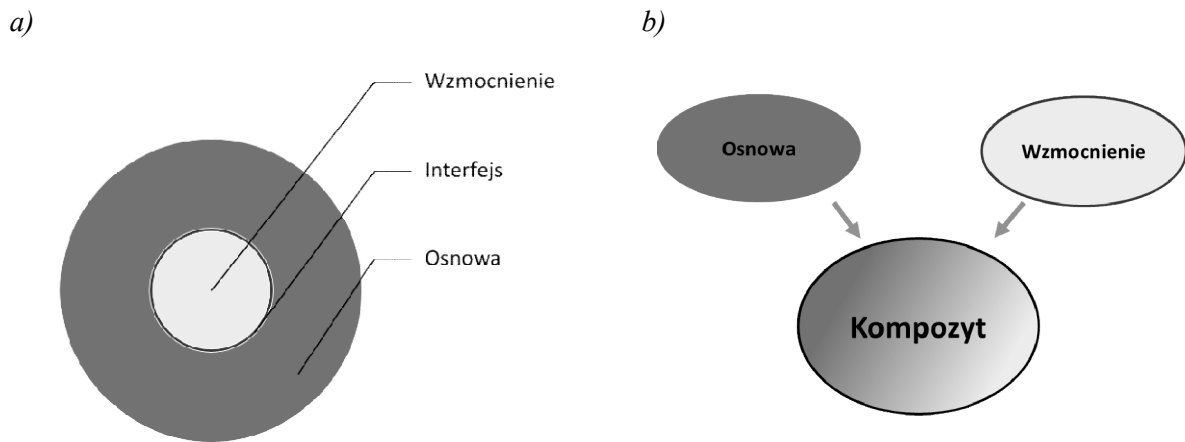
The article consists of a descriptive part characterizing composite materials with particular emphasis on metal-fiber laminates (FML). The basic properties and tasks of the composite material components are characterized. The most important materials currently used and research related to FML with a thermoplastic matrix are presented. An example of finite element simulation was carried out in the ABAQUS environment. The element consisting of two 42CrMo4 steel sheets and the prepreg layer with glass fiber in the PA6 polyamide matrix was subjected to simulation. Material data was obtained using the ElamX2 software, using various material models: the rule of mixtures, the Puck model, and the Halpin-Tsai model. A plot of reaction force was obtained from the displacement of the lading pin. There were no significant differences in the results for different material models. Slightly higher values of reaction force were obtained for the Puck and Halpin-Tsai models.

**Keywords:** fibre metal laminates, FML, FEM, composites, three-point bending

### 1. Materiały kompozytowe

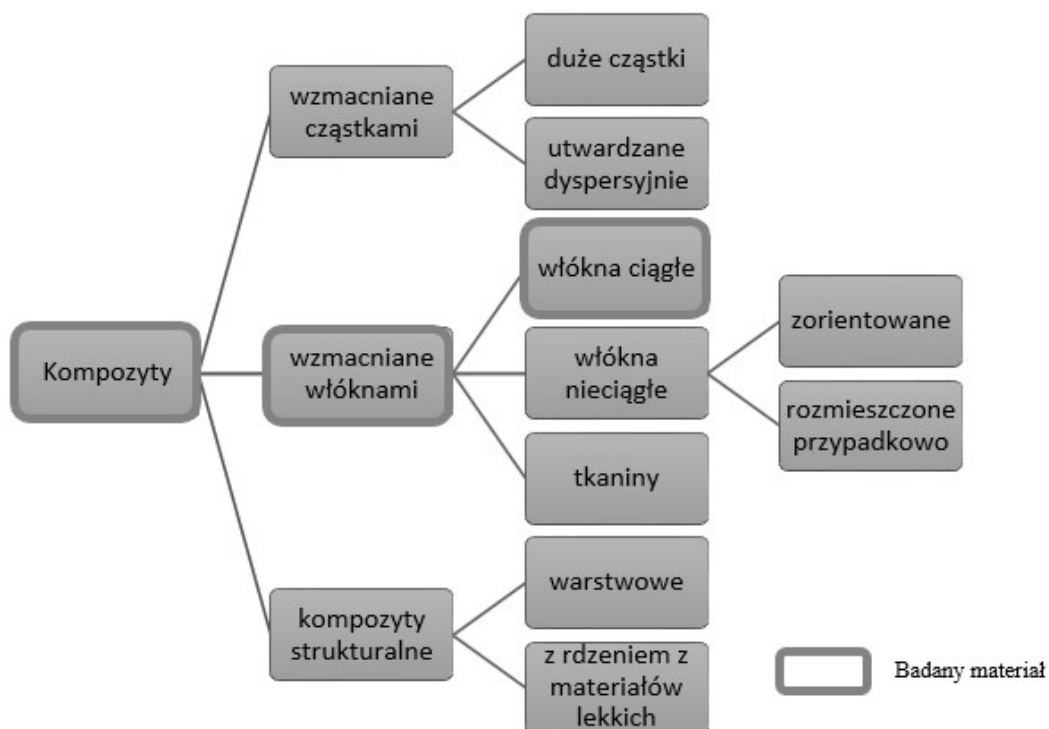
Od dziesięcioleci materiały kompozytowe zdobywają coraz szersze zainteresowanie inżynierów z wielu dziedzin nauki z całego świata. Materiał kompozytowy utworzony jest z połączenia dwu lub więcej wyraźnie różnych komponentów. Pierwszym elementem jest osnowa, drugim natomiast wzmocnienie, zwane również zbrojeniem (Rys. 33). Połączenie to ma na celu uzyskanie materiału o właściwościach wyższych niż wynikałoby to z prostego sumowania właściwości pojedynczych składników – tzw. efekt synergiczny. Wzmocnienie, szczególnie w postaci włókien, zapewnia głównie sztywność i wytrzymałość. Osnowa zaś wiąże włókna w całość, przez co przyłożone obciążenia mogą być przenoszone płynnie przez włókna kompozytu (Barbero 2013). Po uprzednim przygotowaniu wzmocnienia (np. poprzez

preparację powierzchniową włókien (Bełzowski 2007) na granicy osnowa-wzmocnienie powstaje warstwa graniczna, zwana również interfejsem (Rys. 33).



Rys. 33 Struktura kompozytu, jako połączenia osnowy i wzmocnienia (a) oraz idea budowy kompozytu (opracowanie własne)

Podział kompozytów może zostać przeprowadzone na wiele sposobów, jednak jednym z najczęstszych jest podział ze względu na osnowę lub wzmocnienie. Zróżnicowanie kompozytów pod względem zbrojenia pokazano na Rys. 34 (Dobrzański 2006).



Rys. 34 Podział kompozytów ze względu na rodzaj wzmocnienia (za Dobrzański 2006)

Osnowa w kompozytach wzmacnianych włóknami posiada następujące zadania:

- ustala położenie włókien w żądanej geometrii oraz utrzymuje włókna we wzajemnej odległości,
- łączy włókna ze sobą, a co za tym idzie powoduje przenoszenie obciążenia przez kolejne włókna,
- przejmuje część obciążeń mechanicznych, zwłaszcza wywołanych pod wpływem naprężeniem poprzecznych i ścinających,
- wspomaga włókna podczas obciążeń ściskających w kierunku wzdłuż wzmocnienia, przeciwdziałając w ten sposób wyboczeniu,
- w przypadku laminatów łączy poszczególne warstwy, przenosząc siły z jednej laminy na kolejną,
- w przypadku osnowy odpornej na obciążenia dynamiczne możliwe jest powstrzymanie rozrostu pęknięcia,
- zabezpiecza włókna przed wpływem środowiska zewnętrznego, np. przed ścieraniem mechanicznym, promieniowaniem itd. (Schürmann 2007).

Oprócz wyżej wymienionych zadań, osnowa, poprzez swoje właściwości, determinuje takie właściwości kompozytu jak: zakres temperatur pracy kompozytu, odporność chemiczna, odporność na zużywanie ściernie.

Do materiałów, które mogą spełniać rolę osnowy w kompozytach można zaliczyć: polimery, metale oraz ceramiki. Osnowy polimerowe są obecnie najbardziej powszechne ze względu na ich łatwość w produkcji bardzo skomplikowanych geometrycznie elementów oraz stosunkowo małe nakłady inwestycyjne, zarówno związane z narzędziami jak i infrastrukturą produkcyjną (Barbero 2013).

Tab. 12. Właściwości wybranych żywic duroplastycznych (Królikowski 2012; Schürmann 2007)

Żywica	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$R_m$ [MPa]	E [GPa]	$\epsilon_w$ [%]	$T_{max}$ [°C]
Poliestrowa	1,23	70	3,8	2,3	80
Winyloestrowa	1,04	85	3,3	5	120
Epoksydowa	1,14	75	5	5	175

Osnowy polimerowe można podzielić na trzy główne grupy: duroplastyczne, termoplastyczne i elastomerowe. Do najczęściej stosowanych należy osnowa duroplastyczna ze względu na łatwość impregnacji włókien żywicą (stosunkowo niska lepkość) oraz sam proces wytwarzania laminatu.

Tab. 13. Właściwości wybranych termoplastów (Królikowski 2012; Schürmann 2007)

Termoplast	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$R_m$ [MPa]	E [GPa]	$T_g$ [°C]	$T_t$ [°C]	$T_{max}$ [°C]
PA6	1,13	64	2	70	250	100
PET	1,37	70	3,1	100	265	100
PC	1,20	75	2,4	150	300	130

Włókna wzmacniające mają decydujący wpływ na właściwości wytrzymałościowe i konstrukcyjne kompozytów. Odpowiedzialne są one za przenoszenie obciążeń, a więc determinują naprężenia maksymalne, jakim może być poddany podczas pracy dany kompozyt. Do podstawowych oferowanych przez producentów wzmocnień kompozytów należą:

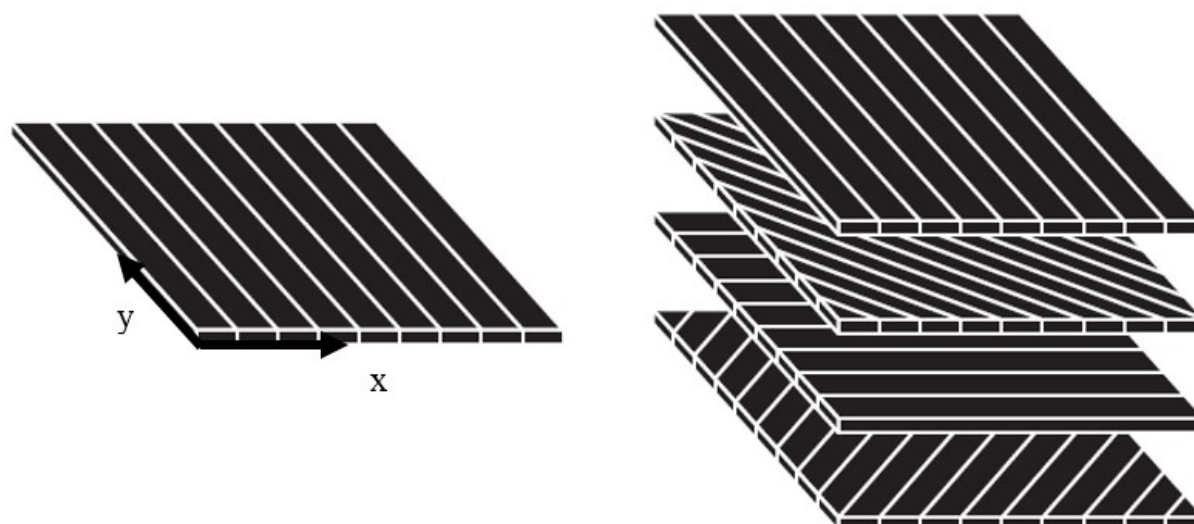
- Roving – jest to pasmo kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy włókien biegnących w przybliżeniu równolegle. Z rovingu następnie wytwarza się maty, tkaniny i taśmy stosowane jako wzmocnienie elementów powłokowych i płytowych o budowie warstwowej.
- Mata – wykonuje się ją najczęściej z rovingu ciętego na odcinki około 25-50 mm, które rozłożone są w chaotyczny sposób w płaszczyźnie kompozytu. w celu zapewnienia spójności, odcinki rovingu posklejane są tzw. lepiszczem.
- Tkanina – taki rodzaj wzmocnienia stosowany jest często na konstrukcje powłokowe. w tkaninach włókna nie biegną prostoliniowo, a więc ich wytrzymałość nie jest w pełni wykorzystana. w celu uniknięcia tego zjawiska zalecane jest stosowanie tkanin modułowych, zawierających kilka delikatnie zszywanych warstw wzmocnionych jednokierunkowo.
- Taśmy jednokierunkowe – wytwarzane są z rovingu biegnącego wzdłużnie oraz z bardzo małej ilości włókien poprzecznych, których zadaniem jest zachowanie spójności oraz sztywności w kierunku poprzecznym.

Oprócz powyższego podziału istnieje również rozróżnienie ze względu na strukturę wzmocnienia włóknistego:

- Wzmocnienie włóknem krótkim, które rozłożone jest chaotycznie. Włókna, uprzednio pocięte na odcinki o długości do kilku milimetrów zostają zatopione w osnowie. Ponieważ orientacja takich włókien jest losowa, wzrost wytrzymałości kompozytu w stosunku do wytrzymałości osnowy jest umiarkowany – wynosi najczęściej do 100%. Taki rodzaj wzmocnienia stosowany jest często w kompozytach o osnowie termoplastycznej wykonywanych metodą wtrysku.
- Wzmocnienie jednokierunkowe włóknem ciągłym (UD). Taka struktura wyróżnia się bardzo dużą wytrzymałością i sztywnością wzdłuż kierunku ułożenia włókien. Występuje przy tym bardzo duża anizotropia, gdyż wytrzymałość w kierunku poprzecznym jest porównywalna najczęściej z wytrzymałością osnowy.



- Wzmocnienie wielowarstwowe – laminat. Laminat utworzony jest z dwóch lub więcej warstw (*lamina*) połączonych ze sobą w celu uzyskania oczekiwanych właściwości. Warstwy mogą różnić się grubością, orientacją włókien oraz mogą być utworzone z różnych materiałów. Przykładem laminatu jest laminat metalowo-włóknisty (Bełzowski 2007; Geyer et al. 2008).



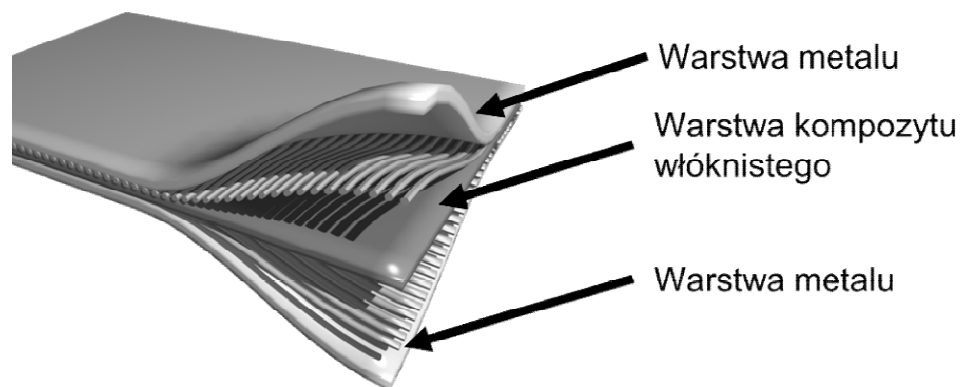
Rys. 35 Warstwa włókien UD (po lewej) oraz laminat (po prawej) o kodzie  $[90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ]$  (opracowanie własne)

Tabela 14 Wybrane parametry najczęściej stosowanych włókien (Schürmann 2007)

	Aramidowe		Szkłane		Węglowe		
	Standard	HM	E-Glass	S-Glass	HT	IM	UHM
<b>E [GPa]</b>	67	130	73	87	230	240	450
<b>v</b>	0,32	0,32	0,22	0,22	0,23	0,20	0,20
<b>R<sub>m</sub>[MPa]</b>	2800	2800	2400	4500	3430	4210	2150
<b>ρ [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,44	1,45	2,54	2,49	1,74	1,74	1,90

## 2. Kompozyty metalowo-włókniste

Kompozyty metalowo-włókniste (ang. *Fibre-metal laminates*) oznaczane, jako FML to kompozyty strukturalne, które mają postać laminatu – a wśród warstw, z jakich się one składają, znajdują się zarówno metalowe jak i złożone z kompozytów włóknistych. Dlatego też nazywamy je także kompozytami hybrydowymi. Aluminium oraz zwykłe kompozyty włókniste mogą być stosowane w konstrukcjach zamiast stali w celu zmniejszenia ich kosztu i ciężaru. Jednak stosowanie tych materiałów niesie ze sobą również wady takie jak: słaba wytrzymałość zmęczeniowa w przypadku aluminium oraz niska udamność i wytrzymałość szczątkowa. w celu zminimalizowania tych wad zaproponowano wykorzystanie obu materiałów jednocześnie, jako składowych kompozytu warstwowego. Na uniwersytecie w Delft pokazano, że tempo wzrostu pęknięć jest niższe w materiale utworzonym przez warstwy połączone adhezyjnie niż w jednolitym materiale (Sinmazçelik et al. 2011).



Rys. 36 Schematyczne przedstawienie typowego kompozytu metalowo-włóknistego (wikipediacommons)

**ARALL** (ang. *Aramid Fibre Reinforced Aluminium Laminate*) to pierwszy kompozyt metalowo-włóknisty, jaki został wytworzony. Składa się on z warstw wytworzonych ze stopów aluminium oraz włókien, aramidowych w osnowie epoksydowej. w porównaniu do tego samego elementu wykonanego ze stopu aluminium wykazuje on większą wytrzymałość w kierunku włókien i mniejszą w kierunku doń prostopadłym. Zgodnie z omówioną powyżej teorią prezentował on wysoką odporność na rozwój pęknięć zmęczeniowych, jednak testy w warunkach rzeczywistych pokazały jego wrażliwość na wysokie lokalne obciążenia (prowadzące do pęknięcia włókien i zniszczenia materiału) (Godzimirski and Pietras 2002). ARALL był wykorzystywany m. in. przy konstrukcji skrzydeł Fokkera 27 oraz drzwi Boeing C-17 Cargo (Krishnakumar 1994; Sinmazçelik et al. 2011).

W **GLARE** (ang. *Glass laminate aluminium reinforced epoxy*), w przeciwieństwie do ARALL-a, zastosowano włókna szklane. Podobnie jak ARALL Glare wykazuje lepsze własności mechaniczne po kierunku włókien od stopów aluminium, a gorsze w kierunku poprzecznym. Badania prowadzone w Delft (Vlot and Gunnink 2001) wykazały, że Glare jest bardziej wytrzymały na uderzenia niż ARALL. Przy niskich prędkościach uderzenia obcego obiektu ta wytrzymałość jest porównywalna z wytrzymałością stopów aluminium, a przy większych prędkościach jest nawet znacznie większa. Wśród innych wyróżniających właściwości należy wymienić ogniotrwałość. Glare znalazł swoje zastosowanie np. jako materiał na poszycie Boeinga 777 czy Airbusa A320. Glare umożliwia zmniejszenie masy elementów o 10-20% (Bigg and Preston 1989).

**CARALL** (ang. *Carbon Reinforced Aluminium Laminate*) także został opracowany na uniwersytecie w Delft. w porównaniu do ARALL jest znacznie sztywniejszy a dzięki podwyższonej sztywności tempo przyrostu pęknięć zmęczeniowych jest zredukowane. Wytwarzany jest metodą laminowania ręcznego (Sathyaseelan et al. 2015; Sinmazçelik et al. 2011).

Oprócz powyżej wymienionych opartych na aluminium kompozytach metalowo-włóknistych obecnie wytwarzane są także te oparte na tytanie i stali. W tabeli 4 pokazano materiały z jakich buduje się kompozyty metalowo-włókniste.

Tabela 4 Zestawienie materiałów typu FML i ich komponentów (Dincă, Ștefan, and Stan 2010)

	<b>Składnik metalowy</b>	<b>Włókno / Składnik polimerowy</b>
<b>ARALL</b>	Aluminium 7075-T6	Włókno aramidowe / BSL-312-UL Włókno aramidowe / AFI63-2
<b>Glare</b>	Aluminium 2024-T3 Aluminium 7475-T761	Włókno szklane (S2) / FM94 Włókno szklane (S2) / FM906
<b>CARALL</b>	Aluminium 2024-T3	Włókno węglowe (S2) / żywica epoksydowa
<b>TiGr</b>	Tytan $\beta$ Ti-15-3	Włókno węglowe (IM7) / poliamid
	Stal AISI301	Strafil C-EP 1-150 / żywica epoksydowa

### 3. Termoplastyczne laminaty metalowo-włókniste

W odróżnieniu od kompozytów hybrydowych posiadających osnowę duroplastyczną, laminaty metalowo-włókniste o osnowie termoplastycznej są obecnie najczęściej tylko przedmiotem badań naukowców. Istnieje wiele pozytywnych cech tych laminatów, które powodują, że zainteresowanie nimi ciągle wzrasta. Do tych właściwości należą przede wszystkim (Asundi and Choi 1997; Schürmann 2007):

- krótszy czas przetwarzania niż w przypadku osnowy duroplastycznej,
- możliwość recyklingu wytworzonych elementów,
- łatwość w formowaniu i kształtowaniu,
- większa możliwość naprawy niż w przypadku laminatów o osnowie duroplastycznej,
- bardzo dobra międzywarstwowa wytrzymałość na pękanie (*ang. interlaminarfracturetoughness*),
- dobre właściwości tłumiące.

Oprócz tych zalet istnieją jednak również wady wpływające na ograniczenie możliwości zastosowania tych laminatów. Są to m.in.:

- wysoka lepkość termoplastu (przykładowo lepkość PP wynosi  $\eta=138$  Pa\*s, dla duroplastów natomiast  $\eta=0,7$  Pa\*s). Wymusza to używanie stosowanie wysokich ciśnień w procesie impregnacji, a za tym idzie droższe i bardziej wytrzymałe maszyny,

- impregnacja włókien tworzywem termoplastycznym może zachodzić tylko wtedy, gdy jest on w stanie ciekłym. Wymaga to zastosowania wysokiej temperatury, co z kolei wpływa na występowanie naprężeń cieplnych po zastygnięciu materiału.

Obecnie dostępne na rynku są laminaty składające się warstwy termoplastu bez wzmocnienia włóknem oraz zewnętrznych warstw metalu. Ze względu na brak wzmocnienia termoplastu, laminaty te cechują się ograniczonymi właściwościami wytrzymałościowymi i sztywność. Znalazły jednak zastosowaniu, jako elementu dobrze tłumiące drgania oraz ograniczające hałas. Aktualnie na rynku dostępne są m. in. następujące produkty (Osiecki et al. 2015):

- BONDAL<sup>®</sup> - termoplastyczna osnowa/stal,
- ALUCOBOND<sup>®</sup> - termoplastyczna osnowa/aluminium,
- LITECOR<sup>®</sup> - termoplastyczna osnowa/stal,
- HyLite<sup>®</sup> - termoplastyczna osnowa/aluminium.

Ważnym czynnikiem utrudniającym wdrożenie laminatów metalowo-włóknistych o osnowie duroplastycznej jest wysoki koszt wytwarzania takich materiałów. Wynika on głównie z konieczności stosowania wysokich temperatur procesu laminowania oraz z ciśnienia, jakie jest wymagane do impregnowania włókien przez termoplast o wysokiej lepkości. Taki proces może być przeprowadzony prawidłowo tylko pod warunkiem jego zautomatyzowania, co generuje koszty i wydłuża czas amortyzacji inwestycji (Bigg and Preston 1989).

Tabela 5 Porównanie właściwości laminatów metalowo-włóknistych o włóknach ciągłych z konstrukcjami metalowymi (Osiecki et al. 2014)

	Laminat z osnową termoplastyczną	Laminat z osnową duroplastyczną	Konstrukcje metalowe
<b>Czas wytwarzania</b>	+	-	++
<b>Formowalność</b>	+	-	++
<b>Właściwości tłumiące</b>	++	+	-
<b>Tolerancja na uszkodzenia</b>	++	+	-
<b>Wytrzymałość</b>	+	++	-
<b>Sztywność</b>	+	++	-
<b>Udarność</b>	++	-	-
<b>Wytrzymałość zmęczeniowa</b>	++	+	-
<b>Niska gęstość</b>	++	+	-
<b>Łatwość recyklingu</b>	+	-	++

++bardzo dobre

+dobre

-słabe

#### 4. Analiza MES

Jako część obliczeniową zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji zginania trójpunktowego przykładowego laminatu metalowo-włóknistego. Materiał ten składa się z dwu skrajnych warstw blachy stalowej 42CrMo4 oraz prepregu z włókna szklanego

w osnowie poliamidu PA6 w komercyjnej postaci Celstran ® CFRP-TP PA6 GF60-01. Dane materiałowe prepregu przedstawiono na rys. 5.

Rodzaj włókien	Szklane
Rodzaj osnowy	PA6
Zawartość obj. włókien	48%
Zawartość wagowa włókien	60%
Gęstość prepregu	1,690 [g/cm <sup>3</sup> ]
Moduł Younga w kierunku włókien	30,1 [GPa]
Wydłużenie przy zerwaniu	2,42%
Wytrzymałość na rozciąganie	705 [MPa]
Wytrzymałość na zginanie	765 [MPa]
Temperatura topnienia	220 [C°]
Temperatura zeszklenia	57 [C°]

Rys. 37 Dane materiałowe stosowanego w symulacji prepregu (karta produktu: Celstran ® CFRP-TP PA6 GF60-01)

Obliczenia numeryczne wykonano z wykorzystaniem różnych modeli otrzymywania stałych inżynierskich. Posłużył do tego program ElamX2 z Technische Universität Dresden. z wielu modeli wykorzystane zostaną:

- Zasada mieszanin (ROM),
- Puck,
- Halpin-Tsai.

Dzięki zastosowaniu programu ElamX2 otrzymano następujące własności materiałowe:

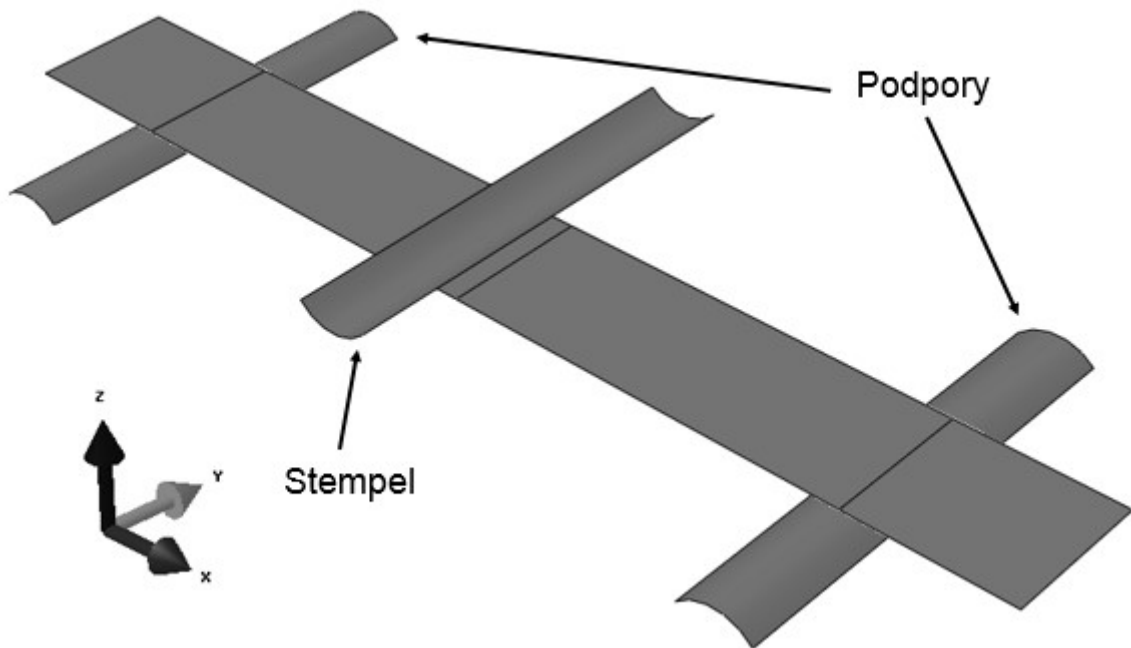
Tabela 6 Dane materiałowe prepregu z włókien szklanych w osnowie PA6 stosowane podczas analizy metodą elementów skończonych

Modele		$E_{\parallel}$ [MPa]	$E_{\perp}$ [MPa]	$\nu_{\perp\parallel}$	$G_{\perp\parallel}$ [MPa]
1.	Zasad mieszanin	30300	4792	0,330	1717
2.	Model Puck'a	30300	7226	0,330	2666
3.	Dane katalogowe	30100	-	-	-

Analizując powyższe dane zauważyć można, iż wynik końcowy algorytmów obliczania wzdłużnego modułu Younga oraz liczby Poissona są takie same w przypadku obydwu przytoczonych modeli obliczeniowych. Dane te posłużyły, jako informacje wejściowe do budowy modelu materiałowego niezbędnego do przeprowadzenia analizy metodą elementów skończonych.

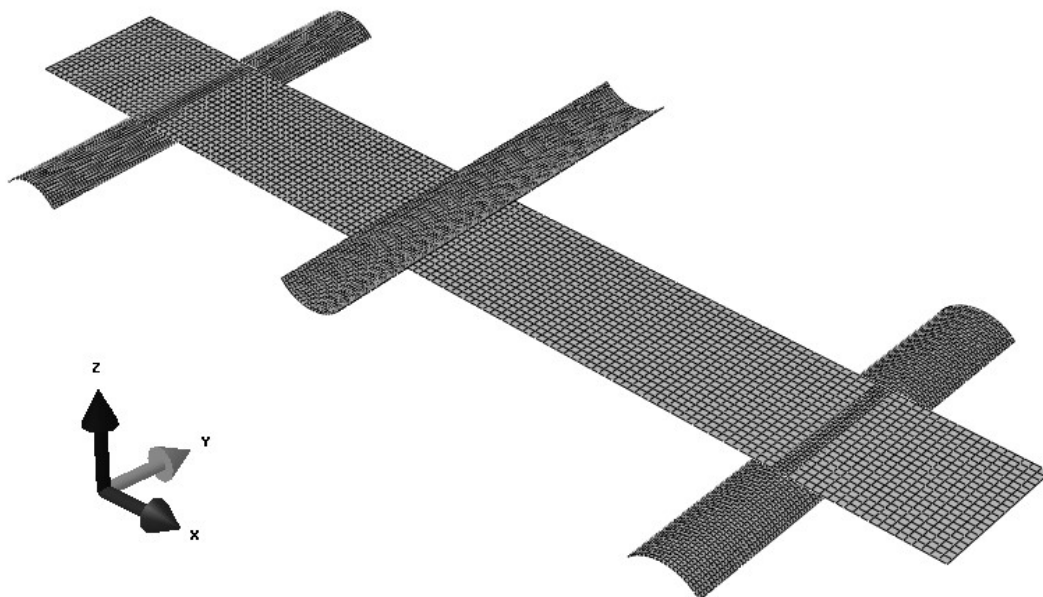
Analizę numeryczną metodą elementów skończonych (MES) przeprowadzono w środowisku SIMULIA ABAQUS przy wykorzystaniu modeli powierzchniowych. Stworzono model podpór i stempla, jako *rigid body*, aby jak najlepiej odzwierciedlić rzeczywiste oprzyrządowanie do zginania trójpunktowego.

Model geometryczny przedstawiono poniżej na Rys. 38.



Rys. 38 Schemat geometryczny

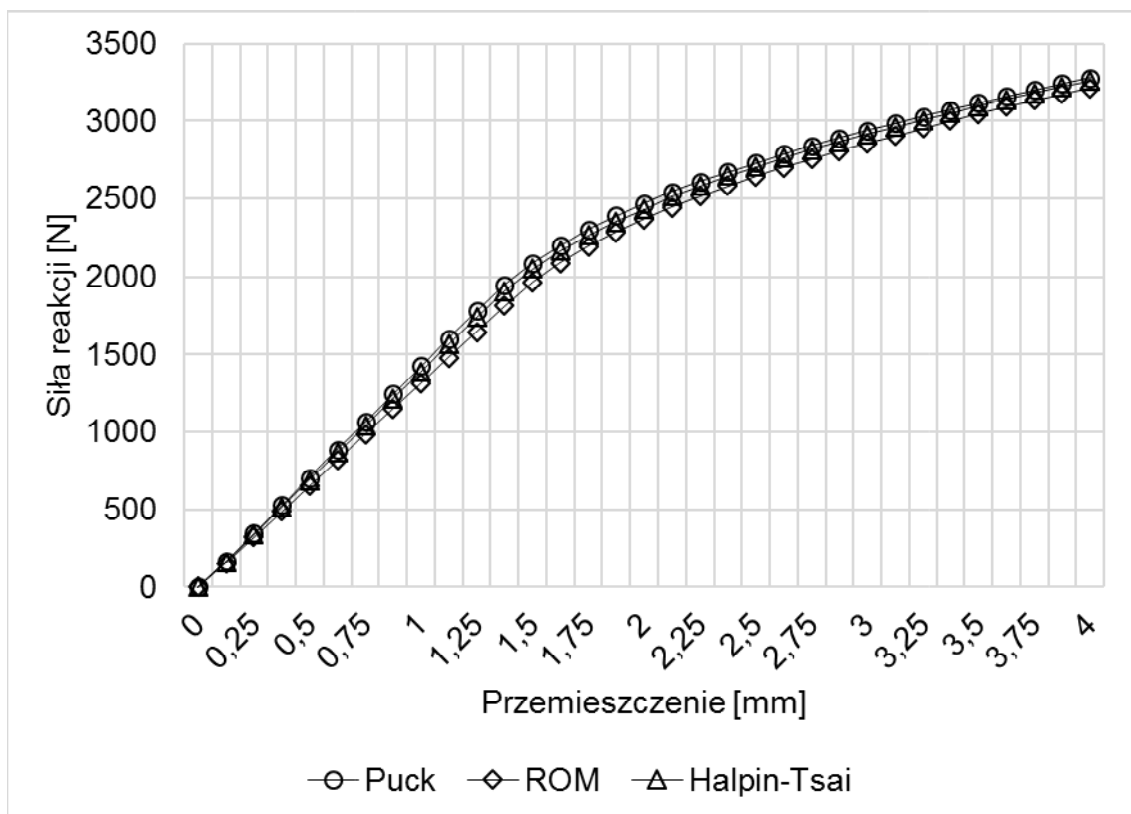
Model dyskretny składał się z 2800 elementów typu S8R (w przypadku laminatu) oraz 7200 elementów typu R3D4 (2 podpory i stempel). Model został przedstawiony na Rys. 39.



Rys. 39 Model dyskretny złożenia

## 5. Wyniki analizy MES

Rezultatem symulacji zginania trójpunktowego jest zależność siły reakcji na stempelu od jego przemieszczenia. Analizę tę przeprowadzono dla trzech modeli materiałowych. Wyniki przedstawiono na wykresie na Rys. 40.



Rys. 40 Porównanie reakcji na stemple dla różnych modeli materiałowych

## 6. Wnioski

Nowoczesne materiały kompozytowe, w tym laminaty metalowo-włókniste, są bardzo ważną częścią przemysłu, szczególnie lotniczego. Co wyróżnia te materiały od szeroko stosowanych materiałów izotropowych, takich jak stopy żelaza, metale nieżelazne i inne, to możliwość projektowania wymaganej wytrzymałości w zadanym kierunku. Laminaty FML, dzięki zastosowaniu dodatkowych warstw metalowych, poszerzają zasięg zastosowań materiałów kompozytowych. Laminat metalowo-włóknisty z osnową termoplastyczną nie jest jeszcze szeroko stosowanym materiałem. Wynika to z wielu problemów technologicznych oraz materiałów. Niemniej, w świetle wielu zalet związanych z możliwościami przetwórczymi oraz recyklingiem, materiały te zyskują coraz szersze zainteresowanie naukowców.

Przeprowadzono symulację zginania trójpunktowego laminatu metalowo-włóknistego zbudowanego z dwu blach stalowych, jako warstw zewnętrznych oraz wewnętrznej warstwy prepregu włókna szklanego w osnowie poliamidu PA6. Dane materiałowe otrzymano w wyniku zastosowania różnych modeli. Zdecydowano się skorzystać z modelu wbudowanych w oprogramowanie ElamX2, tj. model zasady mieszanin, model Pucka, model Halpin-Tsai. w wyniku symulacji otrzymano wykres siły reakcji w funkcji przemieszczenia dla poszczególnych modeli materiałowych. Nie zauważono znacznych różnic w przebiegu

krzywych zginania trójpunktowego. Nieznacznie wyższe wartości siły reakcji otrzymano w przypadku modeli Pucka i Halpin-Tsai.

## 7. Literatura

Anon. n.d. Karta Produktu : Celstran ® CFRP-TP PA6 GF60-01.

Asundi, A. and Alta Y. N. Choi. 1997. "Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft." *Journal of Materials Processing Technology* 63:384–94.

Barbero, Ever J. 2013. *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus*. 1st ed.

Bełzowski, Andrzej. 2007. *PODSTAWOWE WIADOMOŚCI o PRÓBACH WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH*. Wrocław.

Bigg, D. M. and J. R. Preston. 1989. "Stamping of Thermoplastic Matrix Composites." *Polymer Composites* 10(4):261–68.

Dincă, Ion, Adriana Ștefan, and Ana Stan. 2010. "Aluminum/Glass Fibre and Aluminum/Carbon Fibre Hybrid Laminates." *INCAS BULLETIN* 2(2):33–39.

Dobrzański, Leszek. 2006. "Podstawy Nauki o Materiałach i Metaloznawstwo." 1599.

Geyer, Anna, Sebastian Rau, Veys Stephane, Jere Hikkinen, and Tommi Perala. 2008. *Optimal Design of Composite Laminates*.

Godzimirski, Jan and Agata Pietras. 2002. "Badania Hybrydowych Kompozytów Warstwowych Typu FML." *Technologia i Automatyzacja Montażu* 52–56.

Krishnakumar, S. 1994. "Fiber Metal Laminates — The Synthesis of Metals and Composites." *Materials and Manufacturing Processes* 9(2):295–354.

Królikowski, Wacław (1927-). 2012. *Polimerowe Kompozyty Konstrukcyjne*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

Osiecki, Tomasz, Colin Gerstenberger, Alexander Hackert, Adam Czech, Patryk Nossol, Tadeusz Łagoda, Adam Niesłony, and Lothar Kroll. 2015. "Metal/Composite Hybrids for Lightweight Applications." *Machine Dynamics Research* 39(4):117–23.

Osiecki, Tomasz, Holger Siedlitz, Colin Gerstenberger, Lothar Kroll, and P. Sholtz. 2014. "Customized Metal/Composite Hybrids for Automotive Applications." Pp. 29–36 in *Conference on Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry*. Inst. für Metallformung.

Sathyaseelan, P., K. Logesh, M. Venkatasudhahar, and N. Dilip Raja. 2015. "Experimental and Finite Element Analysis of Fibre Metal Laminates (FML'S) Subjected to Tensile, Flexural and Impact Loadings with Different Stacking Sequence." *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS* 15(3):23–27.

Schürmann, Helmut. 2007. *Konstruieren Mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer.



Sinmazçelik, Tamer, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, and Onur Çoban. 2011. “A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods.” *Materials & Design* 32(7):3671–85.

Vlot, Ad. and Jan Willem. Gunnink. 2001. *Fibre Metal Laminates : An Introduction*. Springer Netherlands.

# Metody wytwarzania sfer węglowych oraz sposób ich formowania

Piotr Staciwa <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Institut Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Piotr Staciwa: piotr.staciwa@zut.edu.pl

## Streszczenie

Sfery węglowe ze względu na interesujące właściwości fizyko-chemiczne wzbudzają duże zainteresowanie. W pracy opisano najważniejsze metody otrzymywania sfer węglowych oraz możliwości ich modyfikacji. Ze względu na zapotrzebowanie energetyczne podczas przetwarzania prekursora węglowego metody zostały podzielone na wysoko i niskotemperaturowe. Dla poszczególnych metod przybliżony został także mechanizm tworzenia się sfer oraz możliwości zmiany parametrów procesu mające na celu uzyskania materiału o odpowiednich właściwościach.

**Słowa kluczowe:** sfery węglowe, materiały węglowe, sposób wytwarzania

## Methods for carbon spheres production and creation mechanism

### Summary

Due to the extraordinary physico-chemical properties carbon spheres are becoming very interesting. In this research the essential methods for carbon spheres production and their modification possibilities have been investigated. These methods due to the energy requirement have been distinguished to high and low temperature. For the respective methods the mechanism of sphere creation was described. Possibilities of the tuning of processes conditions have been also investigated.

**Keywords:** carbon spheres, carbon materials, creation mechanism

### 1. Wstęp

Od czasu odkrycia fulerenów i nanorurek węglowych nanomateriały węglowe cieszą się dużym zainteresowaniem. Do rodziny nanomateriałów węglowych możemy zaliczyć: fulereny, nanorurki, włókna oraz porowate struktury sferyczne (Coville i in. 2011). Te ostatnie charakteryzują się bardzo rozwiniętą powierzchnią właściwą, porowatością oraz odpornością fizyczną i chemiczną (Samanta i in. 2012). Właściwości te determinują szerokie możliwości aplikacyjne sfer węglowych, m. in. w procesach katalitycznych, adsorpcyjnych, elektrochemicznych oraz magazynowania energii. Stale wzrastająca emisja CO<sub>2</sub> stanowi duże zagrożenie dla środowiska (Xiaoping i in. 2014). Wysoka wartość powierzchni właściwej oraz duża zawartość mikroporów czyni ten materiał najbardziej efektywnym stałym adsorbentem gazów cieplarnianych (Zhang i in. 2015). Dzięki wysokiej porowatości możliwe jest też wprowadzenie w pory środków aktywnych biologicznie i zastosowanie materiału jako nośnik leku. Zrozumienie mechanizmu tworzenia się sfer węglowych jest ważnym aspektem zaprojektowania wydajnego sposobu ich produkcji. W pracy przedstawiono najważniejsze metody otrzymywania sfer węglowych oraz opisano mechanizm tworzenia się takich sfer. Ze

względu na zapotrzebowanie energetyczne podczas przetwarzania prekursora węglowego metody otrzymywania sfer węglowych można podzielić na wysoko i niskotemperaturowe.

## 2. Metody wytwarzania

Wysokotemperaturowe metody wytwarzania sfer węglowych polegają na rozkładzie termicznym prekursora węgla. Wydzielający się podczas rozkładu węgiel tworzy nowe struktury, takie jak nanorurki czy sfery. Do metod wysokotemperaturowych należą:

- Chemiczne osadzanie z fazy gazowej - CVD (ang. Chemical vapour deposition).

Metoda ta wymaga wprowadzenia do reaktora źródła węgla w postaci gazowej, często w obecności gazu obojętnego. Prekursorami mogą być liczne lotne węglowodory, jak na przykład metan, jednakże po uprzednim odparowaniu stosować można także ciekłe węglowodory, takie jak benzen czy toluen. W celu ograniczenia niepożądanych reakcji fazy gazowej proces ten często prowadzi się pod obniżonym ciśnieniem. W wyniku termicznego rozkładu lotne źródło węgla jest zmieniane w stały produkt węglowy, który osiada na ściankach reaktora (Deshmukh i in. 2010).

W pracy (Wang i in. 1996) podjęto się próby wyjaśnienia mechanizmu powstawania sfer węglowych metodą CVD. W temperaturze 1100°C wprowadzony do reaktora metan uległ rozkładowi do węgla i wodoru, a na ścianach kwarcowej rury osiadał produkt w postaci sfer węglowych. Katalizatorem umieszczonym w rurze były tlenki metali ziem rzadkich. Nie zaobserwowano, aby tworzące się sfery zamykały w otoczce katalizator. Podczas ogrzewania katalizatora, tlen zawarty w tlenkach metali zostaje uwolniony, po czym reaguje z metanem. Powstaje para wodna i czysty węgiel. Katalizator jest odnawialny. Otrzymany produkt w postaci sfer węglowych jest zbudowany z węglowych płatków utworzonych z członowych pierścieni węglowych. Liczba atomów węgla w pierścieniach węglowych decyduje o zakrzywieniu powstającego płatka. Sfery powstają w wyniku nagromadzenia się płatków złożonych z zakrzywionych do środka pięciokątnych pierścieni węglowych, co skutkuje spiralnym wzrostem sfery. Jednakże ze wzrostem wielkości sfery, na jej powierzchni gromadzi się coraz więcej grafitowych płatków o orientacji przeciwnej do istniejącej już sfery, co zaburza spiralny wzrost sfery.

Rodzaj zastosowanej mieszaniny gazów podczas procesu ma istotny wpływ na właściwości fizykochemiczne końcowego produktu. Wpływ składu strumienia prekursora na końcowy produkt został przedstawiony w pracy (Tian i in. 2010). Jako źródło prekursora wykorzystywany jest czysty węglowodór, ale także mieszaniny węglowodoru i gazów obojętnych. Przykładowo, zastosowanie samego metanu skutkowało otrzymaniem produktu o niskiej czystości, jednakże wydajność procesu była największa. Wydajność dla mieszaniny

metanu i azotu była prawie dwukrotnie większa niż dla mieszaniny metanu i wodoru. Azot nie brał udziału w rozkładzie metanu, powodował jednak obniżenie jego ciśnienia cząstkowego oraz wpływał pozytywnie na stopień pokrycia powierzchni katalizatora, co skutkowało większą wydajnością reakcji. Najmniejszą wydajność osiągnięto dla mieszaniny metanu i wodoru, ponieważ wodór reagował z amorficznym węglem.

Temperatura jest istotnym parametrem procesu, ponieważ wpływa ona zarówno na szybkość rozkładu prekursora węgla, jak i na efektywne działanie katalizatora. Prowadząc proces w różnych temperaturach, od 450 do 650°C, ustalono, że w zbyt niskiej temperaturze (450°C) katalizator NiO/Al jest za mało aktywny by inicjować wzrost sfer. Natomiast w wysokiej temperaturze (650°C) cząstki katalizatora ulegają aglomeracji i są zbyt duże by inicjować narastanie sfer węglowych (Tian i in. 2010). W celu zapewnienia jak największej efektywności katalizatora należy dobrać odpowiednią temperaturę procesu.

W celu uzyskania jednolitej średnicy sfer, możliwe jest zastosowanie szablonu. W pracy (Qian i in. 2004) jako szablon zastosowano tlenek glinu o średnicy porów równej około 60 nm, co pozwoliło na otrzymanie sfer węglowych o podobnych wartościach średnic. Sfery węglowe powstające w porach szablonu ze względu na ograniczoną przestrzeń odznaczały się mniejszą średnicą. Jednakże sfery powstałe poza porami szablonu były znacznie większe.

Zastosowanie szablonu pozwala także na otrzymanie sfer pustych w środku. Sposób ten został opisany przez (Chen i in. 2012). Jako szablon wykorzystano przygotowane wcześniej poprzez metodę zol-żel nanosfery SiO<sub>2</sub>, które umieszczono w aluminiowej łożeczce znajdującej się w piecu rurowym. Jako źródło węgla zastosowano etylen rozcieńczony argonem. W temperaturze 800°C węgiel osiadał na nanosferach SiO<sub>2</sub>. Po skończonym procesie produkt przemyto chlorowodorem w celu usunięcia szablonu.

- Wyładowanie łukowe

Metoda ta pierwotnie była stosowana do otrzymywania nanorurek węglowych (Arora i in. 2014). W komorze umieszczone są dwie elektrody. Jedna z nich, anoda, jest wypełniona prekursorem węgla w formie proszku np. grafitowego oraz katalizatorem. Druga elektroda, katoda, jest zazwyczaj grafitowym prętem. Po przyłożeniu napięcia elektrody są utrzymywane w odległości ok 1-2 mm, by utrzymać stałe wyładowanie. W celu uzyskania dobrego efektu ważne jest, aby utrzymać stałe natężenie prądu. Zjonizowane gazy powodują wytwarzanie się plazmy, której temperatura waha się od 4000 do 6000 K. W tych ekstremalnych warunkach następuje sublimacja prekursora węglowego. W przypadku, gdy proces jest prowadzony w atmosferze gazu obojętnego, opary węgla przenoszą się w kierunku

katody, gdzie panuje znacznie niższa temperatura. Wraz ze spadkiem temperatury materiał węglowy krystalizuje i osiada na katodzie.

Możliwe jest także zastosowanie cieczy, jako środowiska prowadzenia procesu. Środowiskiem może być na przykład etanol (Kim i in. 2010) lub woda (Sano i in. 2001), (Sano i in. 2002), czy ciekły azot (Alexandrou i in. 2004). Zastosowanie wody destylowanej jako medium pozwoliło na oddzielenie sfer węglowych od innych powstających struktur. Wytwarzające się nanosfery akumulowały się na powierzchni wody, natomiast pozostałe struktury węglowe osiadały na dnie komory. Sano i współautorzy zaproponowali mechanizm tworzenia się sfer w środowisku wodnym. W procesie powstawania sfer, pomiędzy katodą a anodą powstaje strefa plazmy otoczona przez pęcherzyk gazu wytwarzający się pod wpływem wysokiej temperatury. Obszar w środku gazowej otoczki działa jak chłodzony wodą minireaktor pozwalający na szybkie ochłodzenie plazmy, co skutkuje wytworzeniem sfer o bardzo małej średnicy, między 4 a 36 nm. Natomiast w przypadku zastosowania ciekłego azotu, ze względu na większą tendencję tego gazu do parowania, środowisko tworzenia się sfer węglowych jest bardziej zaburzone niż w przypadku wody. Ze względu na niestabilność ciśnienia i gęstości oparów sfery otrzymanywane w tym medium wykazywały dużo defektów strukturalnych.

Modyfikację tej metody zaprezentowano w artykule (Qiao i in. 2006). Około 200 sfer węglowych o rozmiarze około 3  $\mu\text{m}$  zostało umieszczonych w piecu pomiędzy elektrodami. Po znacznym ogrzaniu sfer wzrosła ich rezystancja, aż w odpowiednim momencie pojawiło się wyładowanie łukowe. W tym momencie do reaktora wprowadzono źródło węgla, pokrojone butelki PET. W wyniku pirolizy PET-u powstawały nanosfery węglowe.

- Ablacja laserowa

Jest to proces podobny do wyładowania łukowego, który również polega na odparowaniu źródła węgla. Efekt ten uzyskuje się poprzez skierowanie lasera na źródło węgla w obecności gazu obojętnego i katalizatora metalicznego. Cząstki węgla kondensują na ściankach chłodniejszej części reaktora.

Prekursor w postaci stałej został zastosowany w pracy (Bystrzejewski i in. 2008). Źródłem węgla był antracyt, jednak w celu uzyskania lepszego skupienia wiązki oraz przewodności cieplnej pomiędzy krystalitami antracytu, dodano grafitu w stosunku masowym 7:3. W wyniku skupienia wiązki lasera  $\text{CO}_2$  na prekursorze, antracyt uległ rozkładowi. Sfery węglowe powstawały wokół oświetlanej powierzchni.

Znane są także modyfikacje tej metody pozwalające na zastosowanie prekursora w ciekłej postaci (Yang i in. 2011). Na zanurzoną w toluenie płytkę krzemową skierowano

wiązkę lasera. Po około godzinie naświetlania toluen zmętniał, dodatkowo wiele czarnych agregatów było zawieszonych w cieczy. Sfery otrzymano poprzez odwirowanie ich z cieczy. W wyniku absorbowania energii przez płytkę krzemową, na jej powierzchni wytwarza się plazma o bardzo wysokiej temperaturze. W pobliżu krzemowej płytki dochodzi do rozkładu źródła węgla. Część atomów węgla reaguje z gorącym krzemem, w wyniku, czego powstaje węglik krzemu, jednak większość wytwarzających się atomów węgla ulega koagulacji. Wytwarzające się sfery węglowe absorbują promieniowanie lasera, w wyniku, czego atomy węgla ulegają odparowaniu, po czym znów ulegają nukleacji w miejscach o niższej temperaturze.

Do metod niskotemperaturowych zaliczyć można metodę hydrotermalną oraz sonifikację.

- Metoda hydrotermalna

W pierwszej kolejności należy przygotować wodny roztwór żywicy rezorcynolowo – formaldehydowej. Podczas 24 h mieszania zachodzi reakcja polikondensacji skutkująca wytworzeniem się sfer żywicy. Reakcja polikondensacji zachodzi w zasadowym środowisku. Odpowiednie pH uzyskuje się poprzez zastosowanie wody amoniakalnej. Spełnia ona także kluczową rolę w procesie tworzenia się sferycznych struktur. Jony amonowe gromadzą się na powierzchni tworzących się sfer i zapobiegają ich agregacji (Liu i in. 2011), z tego powodu metoda ta umożliwia otrzymanie produktu o wysokiej monodispersyjności. W celu usieciowania struktury należy dostarczyć do układu odpowiednią ilość energii, dlatego roztwór wprowadza się do autoklawu i poddaje warunkom podwyższonej temperatury i ciśnienia. Po kilkunastu godzinach reakcji otrzymany produkt zostaje wysuszony i poddany karbonizacji. W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury mniej stabilne elementy struktury materiału ulegają zniszczeniu, co skutkuje zwiększeniem powierzchni właściwej. Zwiększenie temperatury karbonizacji prowadzi do rozwinięcia powierzchni właściwej (Wickramaratne i in. 2013). Prekursorem węgla w tej metodzie może być także biomasa (Yan i in. 2017, Mi i in. 2008). Zaletą metody hydrotermalnej jest możliwość przeprowadzenia dodatkowej aktywacji chemicznej materiału węglowego poprzez wprowadzenie do mieszaniny reakcyjnej soli metali alkalicznych (Ludwinowicz i in. 2015, Choma i in. 2016, Pari i in. 2014). Podczas karbonizacji wbudowane w strukturę jony metali alkalicznych pod wpływem wysokich temperatur ulegają wzbudzeniu i drażą pory w materiale węglowym, co skutkuje znacznym zwiększeniem powierzchni właściwej materiału (Musa i in. 2015). Metoda hydrotermalna dzięki zastosowaniu szablonu umożliwia otrzymanie pustych w środku sfer węglowych. Sfery węglowe narastają wokół wprowadzonych do układu cząstek szablonu,

na przykład  $\text{SiO}_2$ . Po przeprowadzonej reakcji szablon można usunąć poprzez pirolizę lub wytrawienie w kwasie (Li i in. 2016). Istotną modyfikacją metody hydrotermalnej jest zastosowanie reaktora mikrofalowego. Ogrzewanie mieszaniny reakcyjnej promieniowaniem mikrofalowym pozwala na zmniejszenie gradientu temperatury w objętości reaktora. W wyniku oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego jony obecne w roztworze poruszają się w sposób oscylacyjny i zderzają się ze sobą, a dipole ulegają stałej reorientacji w zależności od kierunku składowej pola elektrycznego, co prowadzi do wzrostu temperatury i ciśnienia. Dzięki zastosowaniu reaktora mikrofalowego możliwe jest skrócenie czasu reakcji z kilkunastu godzin do kilkudziesięciu minut (Sibera i in. 2018).

- **Sonifikacja**

Jest to najmniej wymagająca energetycznie metoda, która wykorzystuje efekt sonochemiczny. W wyniku poddania mieszaniny reakcyjnej na bazie żywicy rezorcynolowo - formaldehydowej działaniu ultradźwięków w cieczy następuje tworzenie się, narost i implozja pęcherzyków. Zapaść kawitacyjna powoduje lokalny wzrost ciśnienia i temperatury. Generowane są gorące punkty, które wzbudzają cząstki wody. Warunki te ułatwiają dysocjację pary wodnej na rodniki, co obniża temperaturę reakcji i pozwala na zajście reakcji w łagodniejszych warunkach, a także wpływa na zwiększenie szybkości reakcji. Powstające związki zawierające grupy hydroksymetylowe reagują z cząsteczkami amoniaku, co prowadzi do szybkiego sieciowania żywicy (Pol i in. 2014, Jokić i in. 2010).

### **3. Podsumowanie**

Komercyjne zastosowanie sfer węglowych wymaga szczegółowego opracowania warunków produkcji w taki sposób, aby była ona jak najbardziej ekonomiczna i pozwalała na otrzymanie produktu o jak najlepszych właściwościach fizykochemicznych. W przeglądzie opisane zostały najważniejsze metody wytwarzania sfer węglowych oraz możliwości ich modyfikacji. W zależności od stanu skupienia prekursora węglowego konieczne jest dobranie odpowiedniej metody. Natomiast właściwości fizykochemiczne końcowego produktu można kontrolować poprzez zmianę parametrów reakcji.

### **4. Literatura**

Alexandrou I., Wang H., Sano N., Amaratunga G.A.J. 2004. Structure of Carbon Onions and Nanotubes Formed by Arc in Liquids. *Journal of Chemical Physics* 120,1055–1058.

Arora N., Sharma N.N. 2014. Arc Discharge Synthesis of Carbon Nanotubes: Comprehensive Review. *Diamond and Related Materials* 50,135–150.

Bystrzejewski M., Lange H., Huczko A., Baranowski P., Hübers H.W., Gemming T., Pichler T., Büchner B., Rummeli M.H. 2008. One-Step Catalyst-Free Generation of Carbon

Nanospheres via Laser-Induced Pyrolysis of Anthracene. *Journal of Solid State Chemistry* 181,2796–2803.

Chen X., Kierzak K., Cednowski K., Pełech I., Zhao X., Feng J., Kaleńczuk R. J., Tang T., Mijowska E. 2012. CVD Generated Mesoporous Hollow Carbon Spheres as Supercapacitors. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 396, 246–250.

Choma J., Kloske M., Dziura A., Stachurska K., Jaroniec M. 2016. Preparation and Studies of Adsorption Properties of Microporous Carbon Spheres. *Engineering and Protection of Environment* 19, 169-182.

Coville N. J., Mhlanga S. D., Nxumalo E. N., Shaikjee A. 2011. A Review of Shaped Carbon Nanomaterials. *South African Journal of Science* 107, 1–15.

Deshmukh A. A., Mhlanga S. D., Coville N. J. 2010. Carbon Spheres. *Materials Science and Engineering R: Reports* 70, 1–28.

Jokić B., Drmanić S., Radetić T., Krstić J., Petrović R., Orlović A., Janačković Dj. 2010. Synthesis of Submicron Carbon Spheres by the Ultrasonic Spray Pyrolysis Method. *Materials Letters* 64, 2173-2176.

Kim S., Sergiienko R., Shibata E., Hayasaka Y., Nakamura T. 2010. Production of Graphite Nanosheets by Low-Current Plasma Discharge in Liquid Ethanol. *Materials Transactions* 51, 1455–1459.

Li S., Pasc A., Fierro V., Celzard A. 2016. Hollow Carbon Spheres, Synthesis and Applications – a Review. *J. Mater. Chem. A* 4, 12686–12713.

Liu J., Qiao S. Z., Liu H., Chen J., Opre A., Zhao D., Lu G. Q. 2011. Extension of the Stöber Method to the Preparation of Monodisperse Resorcinol-Formaldehyde Resin Polymer and Carbon Spheres. *Angewandte Chemie - International Edition* 50, 5947–5951.

Ludwinowicz J., Jaroniec M. 2015. Potassium Salt-Assisted Synthesis of Highly Microporous Carbon Spheres for CO<sub>2</sub> Adsorption. *Carbon* 82, 297–303.

Mi Y., Hu W., Dan Y., Liu Y. 2008. Synthesis of Carbon Micro-Spheres by a Glucose Hydrothermal Method. *Materials Letters* 62, 1194–1196.

Musa M., Sanagi S. M. M., Nur H., Wan Ibrahim W. A. 2015. Understanding Pore Formation and Structural Deformation in Carbon Spheres during KOH Activation. *Sains Malaysiana* 44, 613–618.

Sano N., Wang H., Chhowalla M., Alexandrou I., Amaratunga G. A. J. 2001. Nanotechnology: Synthesis of Carbon 'onions' in Water. *Nature* 414, 506–507.

Pari G., Darmawan S., Prihandoko B., 2014. Porous Carbon Spheres from Hydrothermal Carbonization and KOH Activation on Cassava and Tapioca Flour Raw Material. *Procedia*



Environmental Sciences 20, 342-351.

Pol V. G., Shrestha L. K., Ariga K. 2014. Tunable, Functional Carbon Spheres Derived from Rapid Synthesis of Resorcinol-Formaldehyde Resins. *ACS Applied Materials and Interfaces* 6, 10649–10655.

Qian H. S., Han F. M., Zhang B. Guo Y., Yue J., Peng B. 2004. Non-Catalytic CVD Preparation of Carbon Spheres with a Specific Size. *Carbon* 42, 761–766.

Qiao W. M., Song S. Y., Lim S. Y., Hong S. H., Yoon S. H., Mochida I., Imaoka T. 2006. Carbon Nanospheres Produced in an Arc-Discharge Process. *Carbon* 44, 187–190.

Samanta A., Zhao A., Shimizu G. K. H., Sarkar P., Gupta R. 2012. Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture Using Solid Sorbents: A Review. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 51, 1438–1463.

Sano N., Wang H., Alexandrou I., Chhowalla M., Teo K. B. K., Amaratunga G. A. J. Iimura K. 2002. Properties of Carbon Onions Produced by an Arc Discharge in Water. *Journal of Applied Physics* 92, 2783–2788.

Sibera D., Narkiewicz U., Kapica J., Serafin J., Michalkiewicz B., Wróbel R. J., Morawski A. W. 2018. Preparation and Characterisation of Carbon Spheres for Carbon Dioxide Capture. *Journal of Porous Materials*, 1–9.

Tian F., He C. N. 2010. Fabrication and Growth Mechanism of Carbon Nanospheres by Chemical Vapor Deposition. *Materials Chemistry and Physics* 123, 351–355.

Wang Z. L., Kang Z. C. 1996. Pairing of Pentagonal and Heptagonal Carbon Rings in the Growth of Nanosize Carbon Spheres Synthesized by a Mixed-Valent Oxide-Catalytic Carbonization Process. *Journal of Physical Chemistry* 100, 17725–17731.

Wickramaratne N. P., Jaroniec M. 2013. Activated Carbon Spheres for CO<sub>2</sub> Adsorption. *ACS Applied Materials and Interfaces* 5, 1849–1855.

Xiaoping Z., Baran S., Cel W., Cao Y. 2014. Sustainable Approach to Mitigation of CO<sub>2</sub> Emission. *Ecol Chem Eng S.* 21, 617-622.

Yan L., Yu J., Houston J., Flores N., Luo H. 2017. Biomass Derived Porous Nitrogen Doped Carbon for Electrochemical Devices. *Green Energy & Environment* 2, 84–99.

Yang S., Zeng H., Zhao H., Zhang H., Cai W. 2011. Luminescent Hollow Carbon Shells and Fullerene-like Carbon Spheres Produced by Laser Ablation with Toluene. *Journal of Materials Chemistry* 21, 4432–4436.

Zhang X., Li W., Lu A. 2015. Designed Porous Carbon Materials for Efficient CO<sub>2</sub> Adsorption and Separation. *New Carbon Materials* 30, 481–501.

# Influence of interpolation and coupling methods on droplet-laden reacting jet

Jakub Stempka <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermal Machinery, Czestochowa University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Armii Krajowej 21, 42-201 Czestochowa

## Summary

In the current work the jet spray combustion process, reflecting an experimental configuration of a piloted spray burner with a vitiated co-flow is simulated numerically. The continuous phase flow is calculated in Eulerian reference frame whereas the discrete phase is transported in the flow field in Lagrangian coordinates. An in-house numerical LES solver SAILOR is used to carry out the computations. We analyse an influence of velocity interpolation method, i.e., Lagrange interpolation of varying order and importance of two-way momentum coupling on the flame lift-off height, flame spread and its structure. The models are changed while keeping the same initial setup characterized by conditions as in the experiment. Results show little impact of the two-way vs. one-way momentum coupling when smaller droplets are used. Slight differences in overall spray/flame spray characteristics are also noticeable while changing the velocity interpolation method (first and higher order) for calculating the velocity at the droplet position. The flame structure showed to be highly sensitive on droplet dispersion.

**Keywords:** LES, turbulent combustion, interpolation methods, two-phase flows

## Wpływ metod interpolacji oraz sprzężenia pomiędzy gazem i sprejem w reagującej dwufazowej strudze

### Streszczenie

W niniejszej pracy analizowany jest numerycznie proces spalania turbulentnego w dwufazowej strudze, odpowiadającej konfiguracji eksperymentalnej. Faza ciągła modelowana jest we współrzędnych Eulera, podczas gdy ruch spreju analizowany jest we współrzędnych Lagrange'a. Obliczenia prowadzone są metodą wielkich wirów (LES) z wykorzystaniem akademickiego kodu obliczeniowego SAILOR. Analizowane są (i) wpływ rzędu interpolacji prędkości oraz (ii) istotność dwu-drożnego sprzężenia (coupling) na wysokość podniesienia płomienia oraz jego strukturę. Metody interpolacji są zmieniane, podczas gdy początkowa konfiguracja, odpowiadająca eksperymentowi jest niezmienna. Rezultaty wskazują na niewielki wpływ jedno i dwudrożnego sprzężenia, gdy sprej składa się z kropli o mniejszych średnicach. Niewielkie różnice są widoczne podczas zmiany metody (rzędu) interpolacji prędkości z pola przepływu na położenie kropli. Struktura płomienia jest bardzo wrażliwa na zmiany dyspersji kropeł paliwa.

**Słowa kluczowe:** LES, turbulentne spalanie, metody interpolacji, przepływy dwufazowe

### 1. Introduction

A variety of industrial and small-scale devices (e.g. diesel engines, liquid powered burners, aircraft propulsion systems, liquid fuelled rockets engines and many others) operate based on highly turbulent combustion processes that follow the liquid fuel injection. Therefore, studies of reacting two-phase flows involving the diluted fuel sprays in gaseous carrier medium constitute a very important research field in fluid dynamics. Even though, many studies emerged in the past, due to high complexity of such flows they are mostly limited to fundamental cases. In the realistic regimes prior to the formation of combustible mixture the injected stream of fuel is subjected to various processes, e.g., droplets dispersion

and evaporation, mixing of fuel vapour, occurrence of chemical reactions. The difficulties of turbulent spray combustion analysis arise from a range of interlinked phenomena that cannot be fully captured by the experiment. Hence, growing number of numerical studies emerge for example using Large Eddy Simulation (LES) approach which boost advancement in spray combustion research.

In the current work the jet spray combustion process, reflecting an experimental configuration of a piloted spray burner with a vitiated co-flow (O’Loughlin& Masri2011) (Fig. 1) is simulated numerically using LES.

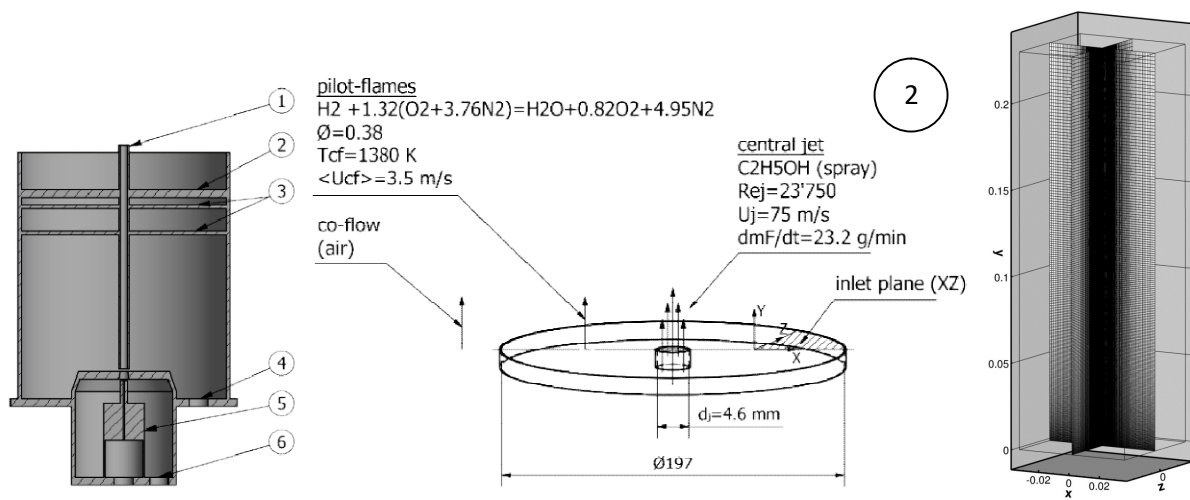


Fig. 1. A vitiated co-flow piloted jet spray burner assembly (O’Loughlin & Masri 2011). Shown also the schematic of the inlet plane with the boundary conditions indicated and computational mesh from the current study

The simulations include diluted polydispersed ethanol spray that evaporates in the hot co-flow. The gaseous fuel diffuses from spray fuel-rich core into the oxidizer fuel-lean region and auto-ignites. The study aims at investigation of the influence on the jet flame structure, lift-off height simulations, velocity distribution, auto ignition time and evaporation rates depending on (i) the method for flow-field/spray momentum and enthalpy coupling and (ii) velocity and temperature interpolation procedures of varying order. The models are changed from one simulation to another while keeping the same initial setup as in the experiment. Results suggest that the interpolation effect is indirect because it acts on the flow and flame through the coupling mechanism. Negligible impact on overall spray/flame spray characteristics was found while changing the velocity interpolation method (first and higher order) for calculating the velocity at the droplet positions. On the other hand, the flame lift-off showed to be more sensitive on the choice of the temperature interpolation method.

## 2. Numerical model

- Flow governing equations

In this work we consider a low Mach number, reacting two-phase flow for which the LES approximated Navier-Stokes equations in the Eulerian framework, complemented with the equation of state are given as:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{S}_{mass} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j} + \bar{S}_{m,i} \quad (2)$$

$$p_0 = \bar{\rho} R \bar{T} \quad (3)$$

where the bars and tildes denote the filtered and Favre averaged quantities. The symbols  $p_0$  and  $R$  are thermodynamic pressure and gas constant, respectively. The variables:  $u, \rho, p, T$  denote the velocity component, density, hydrodynamic pressure and temperature. The terms  $\tau_{ij}$  and  $\tau_{ij}^{sgs}$  represent the viscous and the sub-grid stress tensors. The latter is related to the strain rate tensor  $\tilde{S}_{ij}$  through  $\tau_{ij}^{sgs} = 2\mu_{sgs}\tilde{S}_{ij}$ , where the sub-grid viscosity  $\mu_{sgs}$  is calculated using the Vreman model (Vreman 2004). The source terms  $\bar{S}_{mass}$  and  $\bar{S}_{m,i}$  are used for coupling the droplets and the gas phase.

- Species transport

The species ( $\phi_\alpha$ ) and the enthalpy ( $h$ ) transport equations are given by:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\phi}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\phi}_\alpha \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_{sgs}}{\sigma_{sgs}} \right) \frac{\partial \tilde{\phi}_\alpha}{\partial x_j} \right] + \bar{S}_\alpha + \bar{\rho} \overline{\dot{\omega}(\phi_\alpha)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_\alpha \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_{sgs}}{\sigma_{sgs}} \right) \frac{\partial \tilde{h}_\alpha}{\partial x_j} \right] + \bar{S}_h \quad (5)$$

where the subscript  $\alpha$  denotes the species index from 1 to N-species. The symbols  $\sigma$  and  $\sigma_{sgs}$  refer to the Prandtl/Schmidt numbers and their turbulent counterpart. They are assumed equal to 0.7 and 0.9, respectively. The source terms  $\bar{S}_\alpha$  and  $\bar{S}_h$  are responsible for production of the fuel vapour and the energy exchange between the gas phase and droplets. The species reaction rates  $\overline{\dot{\omega}(\phi_\alpha)}$  are computed using ILES technique.

- Spray source terms

Due to the coupling, the gas phase acts on the droplets and the droplets act on the gas phase through the source terms appearing in Eqs. 1, 2, 4 and 5. They represent averaged sums of the contributions from ( $N_p$ ) particles at each computational cell. The expressions for source terms are formulated as:

$$\bar{S}_{mass,p} = \bar{S}_{\alpha,p} = -\frac{d}{dt}(m_d)_p \quad (6)$$

$$\bar{S}_{m,p} = -\frac{d}{dt}(m_d v_d)_p \quad (7)$$

$$\bar{S}_{m,p} = -\frac{d}{dt}(m_d c_f T_d)_p \quad (8)$$

The dispersed phase motion and evaporation is analysed in the Lagrangian reference frame, following the model of (Miller et al. 1998).

- Evaporation model

The infinite conductivity evaporation model based on non-equilibrium Langur-Knudsen law, is utilized. It is described by the set of equations for the droplet temperature and mass rate of change, according to formulation of (Miller et al. 1998). The model accounts for convective environment and Stefan flow effects by introducing appropriate correlations for Nusselt and Sherwood numbers (Clift et al. 1978). The physical parameters (i.e. heat capacity, binary diffusion coefficient, thermal conductivity and dynamic viscosity of the fuel vapour/gas mixture) are calculated using the 1/3<sup>rd</sup> rule.

- Reaction rates

The reaction rates  $\overline{\dot{\omega}(\phi_\alpha)}$  are obtained from the Arrhenius formulas and are computed using ILES approach (Duwig et al. 2011) based on the filtered flow variables as  $\overline{\dot{\omega}_\alpha(Y, h)} \approx \dot{\omega}_\alpha(\tilde{Y}, \tilde{h})$ . The sub-filter scales resulting from the filtration of the convective terms are modelled with the eddy viscosity model. Similarly, as in many previous works (e.g. Chakraborty & Mastorakos 2007) we applied a global one-step chemical reaction  $C_2H_5OH + 3(O_2 + 3.76N_2) = 2CO_2 + 3(H_2O + 3.76N_2)$ . Such an approach minimizes the computational expense but is known from over-predicting the flame speed in the rich mixtures, as discussed in (Chakraborty & Mastorakos 2007). To correct this weakness and to give reasonable predictions of the strain rate extinction the reaction rates are tuned as in (Fernandez et al. 2006).

### 3. Numerical solver

- Integration procedure

Simulations are carried out using an in-house academic LES solver (SAILOR) based on high-order compact difference method combined with the projection method for pressure-velocity coupling on half-staggered cartesian meshes (Tyliszczak 2014). The time integration scheme is based on predictor-corrector approach. The scalar values from the flow field, needed to calculate droplet dispersion and evaporation rates are passed through the procedures for two-way coupling of the momentum and one-way coupling for enthalpy. The one-way coupling allows to pass the momentum or enthalpy fluxes from the nodes to the droplets while the two-way coupling of momentum, allows the gas to receive the information about the droplet momentum and to modify the nodal values of velocity to conserve the momentum

while dealing with two-phase flow. The coupling impact is also investigated in the current study. The code was thoroughly verified and used in previous studies (Wawrzak & Tyliczszak 2018, Stempka & Tyliczszak 2018).

- Interpolation procedures

The velocities and temperature values are needed to be defined at the droplet positions for computing the spray momentum and mass of evaporating gas fluxes. However, the scalar values are solved as the nodal values and must be interpolated at the droplet's positions. In the current study we test several different procedures for interpolating the nodal values. The applied procedure is denoted hereafter using two digits in the format: "XX". The first digit symbolises the procedure used for velocity interpolation while the second for the temperature interpolation. Whenever the solution is obtained with one-way velocity coupling, the results is denoted "NS\_off". Accordingly, if there is no enthalpy coupling, the results are denoted as "H\_off".

The first and the simplest procedure (denoted as "1") is based on the assignment of the velocity and temperature at the droplet directly from the neighbouring node. Assignment of this type is schematically shown in Fig. 2.

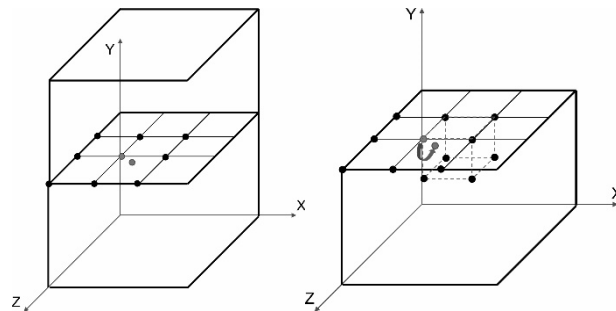


Fig. 2. Schematic of interpolation procedures for methods "1" and "2"

The second type of interpolation procedure (denoted as "2") is based on nodal velocity gradients. After solution procedure the derivatives of velocity components are available at the grid nodes. Using the Taylor series expansion, the procedure can be written as:

$$\mathbf{u}_d = \mathbf{u}_{i,j,k} + \nabla \mathbf{u}_{i,j,k} \cdot d\mathbf{x} \quad (9)$$

where the velocity increment at the droplet position is calculated using the product of neighbouring nodal velocity vector derivative times the distance between the node and the droplet. This procedure is however only applicable to the velocity since the temperature gradients are not calculated directly by the solver.

The third type of the interpolation procedure (denoted as "3") is based on the Lagrange polynomials, given by the following expressions:

$$L(x) = \sum_{j=0}^k y_j l_j(x) \quad ; \quad l_j(x) = \prod_{\substack{0 \leq m \leq k \\ m \neq j}} \frac{x - x_m}{x_j - x_m} \quad (10)$$

where  $L$  could be the value of any scalar, i.e. velocity component or temperature. The degree  $k$  of the Lagrange polynomial indicates the number of values plus one to be taken when constructing polynomials. For example, for constructing second degree polynomial ( $k = 2$ ) for calculating the temperature at the droplet position, one needs values from two nodes neighbouring the node plus value at the node to which the droplet belongs. The procedure of interpolation is schematically shown in Fig. 3.

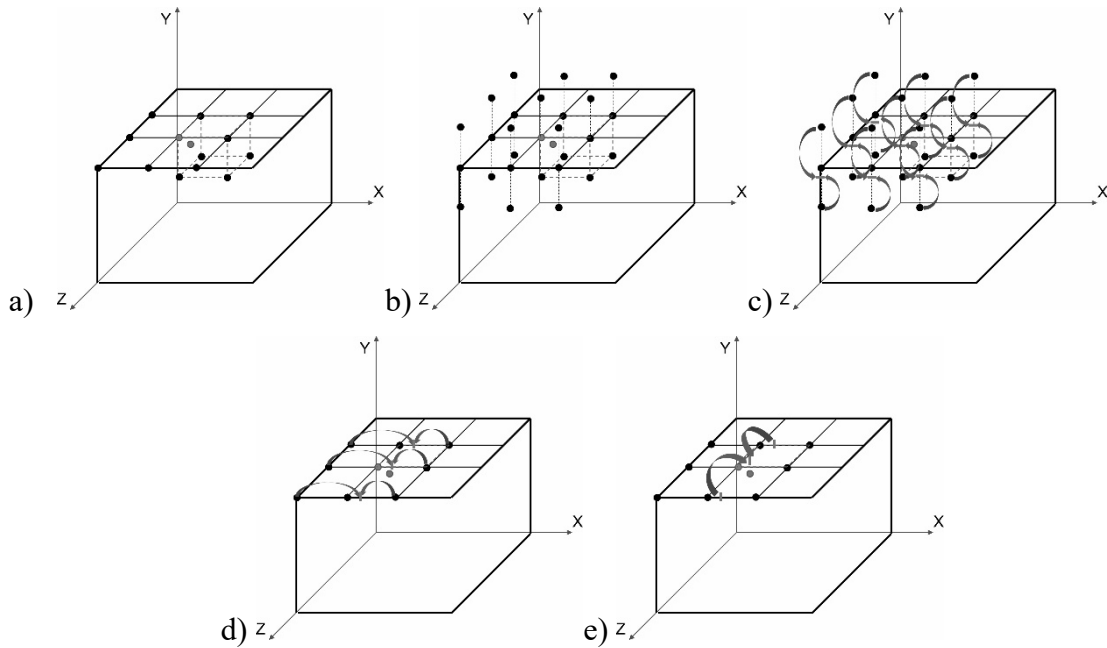


Fig. 3. Schematic of Lagrange polynomial interpolation procedure “3”

The interpolation is realized by the solver starting from constructing the  $k + 1 \times k + 1 \times k + 1$  array of values neighbouring the node to which the droplet belongs (Fig. 3b). Then it proceeds by constructing polynomials to interpolate the values from  $k + 1 \times k + 1$  vertical groups each consisting of  $k + 1$  points (Fig. 3c) into the vertical droplet’s coordinates (Fig. 3d). After that the interpolation is followed by constructing  $k + 1$  polynomials in horizontal direction to interpolate the values at the droplet’s first horizontal coordinate. The interpolation is finalized by constructing the last polynomial using the previously interpolated values (Fig. 3d) and interpolating the value into the last one coordinate of the droplet.

#### 4. Results

The instantaneous values of axial velocity, temperature and mass fraction from the LES computations have been time-averaged and are presented in the current section. The statistics of axial velocity obtained using different interpolation procedures are shown on contour plots

in Fig. 4. One can find that the differences between presented flow fields are rather small. However, it is noticeable that the interpolation method “1” manifests in slightly shorter region of the higher velocities ( $>60\text{m/s}$ ) comparing to the method “2” and “3”. The irregularities at the first three profiles show that the results are not statistically convergent, however they were integrated for the similar time period.

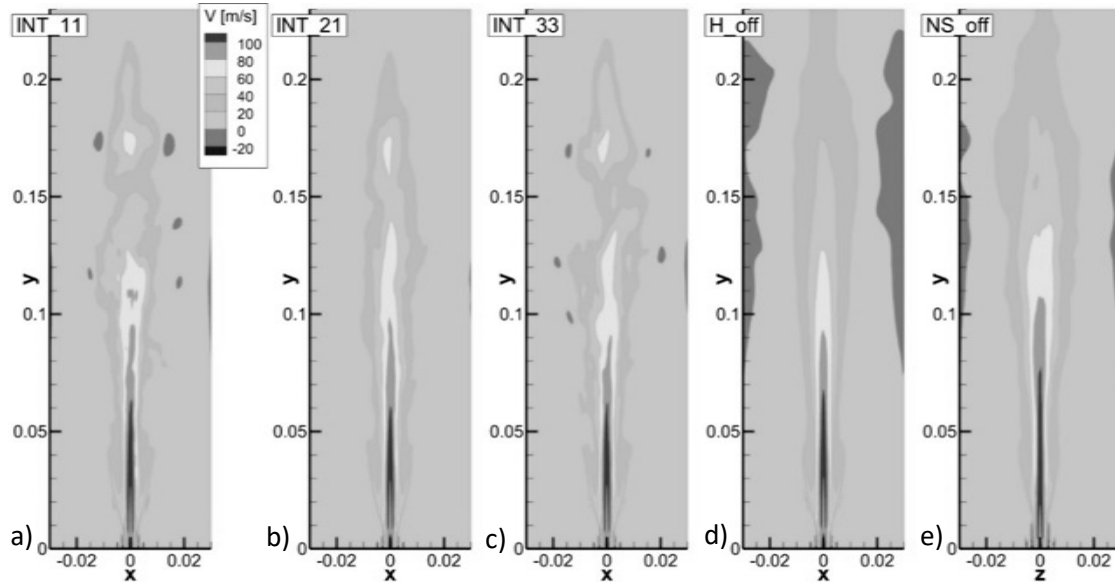


Fig. 4. Time-averaged axial velocity distributions

The first three results are obtained applying the two-way momentum and one-way enthalpy coupling. The last two are obtained using interpolation procedure “21”(same as in Fig. 4b) while modifying the flow/spray coupling method. When disabling the two-way coupling of momentum and switching to one-way coupling, the droplets do not influence the flow anymore. The result can be found in Fig. 4e and the effect in which the spray influences the flow field is apparent. The spray transport causes deceleration of the gas, since without the coupling, the region of higher jet's velocity is elongated downstream. When the enthalpy coupling is off (as in Fig. 4d), there are no chemical reactions. The last result serves not as an example of interpolation method influence but rather demonstrates how the flame affects the flow when compared with the reactive case “21”.

The time-averaged temperature fields are shown in Fig. 5. It is evident that the applied interpolation method influences flame the lift-off. The lift-off height definition is somewhat arbitrary (but found to be adequate in other works) and is defined as the distance from the nozzle to the time-averaged temperature region at least 10K hotter than the co-flowing gas. One should keep in mind that two first results are obtained using the same procedure for assigning the temperature values to the droplets positions and apparently the differences are not significant.



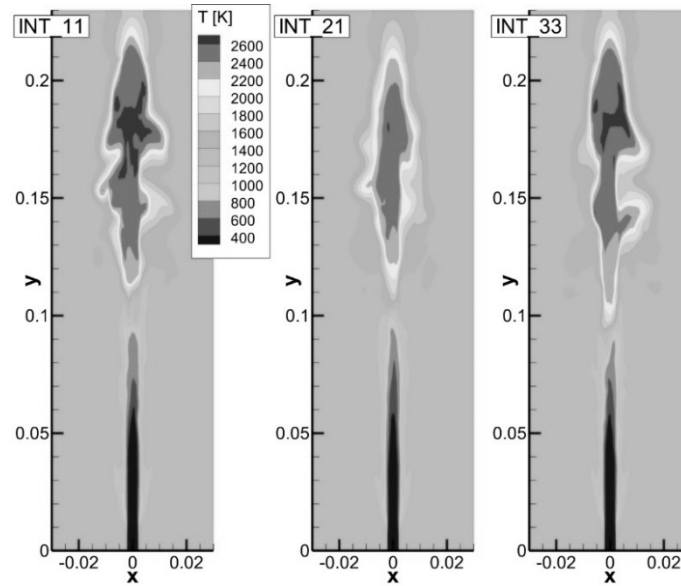


Fig. 5. Time-averaged temperature distributions

On the other hand, in the case “33” the use of Lagrangian polynomial of 2<sup>nd</sup> degree for temperature interpolation provides visible change in the temperature distribution, indicating slightly shorter flame lift-off. The effect of the spray interpolation method is indirect (it acts through the coupling) and results obtained using different methods should not be studied apart from the flow field. While the differences in the velocity fields are negligible for all interpolation methods used, one can conclude that the difference in the lift-off height prediction in case “33” is mostly influenced by the temperature interpolation procedure. Such observation may indicate a strong sensitivity of the combustion to the interpolation procedure of droplet temperature.

Comparison of the time-averaged distributions of fuel mass fraction (Fig. 6) seems to be better suited for assessing the direct effect of different interpolation methods. It is so, because the rate of fuel evaporation is directly dependent on the droplet’s velocity and temperature.

The above results show that the fuel is distributed differently for each case. The fuel concentration is higher locally when the procedure “11” is applied (Fig. 6a). Especially at position  $y=0.2$  m the steep gradients of the fuel concentration can be found. From the last subfigure, it is evident that the fuel concentration is globally greater when the temperature interpolation procedure is applied. On the contrary, one can notice that when even crude interpolation procedure (procedure “2”) of velocity is applied, the profile of the fuel’s concentration is smoother. This smoothing effect of interpolation is even more evident when the information at the droplet position was transferred from greater number of nodes. Such an interpolation also sounds more physically, since the temperature/velocity profile

between two neighbouring nodes is more linear rather than stepwise. Thus, the procedure “3” gives the lift-off height prediction closer to the experimental values ( $L_d \approx 15d_j$ ).

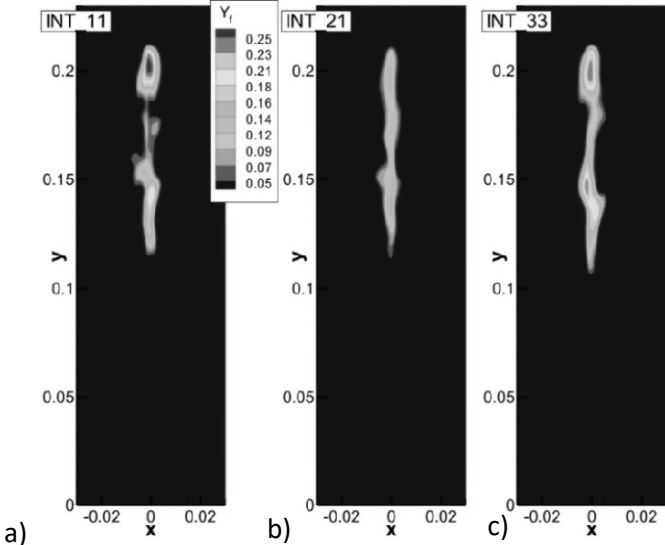


Fig. 6. Time-averaged gaseous fuel mass fraction distributions

Another analysed parameter of practical importance is the auto ignition delay time, presented in Fig. 7. The auto ignition delay time is defined as the time period from the beginning of the fuel injection to the time of the substantial jump in maximum temperature in the computational domain (Fig. 7a). It is accompanied by the intense growth of the fuel mass fraction (Fig. 7b).

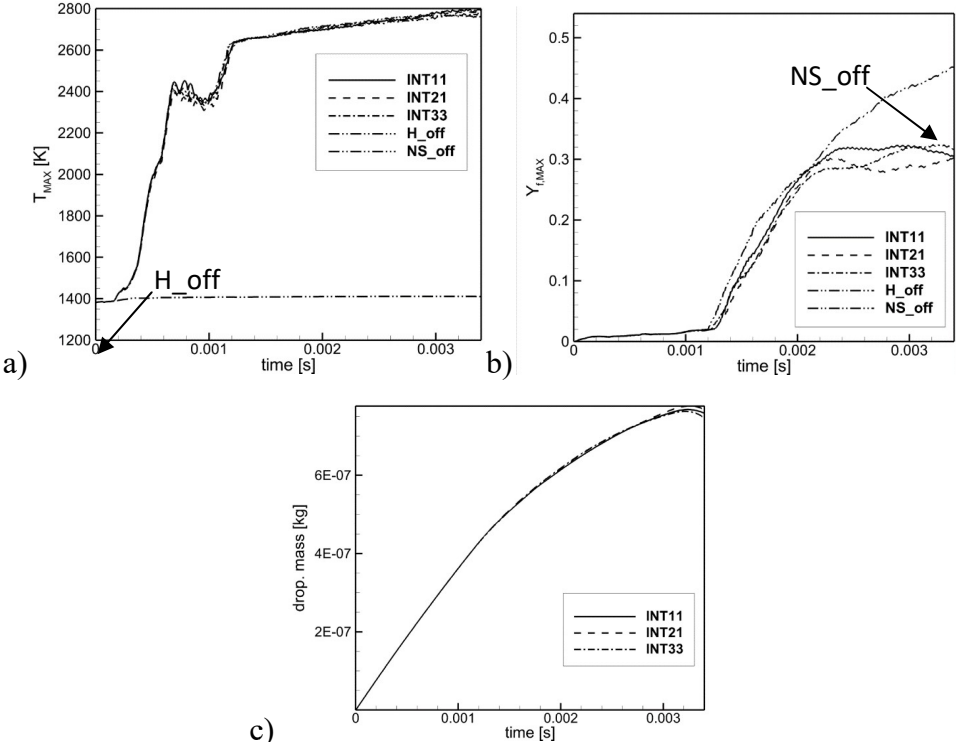


Fig. 7. Instantaneous values of maximum temperature (a), maximum fuel mass fraction (b) and total mass of the droplets (c) in the domain

The analysis of the above instantaneous value indicates that interpolation procedure has marginal effect on the autoignition time (but rather on the autoignition spots localisations). The main outcome is that the autoignition delay time can be predicted similarly, apart from the interpolation method used for assigning the flow-field variables to the droplets position. Reviewing Fig. 7c one can learn that there are almost no differences in the fuel mass contained in the droplets, among the interpolation procedures as the time advances. Therefore, their effect is only local, most likely causing the differences in the evaporation rates at particular regions.

## **5. Conclusions**

In the present work we implemented and assessed different methods for interpolating the scalar values at the droplet position needed for computing spray dispersion and evaporation. We performed the parametric LES study of the two-phase reacting flow for conditions similar as in the experiment. Having the measured value of the flame lift-off, we were able to make a crude confrontation of the simulation results with the experimental data. The results showed that indeed, the interpolation procedure may influence the flame both directly and indirectly (through the flow/spray coupling mechanism) in terms of the shape of the reaction zone, flame lift-off height and vaporized fuel distribution. However, the impact of the interpolation procedures on the time-averaged flow statistics is rather small, nonetheless the Lagrange polynomial interpolation procedure is found to be the most accurate. On the other hand, based on the obtained results, it could be assumed that the computational cost/accuracy trade-off can be achieved using procedure “2” for velocity, in which already calculated gradients of velocity are used to interpolate velocities at the droplets’ positions and procedure “3” for the temperature, based on the Lagrange interpolation polynomials.

## **Acknowledgements**

This work was supported by grants 2015/17/B/ST8/03217 (National Science Centre, Poland) and statutory funds BS/MN-1-103-303/2018/P. PL-Grid infrastructure was used to carry out the computations. Author would like also to express the appreciation to the A. Tyliczszak for discussing the numerical issues during implementation of the solution procedures.

## **6. References**

Chakraborty N., Mastorakos E., 2007. Direct numerical simulations of localised forced ignition in turbulent mixing layers: The effects of mixture fraction and its gradient. *Flow, Turbulence and Combustion* 80:155-186.

Duwig C., Nogenmyr K.J., Chan C., Dunn M.J., 2011. Large eddy simulations of a piloted lean premix jet flame using finite-rate chemistry. *Combustion Theory and Modelling* 15:537-68.

Fernandez-Tarrazo E., Sanchez A.L., Linan A., 2006. A simple one-step chemistry model for partially premixed hydrocarbon combustion. *Combustion and Flame* 147:32-38.

Irannejad A., Banaeizadeh A., Jaber F., 2015. Large eddy simulation of turbulent spray combustion. *Combustion and Flame* 2,162:431–50.

Miller R.S., Harstad K., Bellan J., 1998. Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations. *International Journal of Multiphase Flow* 24:1025-1055.

O’Loughlin W., Masri A.R., 2011. A new burner for studying auto-ignition in turbulent dilute sprays. *Combustion and Flame* 158:1577-90.

Stempka J., Tyliczszak A., 2018. Numerical analysis of an impact of spray characteristics and co-flow temperature on a flame lift-off height. *Journal of Physics Conference Series* 1101:012039.

Tyliczszak A., 2014. A high-order compact difference algorithm for half-staggered grids for laminar and turbulent incompressible flows. *Journal of Computational Physics* 276:438-467.

Vreman W., 2004. An eddy-viscosity subgrid-scale model for turbulent shear flow: Algebraic theory and applications. *Physics of Fluids* 16:3670-3681.

Wawrzak A., Tyliczszak, A., 2018. Implicit LES study of spark parameters impact on ignition in a temporally evolving mixing layer between H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixture and air. *International Journal of Hydrogen Energy* 20,40:9815-9828.

# Modyfikacje podstawowych przepisów gry w piłkę nożną na przestrzeni wieków

Łukasz Stępień <sup>(1)</sup>, Bartosz Zdeb <sup>(1)</sup>, Patrycja Maciejak <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup>Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski

<sup>2</sup>Wydział Wychowania Fizycznego, Uniwersytet Rzeszowski

Łukasz Stępień: lukasz.stepien@urz.pl

## Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono najważniejsze zmiany dotyczące przepisów gry w piłkę nożną. Tak jak piłka nożna jest grą dynamiczną, tak i przepisy w tę grę zmieniają się nieustannie od początku powstania tej dyscypliny. W artykule początkowo przedstawiono krótką historię gry w piłkę nożną. Następnie ukazano, jakie zmiany zostały wprowadzone do Przepisów Gry w piłkę nożną na przełomie 2016/2017 roku. Artykuł ukazuje dynamiczny rozwój piłki nożnej, a co za tym idzie konieczność wprowadzania zmian w Przepisach Gry.

**Słowa kluczowe:** Przepisy Gry, IFAB, piłka nożna

## Modifications of the basic rules of the game of football over the centuries

### Summary

This article presents the most important changes regarding the rules of football. Just as football is a dynamic game, the rules in this game are constantly changing from the beginning of this discipline. Initially, in the article presents a short history of playing football. Then article presents what changes have been made to the regulations of the game of football at the turn of the year 2016/2017. The article shows the dynamic development of football and consequently, the need to change the Rules of the Game.

**Keywords:** Game Rules, IFAB, football

## 1. Wstęp

Piłka nożna to dyscyplina sportu, którą interesują się miliony ludzi. W każdym kraju prowadzone są rozgrywki, a Przepisy Gry są takie same, niezależnie czy rozgrywany jest finał Ligi Mistrzów czy mecz „B” klasy (Plicz i in. 2016). Piłka nożna budzi wiele emocji, dlatego Przepisy Gry musi cechować uczciwość. Stacje telewizyjne, zakłady bukmacherskie inwestują olbrzymie pieniądze, dlatego wymagają, aby zasady były przejrzyste i czytelne dla wszystkich oraz dostosowane do obecnych czasów (Kowalski 2017). Głównym organem odpowiedzialnym za regulowanie zasad gry jest IFAB (International Football Association Board), która ustala przepisy dla Międzynarodowej Federacji Piłki Nożnej (FIFA). IFAB jest organem tworzącym, normalizującym oraz aktualizującym Przepisy Gry w piłkę nożną. Głównym zadaniem IFAB jest stworzenie jednolitych przepisów na całym świecie, które będą dopasowane do społeczności w XXI wieku. Organizacja wdraża rozwiązania mające na celu wyeliminowanie spornych i niejasnych sytuacji, które nie mają prawnej podstawy w przepisach lub odbiegają od rzeczywistych postaw na boisku piłkarskim (Plicz i in. 2016).

## 2. Historia rozwoju przepisów gry w piłkę nożną

Piłka nożna znana jest od wieków. Już w starożytności uprawiano sport podobny do piłki nożnej. Z upływem wieków dyscyplina rozwinęła się na Wyspach Brytyjskich. Nie ustalono, z jakiej cywilizacji sprowadzono piłkę nożną na Wyspy Brytyjskie, natomiast przypuszcza się, że mogła dotrzeć wraz z Celtami, Duńczykami, Norwegami lub Rzymianami. Obecnie najstarsze znane notatki na temat „football” pochodzą z roku między 1174, a 1183. Na przełomie kolejnych wieków piłka nożna rozwijała się w krajach na zasadach różniących się w poszczególnych państwach. Momentem przełomowym pod koniec XIX wieku była chęć rywalizowania pomiędzy państwami na takich samych spójnych i jasno określonych zasadach, dlatego 2 czerwca 1886 roku na spotkaniu przedstawicieli czterech krajów Anglii, Szkocji, Walii i Irlandii Północnej, które odbyło się w Londynie utworzono organizację IFAB (Rada Międzynarodowego Związku Piłki Nożnej). Jej rolą było monitorowanie i ujednoczenie Przepisów Gry oraz ewentualna późniejsza ich poprawę. Od tego dnia prawo do modyfikacji Przepisów Gry posiadała tylko IFAB. Do pierwszych istotnych decyzji w roku 1891 możemy zaliczyć wprowadzenie rzutu karnego, wykonywanego z odległości 11 metrów od bramki z obojętnego miejsca oraz wprowadzenie siatek bramkowych. W latach 1896-1899 organizacja doszła do porozumienia, aby zespoły składały się z 11 zawodników, a więc na boisku piłkarskim będzie przebywać 22 zawodników. Konsekwencją takiej ilości osób przebywających na boisku było ustalenie wymiarów pola gry. Przyjęto, że szerokość boiska powinna mieć długość od 100 do 130 jardów (90-120 metrów), a szerokość minimalna 50 jardów (45 metrów), natomiast maksymalna 100 jardów (90 metrów). Podstawową kwestią było również ustalenie czasu gry, który został przyjęty, jako 90 minut. 25 maja 1904 roku w Paryżu powstała FIFA (Międzynarodowa Federacja Piłki Nożnej). Wraz z rozwojem Federacji uznano potrzebę stworzenia jednolitych przepisów, tak jak zrobiły to kraje Wspólnoty Brytyjskiej. Tym razem istniała już organizacja, która posiadała doświadczenie oraz sformalizowane zasady. Dlatego też zaakceptowano zasady przyjęte przez IFAB i uznano je za wspólne. W 1913 roku oficjalnie FIFA stała się pełnoprawnym członkiem IFAB. Pierwotnie w skład Rady, która podejmowała decyzje, unowocześniała oraz rozwiązywała wszystkie sprawy sporne brały udział cztery kraje (Anglia, Szkocja, Irlandia Północna, Walia). Każdy z tych krajów posiadał po dwa głosy. Po przystąpieniu Międzynarodowej Federacji Piłki Nożnej nadal każdy z krajów posiadał po dwa głosy, natomiast FIFA otrzymała również dwa głosy. Do podjęcia decyzji potrzebne były cztery piąte głosów, a więc Wspólnota Brytyjska nadal miała kontrolę i decydowała o wszystkim niezależnie od wizji FIFA. W latach 1914-1920 wszystkie oficjalne spotkania IFAB zostały zawieszono ze względu na Pierwszą Wojnę Światową.

W 1922 roku IFAB wprowadziła pierwszy wpis na temat spalonego. Spalony początkowo obowiązywał tylko z rzutów wolnych, a w 1925 roku tyczył się również sytuacji podczas gry. Spalony różnił się od obecnych zasad. Zawodnik atakujący, który był skierowany w kierunku bramki przeciwnika musiał mieć przed sobą minimum 3 zawodników drużyny przeciwnej. W 1929 roku organizacja uściśliła zachowanie bramkarza podczas rzutu karnego. Nakazała bramkarzowi podczas wykonywania rzutu karnego stać na linii bramkowej dwoma nogami. W latach 30-tych dwudziestego wieku wprowadzono ostatecznie oznaczenie na polu gry, co było ostatnią modyfikacją pola gry do czasów obecnych. Zmianą był łuk wyznaczony w odległości 10 jardów (9,15 metra), wyznaczony za polem karnym, zaczynającym się i kończącym na linii pola karnego. Jego zadaniem była swoboda wykonywania rzutów karnych przez wykonawcę rzutu karnego. Osobą odpowiedzialną za rewolucję w IFAB był Stanley Rous. W 1937 roku dokonał zmian w prawie gry na bardziej przejrzysty i zwarty zestaw zasad. Rok później IFAB zatwierdziło siedemnaście głównych praw użytkowych, które przetrwały do dzisiaj. Zasady były na tyle nowoczesne i przejrzyste, że przetrwały bez zmian do 1997 roku. FIFA nie miała wpływu na podejmowane decyzje w przypadku zgodności krajów Wspólnoty Brytyjskiej, co doprowadziło do zmian w głosowaniu. W 1958 roku Rada ustaliła nowe zasady głosowania, w których poszczególne organizacje posiadały inną ilość głosów 4 głosy posiadała Międzynarodowa Federacja Piłki Nożnej (FIFA),

- 1 głos Angielski Związek Piłki Nożnej (The Football Association),
- 1 głos Szkocki Związek Piłki Nożnej (Scottish Football Association),
- 1 głos Walijski Związek Piłki Nożnej (Football Association of Wales),
- 1 głos Związek Piłkarski Irlandii Północnej (Irish Football Association) (Kowalski 2017).

W 1963 roku narastająca ilość wniosków napływająca do IFAB z prośbą o pomoc w spornych decyzjach spowodowała powstanie komitetu, który wydawał werdykt w sprawach, które napływały do związku. Komisja składała się z sekretarzy związków narodowych Wspólnoty Brytyjskiej oraz sekretarza generalnego Międzynarodowej Federacji Piłki Nożnej. Problem rozstrzygania meczów w rozgrywkach pucharowych, gdzie przegrywający zespół odpada, organizacja rozwiązała w 1970 roku. Wprowadziła jeden z najbardziej efektywnych momentów w meczu, czyli rzutów karnych w przypadku remisu. Pierwszy raz rzuty karne w przypadku remisu zostały zastosowane 5 sierpnia 1970 roku w półfinale Watney Cup pomiędzy zespołami Manchester United, a Hull City. W latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku znacznie rozwinął się przemysł obuwniczy oraz sposób

doboru i konstrukcji różnego rodzaju elementów takich jak na przykład piłki. IFAB zdając sobie sprawę z rozwoju dostosowała się do nowych technologii modyfikując przepisy, aby były zgodne z nowoczesnym sprzętem. W rocznicę stulecia powstania organizacji IFAB zorganizowano centralne spotkanie 30 maja 1986 roku w Meksyku, na którym doprecyzowano wiele szczegółów takich jak: spalony, zmiany, pole karne, kolor słupków bramkowych oraz wyrażenie zgody na drobne modyfikacje technologiczne. Lata dziewięćdziesiąte dwudziestego wieku to mocny rozwój zasad fair play, czyli wartość większą ma sprawiedliwość oraz zdrowie przeciwnika niż zwycięstwo za wszelką cenę. Doprowadziło to do zakazu łapania piłek w ręce przez bramkarza zagrywanych od kolegi ze zespołu (reguła pass back). W 1990 roku zmodyfikowano artykuł 11 Przepisów Gry, mówiący o spalonym. Zawodnik drużyny atakującej nie znajduje się na pozycji spalonej, jeśli jest na równi z przedostatnim, zawodnikiem drużyny broniącej. Zmodyfikowano również artykuł 12 Przepisów Gry, mówiący o grze niedozwolonej i niewłaściwym postępowaniu. Każdy atak niedozwolony od tyłu zawodnika, który zagrażał bezpieczeństwu skutkowało czerwoną kartką, czyli wykluczeniem z gry. Czerwoną kartką karany był również zawodnik, który pozbawił drużynę przeciwną realną szansę na zdobycie bramki. W roku 1997 IFAB postanowiło nanieść poprawki w przepisach po pięćdziesięciu dziewięciu latach. Pomimo wprowadzenia nowych zapisów do Przepisów Gry, to całość na tyle uproszczono stosując język zrozumiały dla przeciętnej osoby, że Przepisy zmniejszyły swoją objętość o 30 procent. W październiku 2010 roku, gry technologia wkroczyła na nowy wyższy poziom, organizacja podjęła decyzję o próbie przetestowania Goal-Line Technology (GLT). Goal-Line Technology to system sprawdzający, kiedy piłka całym obwodem przekroczyła linię bramkową pomiędzy słupkami i pod poprzeczką. Jest to urządzenie elektroniczne, które wysyła sygnał do sędziego głównego, który posiada odpowiednio wyposażony zegarek. System ma za zadanie jedynie pomóc w ocenie, czy piłka przekroczyła całym obwodem linię bramkową, lecz to arbiter główny ostatecznie decyduje o tym, czy bramka została zdobyta (Plicz i in. 2016).

### **3. Najważniejsze zmiany w Przepisach 2016/17**

Chodź, co roku Przepisy Gry są modyfikowane, to przed Mistrzostwami Europy rozgrywanymi we Francji, IFAB wdrożyło w życie bardzo wiele istotnych zmian. Zmianom nie uległ jedynie Artykuł 02, który dotyczy piłki. Poniżej przedstawiono kilka najważniejszych zmiany w Przepisach Gry: (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 01 – pole gry**



Wraz z rozwojem technologicznym postanowiono, że pole gry musi być w całości wykonane z sztucznej nawierzchni lub naturalnej, nie zezwala się na łączenie dwóch rodzajów nawierzchni.

Organizatorzy rozgrywek w danych krajach posiadają możliwość modyfikacji wymiarów boiska, natomiast modyfikacja jest możliwa jedynie w zakresie (linia boczna od 90 m do 120 m, linia bramkowa od 45 m do 90 m).

Reklamy wszelkiego rodzaju umieszczone na podłożu, muszą być oddalone od linii bocznych oraz bramkowych minimum 1 metr.

Emblematy/loga rozgrywek, federacji narodowych itp. mogą znajdować się na chorągiewkach różnych, natomiast zabrania się umieszczania reklam (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 03 – zawodnicy**

W celu rozpoczęcia zawodów lub ich kontynuowania na boisku musi przebywać minimum siedmiu zawodników każdej z drużyn.

W każdy sposób przewidziany przez Przepisy Gry zawodnik może wznowić grę, natomiast wcześniej musi wejść na pole gry.

Jeśli zawodnik rezerwowy rozpocznie zawody bez wcześniejszego poinformowania sędziego, a sędzia w trakcie dowie się o takiej sytuacji zezwala na kontynuowanie zawodów przez tego zawodnika. Zawodnik rezerwowy, który był wpisany do protokołu, jako zawodnik podstawowy staje się zawodnikiem rezerwowym.

Każda osoba niewpisana do protokołu, jako osoba funkcyjna lub zawodnik z pola jest osobą niepożądaną.

Jeśli osoba funkcyjna, zawodnik wymieniony, wykluczony lub rezerwowy przerwie grę sędzia dyktuje rzut wolny bezpośredni, a jeśli sytuacja ma miejsce w polu karnym to rzut karny.

Zawodnik, który został wykluczony przed rozpoczęciem zawodów oraz przed oddaniem protokołów nie może pełnić żadnej funkcji tym samym nie może zostać wpisany do protokołu. W przypadku takim, kiedy protokół został oddany zawodnik wykluczony może zostać zastąpiony zawodnikiem rezerwowym, natomiast nie ma możliwości dopisania dodatkowej osoby do protokołu meczowego. Ilość zmian w zespole nie ulega zmianie. Zawodnik wykluczony w trakcie zawodów nie może zostać zastąpiony zawodnikiem rezerwowym.

W przypadku zdobycia bramki, kiedy gra zostanie już wznowiona, a sędzia zorientuje się, że na placu przebywała osoba niepożądana, zawodnik rezerwowy, zawodnik wymieniony lub osoba funkcyjna to taką bramkę musi uznać nie może jej „wymazać”.

Kapitanowie drużyn nie posiadają specjalnych praw oraz przywilejów, ponoszą jedynie pewnego rodzaju odpowiedzialność za zachowanie swoich kolegów (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 04 – ubiór zawodników**

Skarpety, taśmy oraz wszelkiego rodzaju materiały stosowane na getry muszą być takiego samego koloru, co getry danego zespołu.

Zawodnik, który przypadkowo zgubił ochraniacz lub but, od razu po zorientowaniu się powinien założyć dany element, natomiast nie później niż w najbliższej przerwie w grze. Jeśli zawodnik spełnia wyżej wymienione zasady, a międzyczasie zdobędzie bramkę, bramkę uznaje się.

Do obowiązkowego ubioru zespołów należy koszulka z rękawkami oraz spodenki. Zezwala się korzystać zawodnikom z bielizny termoaktywnej, natomiast w przypadku, kiedy wystają ona spod spodenek lub koszulki musi być w tym samym kolorze. Wszyscy zawodnicy drużyny mogą nosić tylko ten sam kolor.

Zezwala się używania bezpiecznych przedmiotów ochronnych takich jak czapka z daszkiem czy okulary sportowe.

Zabrania się wszelkiego rodzaju komunikacji elektronicznej pomiędzy zawodnikami, zawodnikami rezerwowymi, wymienionymi, a osobami funkcyjnymi na ławce rezerwowej.

Zawodnik, który zszedł z boiska w celu poprawy lub wymiany ubioru, może na nie powrócić jedynie po wcześniejszym sprawdzeniu ubioru przez jednego z sędziów (Gąsiorowski 2018).

- **Artykuł 05 – sędzia**

Wszystkie podjęte decyzje przez sędziego po wznowieniu gry, zakończeniu pierwszej połowy, drugiej lub dogrywki nie mogą zostać zmienione.

W przypadku, kiedy w jednym czasie zostanie popełnione wiele przewinień sędzia karze za cięższe przewinienia. Zwraca uwagę na taktyczne konsekwencje oraz dotkliwość fizycznych ataków.

Sędzia ma władzę do podejmowania decyzji od momentu, gdy wychodzi na przedmeczowe rozpoznanie boiska, do momentu opuszczenia boiska do szatni po meczu. Przez cały ten okras ma prawo do pokazywania żółtych i czerwonych kartek. Warto pamiętać, że w przerwie między połowami, przed dogrywką, w przerwie między połowami dogrywki oraz podczas wykonywania serii rzutów karnych sędzia również posiada taką władzę.

Wskutek ataku przeciwnika zawodnikowi udzielana jest pomoc, a przeciwnik otrzymał napomnienie lub wykluczenie, zawodnik poszkodowany, jeśli pomoc udzielona zostanie mu sprawnie może pozostać na placu gry.

Do obowiązkowego wyposażenia sędziego należy: zegarek, gwizdek, żółte i czerwone kartki oraz notatnik. Sędzia może również korzystać z systemu EPTS lub innych urządzeń monitorujących stan zdrowia pod względem kondycyjnym, sprzętu służącego do komunikacji między sobą np. chorągiewki z systemem beep lub zestaw komunikacyjny (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 06 - pozostali sędziowie**

Pozostali sędziowie pomagają w pracy sędziemu głównemu. Prowadzą oni notatki związane z bramkami, czasem gry czy niewłaściwym zachowaniem. Uczestniczą oni w przedmeczowej odprawie oraz sprawdzaniu stanu pola gry.

W przypadku, gdy sędzia główny nie jest w stanie poprowadzić zawodów np. dozna kontuzji, regulamin rozgrywek wyraźnie musi wskazać, która osoba z zespołu sędziowskiego poprowadzi zawody.

Do zadań sędziego technicznego należy sprawdzanie ubioru zawodników oraz zawodników rezerwowych, wskazania, ile czasu do pierwszej, drugiej połowy oraz podczas dogrywki doliczył sędzia główny (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 08 – rozpoczęcie i wznowienie gry**

Do sposobów wznowienia gry dopisano rzut wolny pośredni i bezpośredni, wrzut, rzut karny, rzut od bramki oraz rzut różny.

W przypadku, gdy piłka była poza grą i doszło do przewinienia lub zaistniała jakaś sytuacja wznowienie gry nie ulega zmianie.

Podczas wznowiania gry piłka musi wyraźnie poruszać się. Zniesiono obowiązek, aby piłka poruszała się do przodu.

Podczas rzutu sędziowskiego, sędzia wznowia grę z miejsca, w którym w momencie przerwania gry znajdowała się piłka, jeśli piłka znajdowała się w polu brakovym wznowienie nastąpi równoległe do linii bramkowej w miejscu najbliższym w chwili przerwania gry. W walce o piłkę podczas rzutu sędziowskiego może uczestniczyć każdy z zawodników znajdujących się na boisku, również bramkarze. Sędzia nie ma prawa decydować, któremu zespołowi należy się piłka (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 10 – wyłanianie zwycięzcy**

Podczas rzutów karnych, w celu wyłonienia zwycięzcy sędzia zaprasza kapitanów, a następnie przeprowadza losowanie poprzez rzut monetą w celu zdecydowania, na którą bramkę będą wykonywane rzuty karne. W przypadku złych warunków panujących pod jedną z bramek np. zły stan nawierzchni sędzia może bez losowania zdecydować, na którą bramkę będą wykonywane rzuty karne.

Zawodnik, który zgodnie z Przepisami znalazł się poza polem gry może wziąć udział w serii rzutów karnych. W przypadku, kiedy bramkarz nabawi się kontuzji zawodnik rezerwowy może go zastąpić.

Podczas rzutów karnych nie informuje się sędziego, w jakiej kolejności poszczególni zawodnicy będą wykonywać rzuty karne. Podczas wykonywania rzutów karnych, jeśli jedna z drużyn posiada większą ilość zawodników od drugiej drużyny, kapitan zgłasza sędziemu, który zawodnik lub zawodnicy nie będą brali udziału. W przypadku, kiedy nie został wykorzystany limit zmian bramkarza kontuzjowanego może zmienić zawodnik rezerwowy. Rzut karny jest rozstrzygnięty, kiedy piłka przestanie się poruszać lub sędzia przerwie wykonywanie rzutu ze względu na naruszenie Przepisów (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 11 – spalony**

Zawodnik atakujący znajduje się na pozycji spalonej, jeśli jakakolwiek część ciała np. głowa, noga znajduje się na połowie przeciwnika (nie zaliczamy do tego linii środkowej) w momencie zagrania piłki. W przypadku, kiedy linię spalonego wyznacza piłka lub zawodnik przeciwnej drużyny ręce zawodnika nie są wyznacznikiem pozycji spalonej. Rzut wolny pośredni wynikający ze spalonego zawsze wykonywany jest z miejsca zaistnienia spalonego.

Jeśli zawodnik drużyny broniącej znajduje się poza polem gry, jest brany pod uwagę w wyznaczaniu spalonego do momentu, aż drużyna broniąca wybije piłkę. Tak samo traktowany jest zawodnik atakujący, który jest brany pod uwagę przy wyznaczaniu spalonego do momentu, aż jego drużyna zakończy atak (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 12 – gra niedozwolona i niewłaściwe postępowanie**

W sytuacjach, przy których dochodzi do kontaktu pomiędzy dwoma lub więcej zawodnikami przyznawany jest rzut wolny bezpośredni (ewentualnie dodatkowo napominamy zawodników żółtą lub czerwoną kartką) (Pocięgiel 2002).

W przypadku zastosowania korzyści, a zawodnik popełniający przewinienie winien być wykluczony, przerwie korzystną akcję w dalszej fazie, sędzia dyktuje rzut wolny pośredni.

W przypadku przerywania korzystnej akcji w polu karnym, gdzie istnieje realna szansa na zdobycie bramki sędzia może karać napomnieniem zawodnika.

Agresywne, gwałtowne zachowanie wobec przeciwnika, jeśli nawet nie dojdzie do kontaktu karane jest wykluczeniem.

Każde uderzenie w głowę, które ma miejsce nie w walce o piłkę jest karane wykluczeniem, chyba, że siła jest znikoma.

Przewinienia na boisku, które są wykonywane na osobach funkcyjnych, sędziach lub zawodnikach rezerwowych karane są rzutami bezpośrednimi. Jeśli do przewinienia dochodzi po za polem gry rzutem wolnym bezpośrednim z linii bocznej lub rzutem karny, jeśli sytuacja zaistniała za linią ograniczającą bramkę zawodnika popełniającego przewinienie (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 14 - rzut karny**

W przypadku wykonania rzutu karnego przez współpartnera zawodnika, który miał wykonywać rzut karny dyktuje się rzut wolny pośredni, a zawodnik nieuprawniony do wykonywania rzutu karnego zostaje napomniany żółtą kartką.

Jeśli zawodnik wykonuje niedozwolone zwody taktyczne, dyktuje się rzut wolny pośredni oraz za próbę oszukania zawodnik otrzymuje żółtą kartkę, natomiast, jeśli wykonawca zagrywa piłkę do tyłu dyktuje się tylko rzut wolny pośredni.

Bramkarz, który nie przestrzega zasad podczas rzutu karnego napominany jest żółtą kartką, a rzut karny powtarza się (Plicz i in. 2016).

- **Artykuł 16 – rzut od bramki**

Podczas wykonywania rzutu od bramki, gry piłka wpadnie do bramki wykonawcy rzutu dyktuje się rzut różny dla drużyny przeciwnej.

Podczas wykonywania rzutu od bramki przeciwnik wykonawcy rzutu nie może zagrać piłki, jako pierwszy (Plicz i in. 2016).

#### **4. Podsumowanie**

Piłka nożna to dyscyplina sportu, którą interesują się miliony ludzi. Poprzez ciągły rozwój technologiczny Przepisy Gry ciągle muszą być udoskonalane. Bardzo ważnym jest, aby były czytelne i jasne dla wszystkich osób, które nawet nie znają szczegółowych zasad. Wielu kibiców, działaczy klubowych, czy też samych piłkarzy nie zdaje sobie sprawy jak rozległe są przepisy w grę, która wydaje się być banalnie prosta (Pocięgiel 2002). Dużo na ten temat mogą powiedzieć sędziowie piłkarscy oraz obserwatorzy, ponieważ to oni zwykli najczęściej czytać i analizować artykuły zawarte w przepisach. W ostatnich latach wprowadzono możliwość elektronicznej oceny czy piłka przekroczyła linię bramkową, obecnie wdraża się system wideo powtórek, z których może skorzystać sędzia. Choć w obecnych czasach wydaje się, że IFAB wprowadziła wszystkie niezbędne zmiany to w najbliższych latach z pewnością dowiemy się o nowych rozwiązaniach, które poprawią jakość piłki nożnej (Nadolski 2017).

#### **5. Literatura**

Plicz D., Przesmycki Z., Tenczyński D., Wierzbowski M.: Przepisy gry. Warszawa 2016.

Kowalski C.: Jak upadały mity. Gdynia 2017.

Gąsiorowski M.: To jest futbol. Krótka historia piłki nożnej. Warszawa 2018.

Pocięgiel J.: Piłka nożna – Przepisy Gry. Warszawa 2002.

Nadolski K.: Futbolowy zawrót głowy. Warszawa 2017.

# Sposoby łączenia oraz zabudowy szyn w torze bezстыkowym

Paulina Szablowska <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej, Kolejowej i Transportu, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego  
Paulina Szablowska: paulinaszablowskaa@gmail.com

## Streszczenie

W artykule opisano zasady konstruowania toru bezстыkowego w aspekcie budowy nowej nawierzchni kolejowej. Za dużą zaletę toru bezстыkowego uznaje się spokojną jazdę (brak stukotu na połączeniach szyn), mniejsze zużycie materiałów, większą trwałość szyn oraz mniejsze nakłady finansowe konieczne do utrzymania takiej konstrukcji. Tor bezстыkowy to taki tor, który jest złożony z szyn połączonych techniką zgrzewalniczą lub spawalniczą, gdzie minimalna długość toru, zgodnie z obowiązującymi przepisami wynosi 180 m. Maksymalna długość szyny powstałej w procesie produkcji to 120 m. Ze względu na fakt wykorzystywania szyn o bardzo dużej długości (180 m i więcej), w artykule opisano prace związane z ich transportem, załadunkiem oraz rozładunkiem. Z uwagi na konieczność łączenia szyn krótszych w dłuższe, w pracy omówiono również metody łączenia szyn, w tym spawania i zgrzewania, które są wykorzystywane do budowy tej konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** tor bezстыkowy, spawanie termitowe, zgrzewanie elektrooporowe

## Rules of rails' linking and building a continuous welded rail track

### Summary

The paper describes the rules of a construction/installation of Continuous Welded Rail (CWR) Track in terms of the construction of a new track surface. The big advantages of CWR Track include a smooth run (without the noise that comes from the abutment of rails), a lower wear of materials, a bigger durability of rails and a decrease in costs of retaining such a construction. CWR Track is the track that consists of the rails linked using the welded or thermit welded techniques. According to the current regulations, the minimal length of a track is 180m. The maximum length of a produced rail is 120m. Due to the usage of very long rails (180m and more), the paper also describes the works associated with its transport, loading and unloading. Because of the necessity of linking shorter parts of rails into longer ones, the author of the report also discusses the welding and thermit welding methods.

**Keywords:** Continuous Welded Rail Track, thermit welding, welding

### 1. Introduction

The basic element of the higher-grade railway surface is the Continuous Welded RailTrack (CWR Track), which consists of rails connected by welding. The minimum length of such a track is 180 m, while the maximum goes to infinity [www1].

In opposite to the classic track that is connected with supported or hanging joints, the CWRTrack is distinguished by a quiet and calm ride, through which it is understood that there are no wheel strikes when passing over the bending rail joints. Lack of visible connections increases not only passenger comfort, but also extends the lifetime of railway vehicles' wheels as well as the track itself. Thus it contributes to a reduction of costs up to 25-30%. The disadvantage of the use of such a construction is significant increase in the stresses occurring in the rail under the influence of the temperature load (Grulkowski 2013).

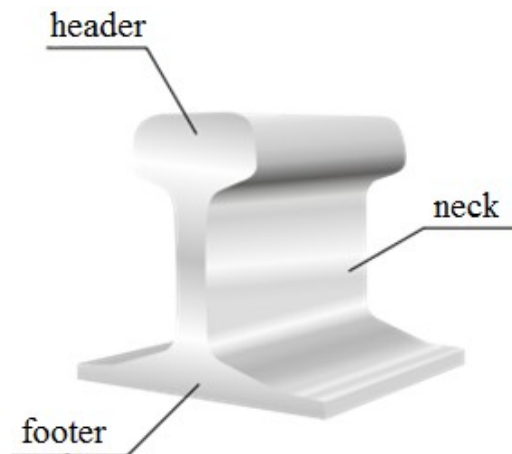
## 2. Rail as a basic element of CWR Track

The basic elements of CWR Track are rails. These are long structures with cross-section similar to double-T bar.

- Rail's cross-section

The classic rail consists of:

- footer – element that is combined with the sleeper with a fastening system;
- neck – the narrowest part of rail's cross-section that connect footer and a header;
- header – element on which vehicles' wheels are bowling[1].



Picture 1. Rail cross-section (www3)

Due to the different size and shape of the above-mentioned elements, it is possible to extract basic profiles (cross-sections) used in Poland. The most commonly used list is presented in the table No. 1.

Table 1. Rails' cross-sections used in Poland (own elaboration based on Grulkowski 2013)

Profile:	49E1	60E1
Mass [kg/m]	49,39	60,21
Width of footer [mm]	125	150
Width of header [mm]	67	72
Width of neck [mm]	14	16,5
Height [mm]	149	172

The cross-section of the rail has an awkward geometry. It is characterized by straight-line distribution of material between the head, neck and foot and a large number of roundings and cants. The rail mainly works on bending. In addition, it should be characterized by high toughness and also big ductility and elasticity.

- Rail's material

Due to the chemical composition steel used in the railway industry are classified as non-alloy medium-carbon or low-alloy chromium steel (Wielgosz 2009). They are made as alloys with an increased carbon content (0.4 - 0.75%) and manganese (0.6 - 2.10%). Increased content of these elements makes the material harder heighten its durability (Grulkowski



2013). Unfortunately, it also effects in some disadvantages. The bigger of it is poor weldability. That's why rails' steel is as hard-to-weld materials and their carbon equivalent is high (Wielgosz 2009).

The basic types of steel used for producing rails are: R260 and R350HT steel. The number in its name means toughness in a scale of a Brinell hardness (HB). HT symbol comes from "heat treatment". It means that this steel has been heat treated to increase its hardness. This treatment applies only to the rail head, as it is the element that is most exposed to damage as a result of contact with the rim of the vehicle's wheel. In addition, as the hardness increases, the brittleness of the treated steel also increases, so it should not be used in the entire cross-section of the rail (Grulkowski 2013).

According to polish documents (Biuro Dróg Kolejowych), rails made of R350HT steel are supposed to use in external courses of arches with rays under 800m and intensity of transport above 9 Tg. In other cases there should be used rails made of R260 steel.

- Rail's manufacturing

Railway rails are created in the metallurgical process as a result of rolling. In Polish steelworks, standard production lengths are: 25 m for the 60E1 profile and 30 m for the 49E1 profile. Distinction of such lengths in individual profiles gives a similar mass of received element (Grulkowski 2013).

Each rail during the production process is marked on the neck by protrusions that gives such an information: producer, date of manufacture, type of rail, type of steel - collectively they are called a rail feature (Grulkowski 2013).



Picture 2. Rail feature (own archive)

With the technological progress and the demand for higher quality materials and greater accuracy of work, the process of manufacturing long rails (120 m and 180 m) has begun

(Grulkowski 2013). In Poland, the first such rail was created at ArcelorMittal Poland SA. in Dąbrowa Górnicza in 2014 (www3). The advantage of long rails over short ones is the possibility to reduce the number of welds, which are the critical area of the CWR Track.

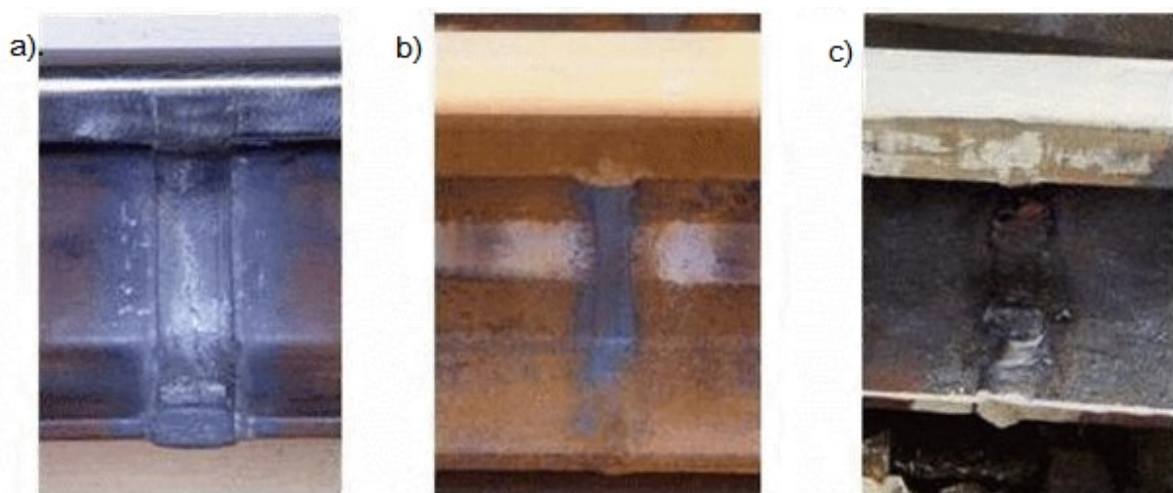
### 3. Rules of rails' linking

Rails cause many difficulties during bonding processes. As is was already mentioned, the main reason is the chemical composition of steel, in which there is a relatively high content of carbon and manganese.

In addition, joining the rails is difficult due to their size and the complicated cross-section. The heat distribution in the welding process using classic arc methods and gas welding is very unfavorable. It contributes to the creation of a wide zone of heat influence in the area of the weld - and in effect to the change of structure and thus also mechanical properties, such as plasticity index, hardness or elongation (Wielgosz 2009).

All these factors and the fact that rails joining process should take place in the most mechanized way as it is possible cause that currently used welding methods in Poland are: flash-butt welding and thermite welding. The main difference between these methods is lack of additional material in flash-butt welding and the use of termite in the case of thermite welding.

There is also a possibility to use arc welding process to join rails, but this method requires high qualifications of the worker performing the welding. What is more, the properties of joints may vary, so it should only be used in situations where there is no possibility of use other methods in terms of technology. A big disadvantage of this method is its high cost. In the following picture there is a comparison of the three methods of joining the rails:



Picture 3. Rail joining methods: a). thermite welding, b). flash-butt welding, c). arc welding (source: <http://spawalnictwoszyn.pl>)

- Flash-butt welding

This method consists of heating certain sections of rails near the contact to the temperature at which the plasticizing of the steel takes place. Then the material undergoes plastic swelling and this way a welded joint (Wielgosz 2009) is obtained. The place of a correctly made weld in the track is hardly visible at first glance. Only after looking closer we can see the place of conjunction.

Before starting the welding process, the rails should be properly prepared. The basic activity is to clean the rails to the metallic gloss on the front face, the ball head and bottom foot - both on the contact surface of the rails and the contact of the rails with the electrodes. What is more, the cleaned surface should be free from mechanical damage and unevenness. The ends of the rails should be perpendicular to the running surface and the rail foot (acceptable deviation is 0.6 mm) (Id-112).

It is forbidden to weld rail with this method at a temperature lower than  $-10^{\circ}\text{C}$ . If the temperature is between  $-10^{\circ}\text{C}$  and  $+5^{\circ}\text{C}$ , welding can be carried out, but the process should be preceded by heating the ends of the rails, for a length of 2m each, to a temperature of  $+15 / +20^{\circ}\text{C}$ . If the ambient temperature exceeds  $+5^{\circ}\text{C}$ , the welding process starts. It is continuous and cannot be interrupted (Id-112).

The rails welded together must come from one iron work and have the same length, steel grade, profile and class. The minimum length of the rail that can be used for welding is 30 m, while the welded rail - 180 m (for steel R260) and 120 m (steel R350HT). [3]

Welding can be performed in stationary welders (Pic. 4a) or on the construction site, using welders in the form of two-way machines (Fig. 4b). Welding should have such parameters as: welding current, upset force, rail displacement (shortening) and welding time depended on the steel grade and rail profile (Id-112).



Picture 4. Flash-butt welding machines: a). stationary, b). two-way machine type KCM-005 (source: own archive and <https://torpol.pl>)

After the weld has been made, it is necessary to carry out the joint processing, which consists in measuring the flash (material increasing the rail cross-section) and step (difference in head height between the weld), removing excess flash, straightening the weld area,

finishing the profile and receiving welds. In the case of welding steel of the R350HT grade, heat treatment of the weld should be additionally performed [3].

- Thermite welding

This method consists in filling the clearance between neighboring profiles with a binder formed as a result of a termite reaction [6]. The size of the space is usually 25 mm. In the case of repair work, a higher value - 50, 68, 75 mm is allowed. The termite can be used for both new and old rails, but their height difference cannot exceed 1 mm. Welding may only be performed by a person having the appropriate ID, which is issued by PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. - Diagnostic Center. The smallest working team consists of a welder and his helper [2]. Every authorized welder has his own number, which is knocked out on the outside of the rail header in the area of the weld. Such solutions allow for easy identification of the person performing the given connector.

There are many methods of thermite welding. The SoWoS is considered to be the basic and the most frequently used in Poland.

Before welding the rails and the place of welding should be properly prepared. To do this, there must be done steps as followed:

- ballast must be renewed and tracklining, surfacing and temping must be done;
- remove / loosen fastening system from the rails on at least 3 sleepers in both directions [2];
- arrange a ballast-protective plate against contamination;
- clean the rails on side and front surfaces from scale, at a length of min. 10 cm on both sides of the connector;
- set the ends of the welding rails so that the welding sapce is 24-26 mm and the ends of the rails over 1000 mm are raised 2.4-2.8 mm above the running surface;
- check the perpendicularity of the contact surface to the remaining surfaces.

Rails cannot be welded at a temperature lower than + 5°C, or during atmospheric precipitation. The optimum temperature for welding is the neutral temperature, which is in the range + 15°C ÷ + 30°C. In addition, the temperature of the rails during the welding process should be constantly monitored by a rail thermometer (*Id-5 (D7)*).

After preparing the rails for welding, a special stand (Pic. 5a) is assembled. It is used to attach the burner, form and crucible. Consecutively form is installed (Pic. 5b) and sealed with molding sand or sealing sand. The final stages of preparation for welding are the placing of containers (bowls). Into it the excess of adhesive will flow out (Pic. 5c). Next the burner is applied (Pic. 5d) (Kosicki).



Picture 5 a). Stand

b). Form installing

c). Bowls application

d). Burner assembling

Source: <http://www.transportszynowy.pl/>

After heating the ends of the rails, the burner is removed, the mold is plugged with a special plug, and then a crucible is filled with a termite (Pic. 6a) - the material used for welding. It is a mixture of powdered iron oxides with aluminum, which is part of the welding binder. Under the influence of the fire, it ignites (Pic. 6b), and in the crucible there is a violent reaction of reduction of iron oxides through aluminum, which gives off a large portion of energy (heat) and a binder in the form of iron. The binder under the influence of heat leaks from the burning crucible into the mold (Pic. 6c). When the iron leaks, the still burning crucible is removed from the mold (Pic.6d).



Picture 6 a). Crucible

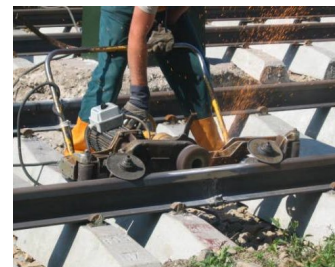
b). Arson

c). Binder leak

d).Bowswithoutcrucible

Source: <http://www.transportszynowy.pl/>

After removing the crucible, remove the containers (cups) with excess iron (Pic. 7a) and wait for 3-5 minutes for the adhesive to cool (Pic. 7b). Subsequently, the form and dead head from the rail are removed (Pic. 7c). The last stage is to grind the running surface of the rail and check its straightness (Pic. 7d) (Kosicki)



Picture 7 a). Form without cups

b). Cooled adhesive with form

c). Removing form and a dead head

d). Grinding the weld

Source: <http://www.transportszynowy.pl/>

Finally, the place where the correct weld is made looks like in the following way:



Picture 8 Thermite weld: a). Side view; b). Overview Source: Own archive

#### 4. Long rails transport

Long rails (over 120 m) are transported only by rail transport. Undoubtedly, they are oversized load, which requires special attention. For their transport there are used platform carriages on special construction trolleys.

- Loading of rails

The transport of rails begins with their loading. It takes place in a ironworks where the rails have been produced or welded into sections of larger lengths. The loading is not regulated by general regulations. It is performed on the basis of internal guidelines and instructions of a ironworks (www.2).

The rail is placed on the platforms on its footer, one next to the other. Then successive layers are separated with a spacer based on the platform's elements. In the past sleepers were used as a separation but with the technological progress, the production of special platforms was started. The rails should be also connected with bands near their ends and the central point to protect against the spreading of the load (www.2)



Picture 5. Special 412Za platform for rails' transport (source: <http://www.protorsa.com.pl/>)

- Transport

In Poland, rail transport is carried out at a maximum speed 50 km / h. The train with rails applies to all restrictions resulting from the movement of freight trains. Furthermore, the speed is limited to 10 km / h in the case of curves at stations, reverse curves, curves with a radius less than 400 m or crossing through travel routes (www.2).

The manager supervises the correctness of transport. He observes the train set while driving. Train is completed by adding a covered wagon, which protect the transport manager and other tools and equipment transported with the rails in case of bad weather conditions. The wagon should be located at the end of the train and be equipped with brakes (www.2).

- Unloading of rails

The unloading of long rails is carried out by hooking the rail on the platform to the rail built into the track or to the excavator and slowly pulling the train in the opposite direction. The speed at which the train moves during unloading should not exceed 5 km / h. The next rails are pulled through the previous short links connected with them (before the end of unloading one rail the train slows down and the next one is strapped to the previous one) (www.2). The last platform can also be equipped with devices that expedite the unloading process.



Picture 6. a). Last platform equipped with special devices expediting the unloading process; b). Special devices expediting the unloading process located out of the platform (source: a). <http://www.vossloh-rail-services.com>; b). <http://cemafer.com>)

The rails can be unloaded on the inner side of the rail or outer tracks. It is depended on the type of works that are going to be carried out. Unload inwards take place when we exchange only rails or a part of the surface in the track. Unload on the outside is made in case of replacement of the whole surface with a special technique and machines. Regardless of the unloading side, the rail must always be laid on an flat surface, in a vertical position. That protects rails from damages.

Particular attention should be paid to the unloading of rails in arches. The rail located freely (without rail fastening system) has a greater ability to buckling under the influence of high temperature. The correct way of unloading the rails in such a place is to arrange them on the outside of the existing track (on a flat surface - eg on a leveled prism of the ballast). The rail on the outside of the arch should be laid with overlap, while in the inside - with space.



Picture 7. Buckling of the rail due to its inappropriate unload and hold in the horizontal curve (source: own archive)

## 5. Summary

The paper describes basic information about the key element of CWR track - rails. Methods of their connection, loading, unloading and transport are described. It should be remembered that they are an element that requires special attention at every stage - both production, transport, development and operation. It is Due to the complicated type of their work and the direct interaction between the rail and the wheel of the rolling stock. What is more, special attention should be also paid to the correct performance of their joints, as these are places where failures or faults occur most frequently.

## 6. Literatura

Grulkowski S., Kędra Z., Koc W., Nowakowski M.J.: Drogi Szynowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013, s. 76-85.

Id-5 (D7) – Instrukcja spawania szyn termitem, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2005, s. 5-11, s. 22-32.



Id-112 - Warunki techniczne wykonania i odbioru zgrzein w szynach kolejowych nowych łączonych zgrzewarkami stacjonarnymi. Wymagania i badania, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2013, s. 4-10.

www.1 Kolejopedia, <http://www.kolejpedia.pl>, (7.12.2018r.).

www.2 Kolejowa strona przepisowa, <http://kolej.krb.com.pl> (10.12.2018r).

www.3 Kosicki D., Drogi żelazne, Spawanie termitowe szyn, <http://www.drogizelazne.org>, (7.12.2018r.).

www.4 Warunki techniczne wykonania i odbioru szyn kolejowych – wymagania i badania. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Biuro Dróg Kolejowych, Warszawa 2007.

Wielgosz R.: Łączenie bezстыkowych szyn kolejowych, „Czasopismo Techniczne” 2009, Zeszyt 6, s. 2-4,12.

www.5 Wikipedia, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Szyna\\_\(profil\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Szyna_(profil)), (7.12.2018r.).

# Numerical modelling of heat and fluid flow through granular structures

Ewa Szymanek <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Institute of Thermal Machinery, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Czestochowa University of Technology, Armii Krajowej 21, 42-201 Czestochowa, Poland  
Ewa Szymanek: ewaszym@imc.pcz.pl

## Summary

The heat and fluid flow through a bed of granular materials is usually described using models that contain a number of empirical parameters and constants, which are often very difficult to define. The progress of computer technology and CFD (Computational Fluid Dynamics) models allow to simulate the flows phenomena in packed beds more accurately and get a more detailed understanding of the physical mechanisms occurring in them. Heat transfer between particular granular particles and flowing medium is of primary importance for many industrial applications, e.g. in energy storage systems or in chemical reactors. To get an insight into these issues, the present work focuses on heat transfer process in complex structures using numerical modelling. For this purpose, a CFD model is used to calculate internal temperature distributions and their variability over time. It is based on the unsteady heat transfer and Navier-Stokes equations. The flow in the granular layers is modeled using the immersed boundary (IB) technique, which allows the use of Cartesian meshes for objects even with very complex geometrical shapes. The use of the IB method allowed performing efficient simulations for granular layers with varying permeability and various distributions of grains. The obtained numerical results were compared with data obtained from the ANSYS Fluent program or experimental data available in the literature. It was observed that the structure of the layers significantly affects the heat transfer process.

**Keywords:** granular material, IB method, CFD modelling, heat and mass transfer

## Numeryczne modelowanie przepływu ciepła i płynu w strukturze ziarnistej

### Streszczenie

Przepływ ciepła i płynu przez złożę materiałów granularnych jest zwykle opisywany za pomocą modeli, które zawierają szereg parametrów empirycznych i stałych, często trudnych do zdefiniowania. Postępy technologii komputerowej i CFD (Computational Fluid Dynamics) pozwalają na dokładniejszą symulację zjawisk przepływu w upakowanych złożach i uzyskanie bardziej szczegółowego zrozumienia występujących w nich mechanizmów fizycznych. Przenikanie ciepła pomiędzy poszczególnymi cząstkami granulatu i płynnym ośrodkiem ma podstawowe znaczenie dla wielu zastosowań, np. w systemach magazynowania energii lub w reaktorach chemicznych. Aby uzyskać wgląd w te zagadnienia, niniejsza praca koncentruje się na procesie wymiany ciepła w złożonych strukturach przy użyciu modelowania numerycznego. W tym celu wykorzystuje się model CFD do obliczania wewnętrznych rozkładów temperatury i ich zmienności w czasie. Oparty jest on na niestacjonarnym przepływie ciepła i równaniach Naviera-Stokesa. Przepływ w warstwach granularnych jest modelowany przy użyciu techniki zanurzonej granicy (IB), która pozwala na użycie kartezjańskich siatek dla obiektów nawet o bardzo złożonych kształtach geometrycznych. Zastosowanie metody IB umożliwiło przeprowadzenie wydajnych symulacji dla warstw granularnych o różnej przepuszczalności i różnych rozkładach granulatu. Uzyskane wyniki liczbowe porównano z danymi uzyskanymi z programu ANSYS Fluent lub danymi eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Zaobserwowano, że struktura warstw znacząco wpływa na proces wymiany ciepła.

**Słowa kluczowe:** materiał granularny, metoda IB, modelowanie CFD, przepływ ciepła i masy

### 1. Introduction

The immersed boundary (IB) method provides an accurate description of the heat and mass transfer and gives detailed information about its behavior around solid bodies in the computing domains. The advantage of this method is that the flow can be solved on Cartesian grids, and objects immersed in the flow domain can be arbitrarily complex. There is no need to design a grid around them. It has been shown that IB method can be successfully used in

simulations of flow around granular objects (Szymanek, Tyliczszak 2018, Szymanek, Tyliczszak 2018) regarded as layers composed of granular material and air in intergranular spaces. The IB method was used for laminar flows around spherical granular materials. The numerical model applied in this paper allows to precisely compute the inner temperature distributions and their variability over time. The solver used in this research is an in-house code called SAILOR. It is based on the unsteady equation of heat conduction (3D) and the Navier-Stokes equations, which allow modeling the airflow in the cases in which the layers are made of permeable granular materials. The analyzed problem is treated as unsteady and the flow is assumed to be laminar. The solution algorithm is based on the projection method for determining the pressure field and velocity. A high-order compact method in combination with the WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) scheme and predictor-corrector method are applied for the spatio-temporal discretisation. It was demonstrated that the IB method can be used in domains changing in time, with moving objects and with heat exchange (Fadlun et al. 2000, Mittal, Iaccarino 2005). Concerning discretization methods it has been successfully applied along with the spectral methods and finite/compact difference methods. In this work we apply probably the simplest variant of the IB method, i.e., the so-called volume penalization method (IB-VP), also known as fictitious domain (Mittal, Iaccarino 2005, Khadra et al. 2000) method. In the IB-VP approach the fluid is penalized from entering a solid part of adoma in by adding a continuous forcing term to the equations governing the heat and fluid flow. The forcing extends throughout the entire volume of solid body and is not just confined to a neighbourhood of the solid interface. What makes the IB-VP method very attractive is the simple implementation and the use of an easily definable phase-indicator function (mask function), which by "switching-on / off" easily identifies the computational nodes as fluid or solid parts. The correctness of applied numerical model has been verified by ANSYS Fluent.

## 2. Mathematical model

The flow is governed by the continuity equation, the Navier-Stokes equations and the energy equation. With the low Mach number they have been defined as:

$$\begin{aligned}\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) &= 0 \\ \rho(\partial_t u + (u \cdot \nabla)u) + \nabla p &= \nabla \cdot \tau + f^{IB} \\ \rho C_p(\partial_t T + (u \cdot \nabla)T) &= \nabla \cdot (k \nabla T) + f_T^{IB}\end{aligned}$$

The symbol  $\rho$  stands for the density,  $T$  - temperature,  $p$  - hydrodynamic pressure,  $u$  - velocity vector,  $C_p$  - heat capacity and  $k$ - heat conductivity. The set of these equations is

complemented with the equation of state  $p_0 = \rho RT$ . In open flows with inlet/outlet boundaries  $p_0$  is constant in space and time (Tyliszczak 2016). The molecular viscosity ( $\mu$ ) within the viscous tensor ( $\tau$ ) is computed from the Sutherland law. The source terms  $f^{IB}$  and  $f_T^{IB}$  originate from the IB method and their role is to act on a fluid in such a way as if there were a solid object immersed in the flow domain.

## 2.1 Solution algorithm

The solution algorithm for set of three equations is formulated in the framework of a projection method (Fletcher 1991) for pressure-velocity coupling with a direct forcing approach for the IB method (Mittal, Iaccarino 2005). The time integration is based on a predictor-corrector approach (Adams-Bashforth/Adams Moulton) and the spatial discretisation is performed using 6th/5th order compact difference and WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) schemes on half-staggered meshes (Tyliszczak 2014, Tyliszczak 2016). In the framework of the IB approach the solution algorithm is defined as follows.

### Predictor step

Generally, we assume that the time-step ( $\Delta t$ ) can vary as the flow velocity changes in the successive time-steps,  $\dots, n-1, n, n+1, \dots$ . With this assumption the 2nd order Adams-Bashforth method is given as:

$$\frac{\rho u^* - \rho u^n}{\Delta t^n} = \left(1 + \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}}\right) Res(u^n) - \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}} Res(u^{n-1}) - \nabla p^n + f^{IB}$$

$$\frac{T_i^* - T_i^n}{\Delta t^n} = \left(1 + \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}}\right) Res(T^n) - \frac{\Delta t^n}{2\Delta t^{n-1}} Res(T^{n-1}) + \frac{1}{\rho C_p} f_T^{IB}$$

where  $Res(u), Res(T)$  represent the convection and diffusion terms of the Navier-Stokes and energy equations. The computed velocity field  $u^*$  does not fulfil the continuity equation (*i. e.*  $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u^*) \neq 0$ ) and according to the projection method (Fletcher 1991) it must be corrected using the gradients of pressure correction ( $p'$ ) according to the following formula:

$$\rho u^{**} = \rho u^* - \Delta t^n \nabla p'$$

where  $p'$  is computed from the Poisson equation:

$$\nabla \cdot (\nabla p') = \frac{1}{\Delta t^n} [\nabla \cdot (\rho u^*) + \partial_t \rho^*]$$

resulting from the condition  $\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u^{**}) = 0$ .

The density is computed from the equation of state  $p_0 = \rho^* RT^*$  and its time derivative needed in

$\nabla \cdot (\nabla p') = \frac{1}{\Delta t^n} [\nabla \cdot (\rho u^*) + \partial_t \rho^*]$  is discretized using 2nd order formula

$$\partial_t \rho^* = \frac{(\Delta t^n \Delta t^{n-1})^{-1}}{(\Delta t^n \Delta t^{n-1})} \{[(\Delta t^n + \Delta t^{n-1})^2 - (\Delta t^n)^2] \rho^* - (\Delta t^n + \Delta t^{n-1})^2 \rho^n + (\Delta t^n)^2 \rho^{n-1}\}$$

### Correctorstep

The 2nd order Adams-Moulton method is defined as:

$$\frac{\rho u^* - \rho u^n}{\Delta t^n} = \frac{1}{2} (Res(u^{**}) + Res(u^n)) - \nabla p^n + f^{IB}$$

$$\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t^n} = \frac{1}{2} (Res(T^{**}) + Res(T^n)) + \frac{1}{\rho C_p} f_T^{IB}$$

Again, the velocity field  $u^*$  does not fulfil the continuity equation and its correction is defined as:

$$\rho u^{n+1} = \rho u^* - \Delta t^n \nabla p'$$

The equation  $\rho_t + \nabla \cdot (\rho u^{n+1}) = 0$  leads to the Poisson equation. Its solution allows us to correct the velocity using  $\rho u^{n+1} = \rho u^* - \Delta t^n \nabla p'$  and to update the pressure field as:

$$p^{n+1} = p^n + p'$$

The density is computed from  $p_0 = \rho^* R T^{n+1}$  and the next time step begins.

### 2.2 IB-VP source term

The IB-VP method works through penalizing a difference between the actual and assumed velocity and temperature of the solid body. The role of the source terms  $f^{IB}$  and  $f_T^{IB}$  is to mimic the presence of solid objects in the flow domain. In the volume penalization variant of the IB method they are defined as:

$$f^{IB} = -\frac{\rho}{\eta} \Gamma(x)(u - u_s)$$

$$f_T^{IB} = -\frac{\rho C_p}{\eta} \Gamma(x)(T - T_s)$$

Where  $u_s$  and  $T_s$  are the velocity and temperature of the solid body. The symbol  $\eta \ll 1$  is the so-called penalization parameter with dimension of time unit and  $\Gamma$  - the phase indicator defined as:

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x \in \Omega_f \\ 1, & \text{for } x \in \Omega_s \end{cases}$$

For  $\Gamma(x) = 1$  with  $\eta \ll 1$  the equations for velocity and temperature reduce to  $u^* \approx \frac{\Delta t^n u_s}{(\eta + \Delta t^n)}$  and  $T^* \approx \frac{\Delta t^n T_s}{(\eta + \Delta t^n)}$  which for  $\eta \ll \Delta t^n$  leads to  $u^* \approx u_s$  and  $T^* \approx T_s$ . Thus, the forcing terms

enforces the no-slip boundary conditions and set the required temperature of the solid objects. Simplicity of the IB-VP method has, however, direct consequences in lower accuracy. Similarly, as in the classical IB method with a stepwise approach (i.e. without the

interpolation (Fadlun et al. 2000) the formal order of the IB-VP method is at most equal to one (Khadra et al. 2000, Kadoch et al. 2012).

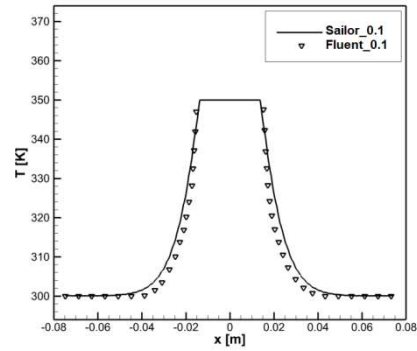
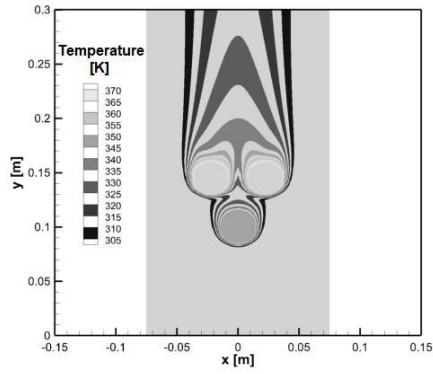
### 3. Results

#### 3.1 Flow around three heated spheres

The accuracy of the IB-VP method is at most of the first order. Here, we verify how this limitation translates to the results obtained for the cases including the heat transfer around heated spheres. To verify the accuracy of the IB method the results obtained using the commercial Ansys Fluent program were used. In the test case the flow around three hot spheres ( $D = 10\text{mm}$ ) is analysed. The spheres (Fig.1a, Fig.2a, Fig.3) have the following coordinates respectively:  $(X,Y,Z) = (0.0,0.0,0.1)$ ,  $(X,Y,Z) = (-0.0225,0.0,0.145)$ ,  $(X,Y,Z) = (0.0225,0.0,0.145)$ . Temperature of the first sphere is 350K, while next two have temperature 375K. The temperature of the incoming flow is 300K. The flow rate is assigned such that the Reynolds number based on the inlet velocity and sphere diameter is equal to 10, 40 and 100 respectively. The grids contained respectively  $121 \times 160 \times 121$  and  $121 \times 320 \times 121$  nodes for the SAILOR code and approximately  $4 \cdot 10^6$  cells for simulation using the ANSYS Fluent code. It should be noted that preparing a body-fitted mesh in these relatively simple configurations was not difficult. However, the geometry of the layer studied later required much more work. The applied IB method is free from such problems, i.e. fixed objects can be in any form of contact and even deformed in each direction. The results of calculations are shown in Fig.1 and Fig.2.

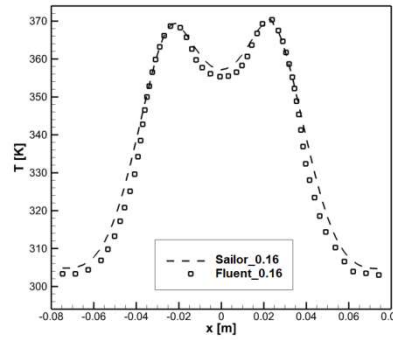
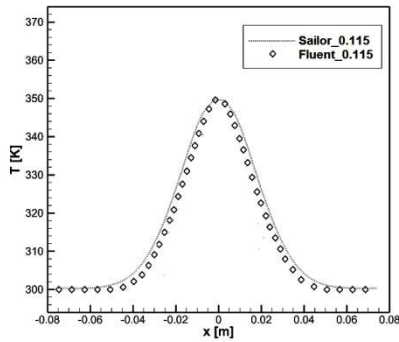
These are the temperature and velocity profiles along the line crossing the first sphere ( $y=0.1\text{m}$ ), just above the first sphere ( $y=0.115\text{m}$ ) and just above the next two spheres (in their upper part ( $y=0.16\text{m}$ )). Differences in the results on different grids were so small that only results for  $121 \times 320 \times 121$  nodes for the SAILOR code are presented in the graphs.

One can observe very good accuracy of the numerical results for temperature and it is ideal for velocity results. We notice the biggest discrepancies at the edge of the domain and at the transition between the two spheres for the temperature. As far as the velocity values are concerned, in this case we do not notice any major discrepancies. It can be seen that compatibility between the results is good. It proves that the applied IB-VP method and the solution algorithm are accurate and formulated correctly. The velocity is predicted very precisely. Some disagreement is visible in the temperature profiles. The purpose of next simulations was to emphasize differences in temperature distribution for different flow conditions. The results presented in Fig.3 are for  $\text{Re}=10$  and  $\text{Re}=40$ .



a)

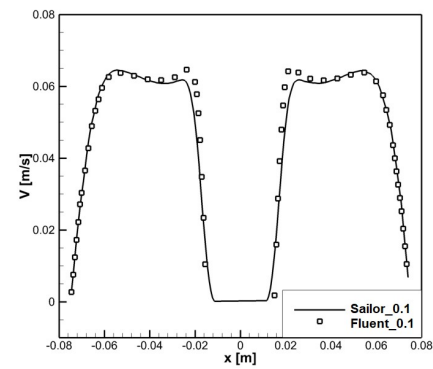
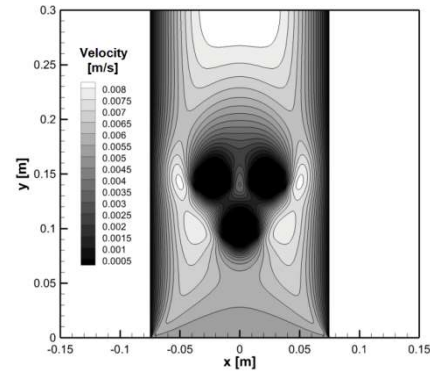
b)



c)

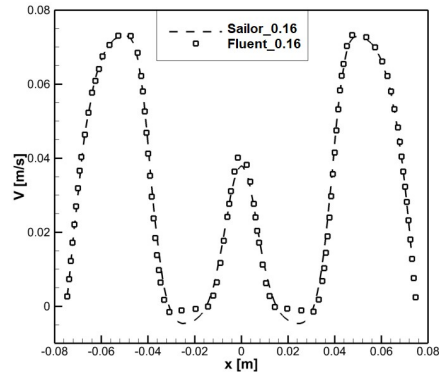
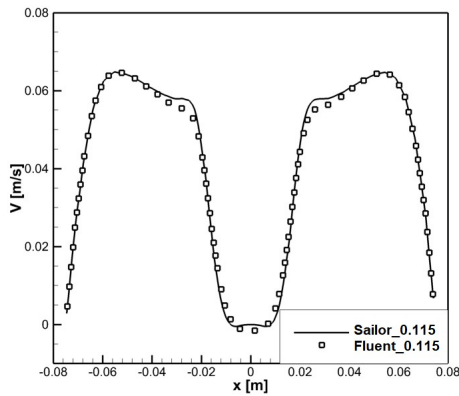
d)

Fig.1 Temperature distribution around three hot spheres for the Reynolds number equal to 100



a)

b)



c)

d)

Fig.2 Velocity distribution around three hot spheres for the Reynolds number equal to 100

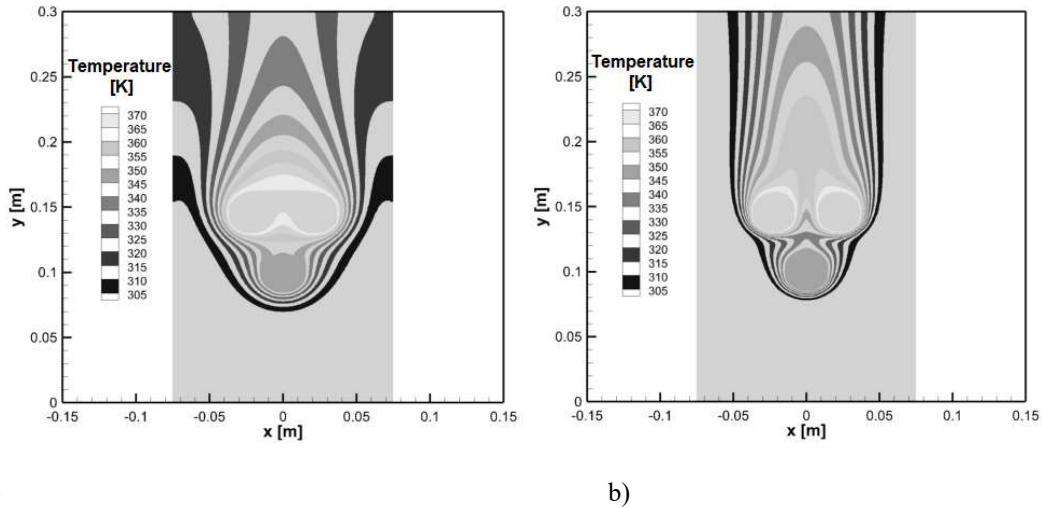


Fig. 3 The temperature distribution around the three hot spheres for the Reynolds number respectively: a)  $Re = 10$  and b)  $Re = 40$ .

It can be clearly seen that changing Reynolds number has a huge impact on the results. The temperature contours for  $Re=10$  are significantly extended and its values increase in the middle part of the domain. For instance, the temperature between the spheres at the height of about 0.14m for  $Re = 10$  equals 371K, whereas for  $Re=40$  it is equal to 349K.

### 3.2 Flow through granular layer

A layer of granular material considered in this article was composed of spheres with a diameter of  $D = 0.008\text{m}$  and temperature  $T = 400\text{K}$ . The computational domain was a rectangular box  $0.1 \times 0.3 \times 0.1\text{m}^3$  in which ten layers of  $10 \times 10 \times 10$  hot spheres were placed in the central part of the domain starting from  $y = 0.05\text{m}$ , as shown in Fig.4a. The gaps between particular spheres were equal to  $0.0002\text{m}$ . At the lower boundary we assume uniform velocity  $0.1959\text{m/s}$  and temperature  $300\text{K}$ . The Reynolds number based on the inlet velocity, sphere diameter and kinematic viscosity was  $Re = UD/\nu = 100$ . The computations were performed with the use of a uniform mesh consisting of  $181 \times 240 \times 181$  for the SAILOR code and body-fitted mesh with approximately  $11 \cdot 10^6$  cells for the ANSYS Fluent code.

Two planes along the  $y$  axis for analysis were selected. One of them was placed at the central part of the domain (passing between the spheres (Fig. 4b)) and the second one - crossing the spheres (Fig. 5 a, c). The comparison of the results is presented in Fig.4c and Fig.5b,d showing temperature and velocity profiles at the locations  $y = 0.08\text{m}$  (in the layer) and  $y = 0.15\text{m}$  (above the layers) along the  $x$ -coordinate on the lines placed across the spheres and above the layer.

The air entering the system is cooler than the spheres temperature. This means that the temperature distribution changes, and the temperature value after flow around the sphere



increases. In Fig. 5c local regions of recirculation with downward flow can be observed. In the direction parallel to the direction of the air inlet you can see clear traces of low temperature behind the balls (Fig. 5 a). Significantly higher flow temperatures and higher velocity can be observed between spheres in intergranular spaces.

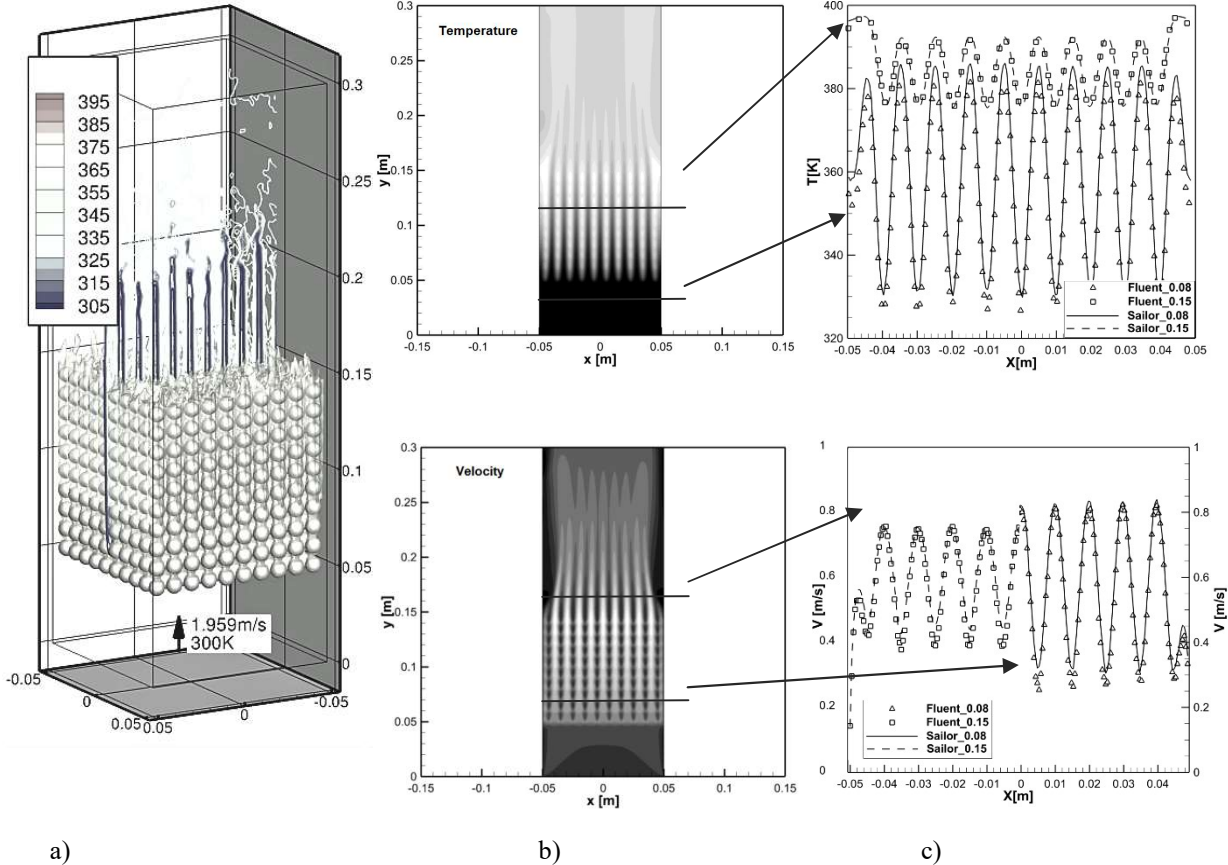


Fig. 4 Granular layer of  $10 \times 10 \times 10$  hot spheres in the central part of the domain (a), temperature and velocity distribution at a plane passing between the spheres (b), comparison temperature and velocity for two heights (c)

It is worth paying attention to the negative values of the velocity over the spheres marked in black (Fig. 5 c). These are the recirculation zones behind the spheres that increase the heat exchange surface by intensifying the mixing. It can be seen the increase in the value of the velocity between the spheres (Fig. 4 b), which exceeds the inlet velocity. This is because in the area of the granular material the spheres occupy most of the volume and the flow must accelerate for the reason of mass conservation.

In this case, you can also observe almost perfect agreement in the results. The IB solutions were compared with the results obtained using ANSYS Fluent code and it was found that in every spatial location the present results agreed almost perfectly. It has been shown that the same level of accuracy is obtained for selected profiles from the plane passing through the centers of the spheres and between spheres.

It can be seen that discrepancies between the results obtained with the help of the SAILOR and ANSYS Fluent codes are small and only quantitative. Values of the velocity and temperature are predicted very well.

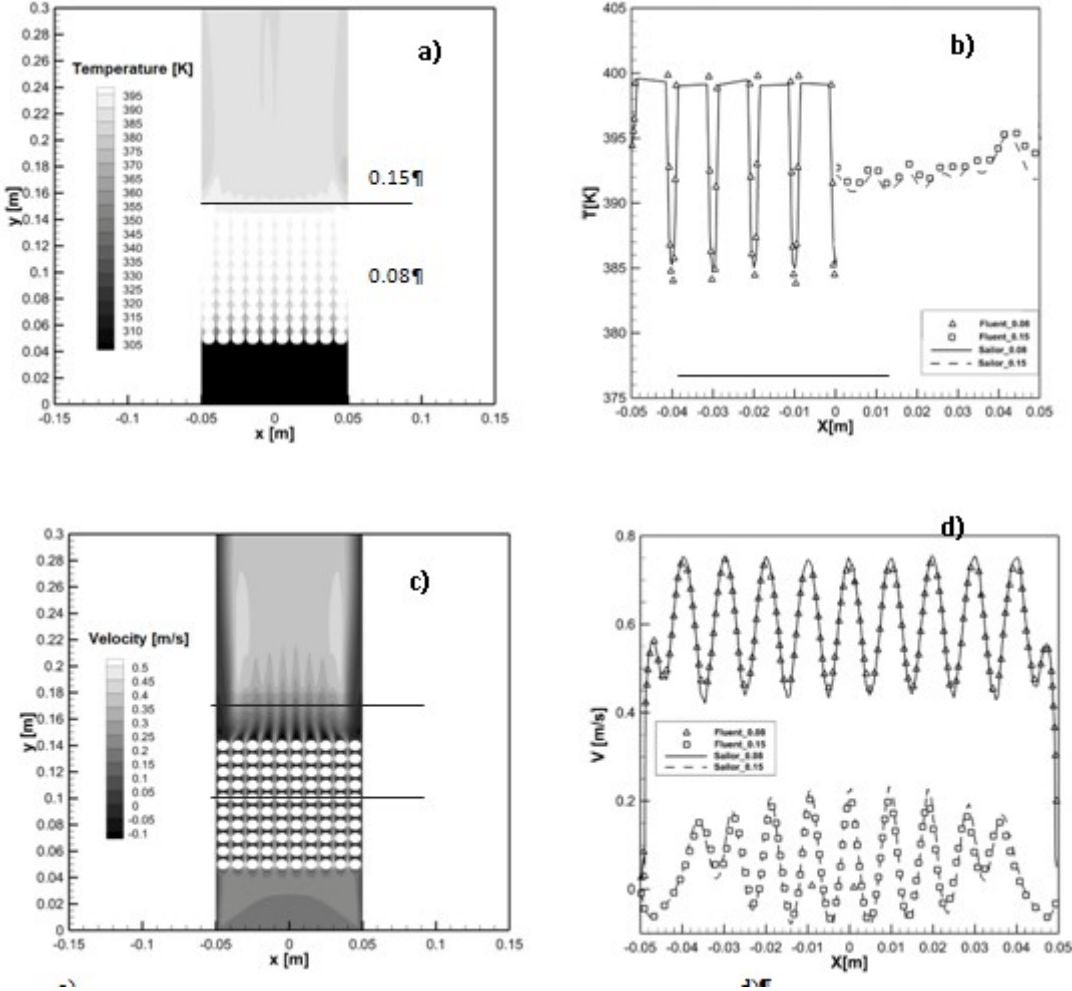


Fig. 5 The results in a plane passing through the spheres showing the temperature (a) and velocity (c) distribution and comparison of numerical results of temperature (b) and velocity (d) for two heights

#### 4. Conclusions

The paper presents the simulations of heat and fluid flow through a spherical granular material. The presented test calculations were carried out for flow around three spheres for the Reynolds equal 100. These results were compared with numerical data obtained using the commercial Ansys Fluent program. The comparisons showed a fairly high accuracy of the applied technique. Additionally, the results of calculations for channel flow around three for two different Reynolds numbers were presented,  $Re = 10$  and  $Re = 40$ . The calculations carried out for the flow through the granular bed showed that the proposed method can also be used in complex problems. In all cases, the results obtained good agreement.

## **Acknowledgements**

This work was supported by National Science Centre, Poland (Grant no. 2017/27/N/ST8/02318) and statutory funds of Czestochowa University of Technology under BS/MN 1-103-301/2018/P. PL-Grid infrastructure was used to carry out the computations.

## **5. Literature**

- Szymanek E., Tyliczszak A., 2018. Experimental and numerical research on heat and air flow through a granular material, *Journal of Physics. Conference Series* Vol. : 1101, 012043.
- Szymanek E., Tyliczszak A., 2018. Modelling of heat transfer and fluid flow through a granular material and external wall barrier, 17<sup>th</sup> International Conference on Fluid Flow Technologies Budapest, Hungary.
- Fadlun E.A., Verzicco R., Orlandi P., MohdYusof J., 2000. Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for ThreeDimensional Complex Flow Simulations. *J. Comp. Phys.*, 161: 35-60.
- Mittal R., Iaccarino G., 2005. Immersed boundary methods. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 37: 239-261.
- Khadra K., Angot P., Parneix S., 2000. Fictitious domain approach for numerical modelling of Navier-Stokes equations, Caltagirone JP. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 34: 651684.
- Tyliczszak A., 2016. High-order compact difference algorithm on half-staggered meshes for low Mach number flows. *Comput. Fluids*, 127: 131-145.
- Fletcher C.A.J., 1991. *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag.
- Tyliczszak A., 2014. A high-order compact difference algorithm for half-staggered grids for laminar and turbulent incompressible flows. *J. Comp. Phys.*, 276: 438-467.
- Kadoch B., Kolomenskiy D., Angot P., Schneider K., 2012. A volume penalization method for incompressible flows and scalar advection diffusion with moving obstacles. *J. Comp. Phys.* 231: 4365-4383.

# **Aula Leopoldina - przykład iluzjonistycznego malarstwa nasklepiennego późnego baroku**

**Witold Szymański <sup>(1)</sup>, Maurycy Kin <sup>(2)</sup>**

<sup>1</sup> Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej

<sup>2</sup> Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej

Witold Szymański: witoldszymanski@o2.pl

## **Streszczenie**

W pracy przedstawiono analizę przyczyn wielu nieporozumień i sporów obecnych w komentarzach, opracowaniach, analizach i opisach historyków i teoretyków sztuki renesansu i baroku, dotyczących traktatów o perspektywie (zarówno teoretycznych, jak i tych zawierających gotowe wzory układów perspektywicznych). Wyjaśniono i zdefiniowano błędy pojęciowe i metodologiczne, jakich dopuszczają się oni w swoich opracowaniach. W tekście przypomniano podstawowe własności przekształcenia perspektywicznego będącego aparatem perspektywy wspomniano także o układach perspektyw. Na podstawie malowideł w Auli Leopoldina zostały sformułowane wnioski tożsame z tymi, do jakich doszli praktycy sztuki anamorfoz, a w szczególności anamorfoz nasklepiennych (iluzjonistycznego malarstwa nasklepiennego i ściennego późnego baroku).

**Słowa kluczowe:** malarstwo nasklepienne, anamorfozy, perspektywa

## **Aula Leopoldina – an example of illusionistic ceiling painting in late baroque style**

### **Summary**

Paper presents the analysis of the reasons of controversies existing in literature created by researchers of the art history on the field of perspective. The basic definitions being the sources of mistakes in explanations of illusionistic and wall painting have been proposed. Paper also contains the description of rules and backgrounds of perspective reconfigurations. On the base of ceiling painting in Aula Leopoldina (in Wrocław) some conclusions have been stated and these ones are in good agreement with those formed by anamorphosis artists, in particular working in late baroque epoque.

**Keywords:** ceiling painting, anamorphosis, perspective

### **1. Wprowadzenie**

Spośród wielu ukształtowanych osiągnięć poznawczych człowieka należy wyróżnić zdolność do wyobrażeń przestrzennych. Człowiek jest zdolny do tworzenia harmonii nigdy przedtem nieistniejących, a jednocześnie potrafi je także postrzegać. Można, więc stwierdzić, że postrzeganie jest aktywnością człowieka (Lorenz, 1986). Oczywiście, umiejętności postrzegania, wyobrażania i interpretacji nabywa się przez całe życie, właśnie poprzez aktywność, co sugeruje z kolei rozwój tych umiejętności w miarę zdobywania nowych doświadczeń. Jeśli osoba nigdy wcześniej nie przebywała w określonym, dużym pomieszczeniu np. o znacznym czasie pogłosu, to skojarzenie atmosfery danego miejsca na podstawie bodźców, choćby zawartych w nagraniach dźwiękowych dokonanych w takim wnętrzu, a odtwarzanych w warunkach domowych, nie będzie możliwe. Również pewne zabiegi plastyczne – choćby kreowanie perspektywy malarskiej – wymagają od odbiorcy

zinterpretowania użytych środków do tworzenia tejże perspektywy. Twórcy dzieł sztuki często tworzą w celu osiągnięcia określonego efektu w postaci wywołania danego wrażenia stosując środki takie wrażenie inicjujące; korzystają przy tym z pewnego „katalogu” środków, które u odbiorcy posługującego się właśnie wyobraźnią, wywołają odpowiednie doznania. Działanie tych środków najczęściej można uzasadnić naukowo czy to na gruncie fizjologii postrzegania, czy też na polu zjawisk przyrodniczych.

Zaskakujące jest, że niejasne na gruncie geometrii, schematy i szablony perspektyw Andrea Pozzo, słynnego twórcy traktatu o perspektywie z 1693 roku (*Prospettiva di pittori e architetti*) i jego kontynuatorów posiadały walory praktyczne. Znajduje to wyraz w wielu znakomitych dziełach sztuki iluzjonistycznego malarstwa nasklepiennego. Pozzo wykazał, że do natury także fizycznych zjawisk (tu rzutu środkowego) sięgać można intuicyjnymi nurtami poznania, które dominują w każdej z epok (może z wyjątkiem sztuki starożytnej Grecji szczególnie okresu helleńskiego, opartej w znacznym stopniu o zdobycze nauki) i stanowi godną oraz skuteczną metodę poznania rzeczywistości.

## **2. Rzutowanie na dowolne powierzchnie**

Przyjmijmy, że sklepienie ma postać powierzchni walca eliptycznego o dużym zróżnicowaniu osi. Przy tym założeniu możemy zdefiniować krzywizny obrazów perspektywicznych: form liniowych i form nieliniowych, (jeśli mają postać krzywych stożkowych, które w barokowym malarstwie były powszechnie stosowane). I tak utworami rzutowania środkowego na powierzchnie kwadratowe – kwadryki, których kształty miały ówczesne sklepienia (sferyczne, elipsoidalne i tak jak w przypadku Auli Leopoldina – kolebkowe) są:

- a) łuki stożkowych, krzywych płaskich 2 rzędu – dla przedstawianych form prostopadłościennych.
- b) łuki krzywych przestrzennych 4 rzędu – dla przedstawianych form krzywych stożkowych.

Jeśli przyjmujemy, że tło perspektywiczne stanowi powierzchnia sklepienia, np. kolebkowego, paraboloidalnego, sferycznego lub o dowolnej powierzchni, na której wykonano malowidło, to już samo to, iż jego twórcy ustalali punkt (rzadziej kilka punktów), z którego obserwacja przedstawionych scen tworzyła najdoskonalszą iluzję trójwymiarowych form i trójwymiarowej przestrzeni, świadczy o właściwym pojmowaniu zjawiska rzutowania środkowego na dowolne powierzchnie. Obraz perspektywiczny obiektów przestrzeni geometrycznej (dla określonego punktu, środka rzutu) lub fizycznej (dla ich obserwatora w tym punkcie) jest zawsze taki sam i nie zależy od powierzchni (tła perspektywicznego), na

którym obrazy owych obiektów powstały (w tym także na siatkówce oka ludzkiego). I aby widzieć tak samo różne obrazy tego samego obiektu realizowane na dowolnie różnych powierzchniach (np. sklepień) spełnić trzeba zaledwie jeden warunek, a mianowicie dokonywać obserwacji z punktu, z którego obrazy te były rzutowane (Szymański, 1987). Wiedzieli o tym, praktycy perspektywy, twórcy nasklepiennych malowideł, używając wiązki światła, jako aparatu rzutowania. Dzięki temu na powierzchniach sklepień można było tworzyć zniekształcone obrazy przedstawianych scen i układów przestrzennych.

### 3. O perspektywie Renesansu i Baroku

W Średniowieczu perspektywę na płaszczyźnie nazywano po prostu *perspektywą*. W Renesansie *perspectiva artificialis* oznaczała perspektywę geometryczną, linearną, zbieżną, centralną, planimetryczną, kolinearną i olbrzymią ilość jej odmian opracowanych i stosowanych przez malarzy renesansu. Podstawę dla niej stanowiły traktaty Leone Battista Albertiego *De pictura* (O malarstwie, 1435) i Piero della Francesca *De prospectiva pilgendi* (nazywana też *aplicicata, practica*) (Rzepińska, 1963). Perspektywa służyła do tworzenia perspektywicznych obrazów przestrzeni fizycznej na płaszczyźnie dzieła malarskiego, a później także na innych powierzchniach. Wymusiło to stworzenie wielu metod obserwacji i tworzenia schematów do jej konstruowania, a czołowymi reprezentantami tego nurtu są Albrecht Dürer i Leonardo da Vinci, którzy stosowali np. ramki kadrowe z układami odniesienia w formie siatek prostokątnych, rysunek na szkle czy odbicie lustrzane, a te metody znakomicie zostały wyjaśnione przez Dürera w jego traktacie z 1525 roku (wg. Białostockiego, 1982).

Jedną z klas rzutu środkowego są anamorfozy, poboczny nurt nowożytnej perspektywy mający swoją 500 letnią historię. Zgodnie z definicją, anamorfoza to technika perspektywy dająca zniekształcony wizerunek przedstawianego przedmiotu, gdy patrzy się z normalnego punktu widzenia, ale zniekształcenie znika i wizerunek wygląda normalnie, gdy spogląda się pod określonym kątem. Pierwsze jej przykłady znajdujemy w notatnikach Leonarda da Vinci; dziś anamorfozę stosuje się (przez liniowe zwężanie i rozszerzanie obrazu) w technice filmu panoramicznego przy użyciu nasadki anamorfotycznej.

W renesansie anamorfozy, stosowano rzadko zapewne ze względu na skomplikowaną naturę tego odwzorowania oraz brak zainteresowania iluzją wizualną z wykorzystaniem zniekształconej perspektywy. Nieliczne przykłady to eksperymenty z anamorfozami Leonarda, obraz H. Holbeina, *Ambasadorowie*, choć już w roku 1434 Jan van Eyck w *Małżeństwie Arnolfinich*, wyraża zainteresowanie odbiciami sferycznymi, stając się nieświadomie prekurem wykorzystania odbić w perspektywie, zastosowanych później

w okresie baroku do stworzenia anamorfoz refleksyjnych, zarówno w Europie jak i Chinach (Gonbrich, 1981).

Związki pomiędzy perspektywą oka ludzkiego, a perspektywą uzyskiwaną poprzez stosowanie bezpośredniej obserwacji oraz stosowanie schematów lub konstrukcji z użyciem elementów geometrycznych zauważyli już starożytni Grecy. Prawdopodobnie jednak nie wiedzieli, że perspektywa ludzkiego oka powstaje na sferycznej siatkówce, choć byli świadomi tego, iż obrazami wzrokowymi linii prostych są łuki krzywych: w literaturze przedmiotu wspomniane jest doświadczenie Euklidesa przecięcia stożka widzenia sferą.

Historycy sztuki wiele spekulowali na temat niekolinearnej perspektywy i jej związków z perspektywą oka ludzkiego oraz psychofizjologią widzenia, osiągając kontrowersyjne wnioski (Rzepińska, 1963). Grecy zgodnie z metodologią ich nauki, stosowali regułę odpowiedniości, byty abstrakcyjne – formalizmy powstałe w zakresie *speculum mentis* weryfikowali w doświadczeniach fizycznych – *speculum mundi*, i odwrotnie dla zjawisk fizycznych poszukiwali modeli teoretycznych (Russo, 2005). Stworzenie przez nich podstaw teoretycznych odbić względem lusterek płaskich, sferycznych, parabolicznych a zapewne walcowych i stożkowych oraz kontynuacji tych badań dużo później przez Alhazena, stało się podstawą do opracowania w okresie baroku anamorfoz refleksyjnych, z zastosowaniem układów optycznych, jakie stanowiły lustra walcowe, stożkowe i graniaste.

Iluzje malarskie wykonywane na sklepieniach, będące w istocie nasklepiennymi anamorfozami nierefleksyjnymi (zwane częściej *kwadraturami*), jako ważny nurt iluzji perspektywicznej, zostały rozwinięte w XVII i XVIII wieku przez Andrea Pozzo i jego kontynuatorów (Kerber, 1971). Użyli oni jednak innych warunków geometrycznych oraz innych środków realizacji perspektywicznych obrazów niż ich poprzednicy. Tło perspektywiczne stanowiło nie płaskie płótno, czy ściana a dowolnie skonfigurowane sklepienie lub kopuła. Zmieniła się również skala przedstawienia, malowidło nasklepienne, niebędące jednak freskiem (z wł. *fresco* – świeży), choć często błędnie jest tak nazywane, było tak duże, jak samo wnętrze, a właściwie jego sklepienie (Ludwig, 2004). Ten rodzaj malarstwa iluzyjnego, przenikającego się z formą architektoniczną, dla którego forma ta w realnej przestrzeni fizycznej znajdowała kontynuację w przestrzeni iluzyjnej malowidła, tworząc z nią spójną całość zacierającą granice pomiędzy tym, co realne i ludzkie (profanum), a tym, co idealne i duchowe (sacrum), stał się istotnym i ważnym nurtem w rozwoju perspektywy i sztuki. Należy zauważyć, że taki zabieg miał na celu odpowiednie kształtowanie wrażeń i przeżyć określonych przedmiotów estetycznych poprzez poznanie

treści zawartych w tych przedmiotach (Chwistek, 1938) i wywołanie właściwego, określonego stosunku emocjonalnego (Wallis, 1963).

#### 4. Aula Leopoldina, jako przykład iluzjonistycznego malarstwa nasklepiennego

Aula Leopoldina mieści się w Kompleksie Leopoldyńskim, jaki obecnie stanowi Uniwersytet Wrocławski. Nazwę tę przyjęto dla upamiętnienia Cesarza Leopolda I, który przekazał Jezuitom dziedziczony przez Habsburgów zamek cesarski. Kompleks powstawał na przełomie XVII i XVIII wieku. Składał się z kościoła ukończonego w 1700 roku, kolegium a później Uniwersytetu. Kompleks rozbudowywany był do 1741 roku, kiedy to *...w doprowadzeniu do końca tego ambitnego i wielkiego dzieła epoki baroku stanęło na przeszkodzie zajęcie Śląska przez Prusy...*(Dziurla, Mozrzyń, 2004). Z planowanej 220 m fasady, według planu z 1727 r, zrealizowano 166 m. W Auli Leopoldyńskiej na szczególną uwagę zasługuje główna scena malarstwa kwadraturowego, jak cały cykl zrealizowany w 1732 roku przez morawskiego malarza Johanna Christopa Handkego, przedstawiająca apoteozę Mądrości Bożej pod postacią unoszącej się w przestworzach Gołębicy – Ducha Świętego. Umieszczona w środku ukazuje zgodnie z założeniami sztuki Pozza za pomocą punto stabile, jedność dualistycznie pojmowanego bytu – materii i ducha, świata realnego i idealnego (fot. 1 - 2).



Fot. 1. Iluzyjne malowidło nasklepienne w Auli Leopoldyńskiej we Wrocławiu – część środkowa sklepienia.





Fot. 2. Iluzyjne malowidło nasklepienne w Auli Leopoldyńskiej we Wrocławiu – strona boczna.

Pomijając wiele interesujących danych historycznych oraz wiadomości z zakresu sztuki trzeba stwierdzić, że mimo niekorzystnych warunków przestrzennych Auli, osiągnięto zadowalający wynik w zakresie stworzonej perspektywicznej iluzji (temu przede wszystkim służyło *iluzjonistyczne nasklepienne malarstwo* baroku). Owe niekorzystne warunki to:

1. mała wysokość wnętrza i duży wymiar podłużny. Ma to zasadniczy niekorzystny wpływ na obserwację obrazów na sklepieniu, przejawia się tym, że obserwacja całości z jednego tylko punktu jest prawie niemożliwa, jeśli za cel autor przedstawienia stawiał jak najdalej posuniętą iluzję trójwymiarowej przestrzeni, w której rozgrywały się sceny i narracja o ustalonej tematyce. Dlatego przewidziano trzy punkty obserwacji; w przedniej, środkowej i tylnej części. Wymusza to na obserwatorze dynamiczną percepcję, w ruchu wzdłuż wnętrza (czego można uniknąć przy zastosowaniu jednego punktu obserwacji). Perspektywiczny obraz na sklepieniu jest, więc obserwowany z wielu pozycji. Powoduje to jego zniekształcenia w czasie obserwacji. Ale nie o dostrzeżenie deformacji autorowi chodziło. Chodziło o zupełne przeciwieństwo. To właśnie zdeformowana forma nasklepiennej anamorfozy ma wywoływać wrażenie niezdeformowanej przestrzeni. W Auli Leopoldyńskiej nie było to jednak w pełni możliwe. Będąc świadomi tych ograniczeń tym bardziej docenimy to iluzjonistyczne dzieło.

2. prawie płaski strop (geometrycznie jest to połączenie płaszczyzny środkowej części sklepienia z powierzchniami walcowymi po obu stronach). Daje to w efekcie bardzo

spłaszczone sklepienie kolebkowe o pseudoeliptycznej krzywiznie. Z takimi warunkami spotkał się malarz i nie mógł zapewne wpłynąć na ich zmianę.

Nie sposób pominąć innych walorów Auli Leopoldyńskiej, związanych z ukształtowaniem przestrzennym, a mianowicie warunków akustycznych, które sytuują Aulę na czele szeregu „sal koncertowych” Wrocławia. Odpowiednie ukształtowanie odbić oraz warunków pogłosowych (przez dużą ilość elementów drewnianych) wzmaga dodatkowo wrażenia bliskości wykonywanych zdarzeń muzycznych i nadanie im określonej aury, pomimo niezbyt szczęśliwego rozwiązania komunikacyjnego, które powoduje przenikanie dość znacznej porcji dźwięków niepożądanych (hałas komunikacyjny). Na tle dźwięków dochodzących ze stosunkowo małej estrady, ów hałas jest tłem, ale tło zachowuje się tak, jakby było częścią formy, która na nim spoczywa; do tła, jako do części formy odnoszą się wszelkie sądy charakteryzujące wzajemne zależności między formą-częścią a formą główną (Żórawski, 1962). Na szczęście mechanizmy postrzegania powodują, że słuchacze mogą oddzielić formę (dźwięki muzyczne) od tła (hałas), a piękno kompozycji przestrzennej Auli Leopoldyńskiej i malarstwa iluzyjnego częstokroć pozwalają przenieść się słuchaczowi (widzowi) w inną rzeczywistość. Przebywając wewnątrz Auli Leopoldyńskiej, której sklepienie pokryte jest malowidłami nasklepiennymi i percypując owe malowidła nie sposób odmówić słuszności stwierdzeniu, iż: *...wszystkie dostrzegane zjawiska i obrazy trwają bardzo krótko, co chwila zmienia się siła światła, barwa, cienie, a w ślad za tym również ilość dostrzeganych szczegółów...* (Machniewicz, 1934); tworzy się więc swego rodzaju iluzję.

## 5. Wnioski

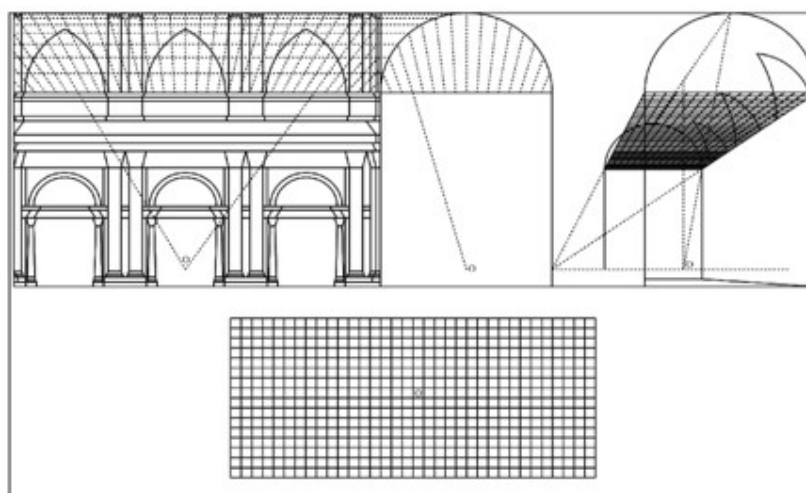
O wcześniejszych dociekaniach renesansowych, a później barokowych praktyków perspektywy powiedzieć można, że posługiwali się wprawdzie formą geometryczną, ale nie stworzyli teorii i metodologii perspektywy. Dokonania teoretyczne takich twórców jak Jan Baptysta Alberti czy Andrea Pozzo sugerują wykorzystanie pożytecznych wzorów do zastosowań w malarstwie płaskim, ściennym, a później nasklepiennym. Zawarte w nich opisy i schematy perspektywy poza walorami praktycznymi, nie mają jednak wartości naukowej, zarówno w sensie metodologicznym – jako aparatu badawczego, jak i pojęciowym, ponieważ nie posiadają waloru uogólnienia, nie są oparte o twierdzenia i dowody. Powodem było zapewne niedostateczne przygotowanie w dziedzinie metodologii naukowego poznania i pobieżna znajomość geometrii euklidesowej, która stanowiła podstawę nowoczesnej nauki.

Często opracowania z zakresu historii sztuki odnoszące się do zagadnień perspektywy mają charakter kompilacyjny i wrywkowy. Do wyjątków zaliczyć można pracę K. Bartla *Perspektywa malarska* (Bartel, 1958). Autor pomija jednak wspomniany wcześniej, ważny nurt

w 500 letnim rozwoju nowożytnej perspektywy, towarzyszący jej od samego początku: anamorfozy -tę odmianę perspektywy, która wymagała najbardziej zaawansowanego aparatu geometrycznego. Można pytać o aparat perspektywy zastosowany przez artystę, np. o to czy zastosował tło płaskie i realizował kolineację, czy tworzył malowidło nasklepienne o kształcie dowolnej powierzchni, w wyniku, czego uzyskiwał perspektywę niekolinearną obiektów przestrzennych. W praktyce stosowano dyskretne odwzorowanie płaszczyzny na dowolną powierzchnię rzutując płaską siatkę kwadratów na sklepienie, jako jej cień. Projekt malowidła wykonywano w małej skali na płaskim podkładzie i następnie наносono nań rysunek siatki kwadratowej. Ponieważ każdemu kwadratowi na projekcie malowidła odpowiadał zdeformowany kwadrat na sklepieniu, to przeniesiony na sklepienie obraz był także zdeformowany w stosunku do płaskiego odpowiednika. W piśmiennictwie przedmiotu określa się takie odwzorowania, jako kwadratury, nazywając ich twórców kwadraturzystami. Wiadomo, że stosowano przy ich wykonaniu techniki projekcji światłem. Powszechnie stosowanym sposobem było rzutowanie siatki kwadratowej, wykonanej z napiętych sznurów, na sklepienie za pomocą punktowego źródła światła (jak wynika z informacji dostępnych w literaturze, a funkcjonujących najprawdopodobniej na podstawie przekazów, była nim najczęściej bateria świec) (Rzepińska, 1963). Świadczy to jednoznacznie o świadomości natury rzutu środkowego, jako zjawiska fizycznego i znajomości podstawowych jego relacji geometrycznych.

### **Podziękowania**

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0045/18.



Rys. 1. Sposób rzutowania siatki kwadratowej, wykonanej z napiętych sznurów, na sklepienie za pomocą punktowego źródła światła.

## 6. Literatura

- Baltrusaitis J., 1984. *Anamorphoses les perspectives depravees*, Flammarion, Paris, 184-191.
- Bartel K., 1958. *Perspektywa malarska, tom II*, Warszawa, 195-198.
- Białostocki J., 1982. *Symbole i obrazy w świecie sztuki*, w: *Wybór pism estetycznych*, Universitas, Kraków, 2008, 136-156.
- Chwistek L., 1938. *Przeżycia artystyczne*, w: *Wybór pism estetycznych*, Universitas, Kraków, 2004, 324-325.
- Dziurla H., Mozrzyk J., 2004. *Harmonia sfer w projekcie Leopoldiny*, *O nauce i sztuce*, Studium Generale, Wrocław.
- Gonbrich E. H., 1981. *Sztuka i złudzenie*, Warszawa, 250-255.
- Kerber B., 1971. *Andrea Pozzo, Walter de Gruyter - Berlin - New York*, 89-97.
- Lorenz K., 1986. *Regres człowieczeństwa*, PIW Warszawa, 98-99.
- Ludwig B., 2004. *Zastosowanie iluzji perspektywicznej w monumentalnych dekoracjach wnętrz śląskich świątyń w okresie późnego baroku*, *Architectus* nr 2, Wrocław, 3-8.
- Machniewicz S., 1934. *Estetyka życia codziennego*, w: *Wybór pism estetycznych*, Kraków, Universitas, 2012, 14-19.
- Russo L., 2005. *Zapomniana rewolucja – grecka myśl naukowa a nauka nowoczesna*, Universitas, Kraków, 102-108.
- Rzepińska M., 1963. *Leone Battista Alberti, O malarstwie*, *Teksty źródłowe do dziejów teorii sztuki*, PAN, Wrocław – Warszawa – Kraków, 138-156.
- Szymański W., 1987. *Odwzorowanie punktów przestrzeni w rzucie środkowo-refleksyjnym na sferę*. *Prace Naukowe Instytutu Architektury Urbanistyki PWr. Nr 23, Studia i Materiały*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Wallis M., 1963. *Sztuki i znaki*, w: *Wybór pism estetycznych*, Universitas, Kraków 2004, 254-255.
- Żórawski J., 1962. *O budowie formy architektonicznej*. w: *Wybór pism estetycznych*, Kraków, Universitas, 2008, 87-89.

# Rozwijanie mikro- i mezoporowatości klinoptylolitu

Alicja Szymańska <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Instytut Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska  
Alicja Szymańska: alicja.szymanska@zut.edu.pl

## Streszczenie

Klinoptylolit (KLIN) oraz klinoptylolit potraktowany wodorotlenkiem potasu (MKLIN) zbadano pod kątem zwiększania mikro- oraz mezoporowatości, niezbędnych do jego potencjalnego zastosowania w procesie adsorpcji CO<sub>2</sub>. Struktura porów oraz charakterystyka powierzchni badanych materiałów została określona na podstawie izoterm adsorpcji-desorpcji azotu mierzonych w temperaturze -196°C. Powierzchnię właściwą (SSA) wyznaczono metodą Brunauera-Emmetta-Tellera (BET), całkowitą objętość porów (TPV) obliczono na podstawie objętości azotu zaadsorbowanego pod ciśnieniem  $p/p_0 \sim 1$ , a objętość mikroporów (MPV) oraz rozkład wielkości porów wyznaczono z modelu NLDFT. Mezoporowatość materiału MKLIN uległa znacznemu podwyższeniu względem materiału KLIN. Udział objętości mikroporów w całkowitej objętości porów wzrósł ponad 16-krotnie. W pracy oprócz części doświadczalnej zamieszczono również część literaturową, która obejmowała budowę i strukturę zeolitów oraz ich zastosowanie w procesach adsorpcyjnych.

**Słowa kluczowe:** adsorpcja CO<sub>2</sub>, zeolity, klinoptylolit

## Development of micro- and mesoporosity in clinoptilolite

### Summary

Clinoptilolite (KLIN) and clinoptilolite treated with potassium hydroxide (MKLIN) were studied in terms of the development of micro- and mesoporosity, necessary for its potential application in the CO<sub>2</sub> adsorption process. The pore structure and surface characterization of the examined materials were specified based on the adsorption-desorption isotherms of nitrogen measured at -196 °C. The specific surface area (SSA) was estimated using the Brunauer-Emmett-Teller equation (BET). The total pore volume (TPV) was calculated on the basis of the volume of N<sub>2</sub> adsorbed at a relative pressure  $p/p_0 \sim 1$ . The micropore volume (MPV) and pore size distribution were assessed by NLDFT model. The microporosity of MKLIN was significantly elevated relative to KLIN. The contribution of micropore volume in the total pore volume increased more than 16 times. This paper contains both the experimental part and the literature section, which included the structure of zeolites and their use in adsorption processes.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> adsorption, zeolites, clinoptilolite

### 1. Wstęp

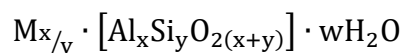
W 1756 roku szwedzki uczoney Axel Fryderyk von Cronstedt prowadził badania nad stibilem zaliczonym dzisiaj do zeolitów naturalnych. Odkrył wtedy, że pod wpływem ogrzewania minerał ten sprawia wrażenie wrzenia, gdyż podczas usuwania zawartej w nim wody tworzą się na jego powierzchni pęcherzyki. Stąd też pochodzi nazwa zeolity "dzeolitos", czyli "wrzące kamienie" (od greckiego "dzo - wrzeć, lithos - kamień). Po tym odkryciu przez prawie 200 lat nie powstały żadne pionierskie prace na temat zeolitów. Dopiero w 1930 r. Richard Maling Barrer po szeregu badań nad zeolitami napisał pracę "Syntheses and reactions of mordenite", która była pierwszą pracą opisującą ich hydrotermalną syntezę oraz poszerzyła ona wiedzę na temat ich właściwości. Następnym ogromnym sukcesem w tej dziedzinie była przeprowadzona w latach 50-tych XX wieku synteza zeolitów A, X, Y przez amerykański

koncern Union Carbide Corp. oraz w latach 60-tych synteza zeolitów ZSM w laboratoriach firmy Oil Mobil. Materiały te były powszechnie stosowane w przemyśle, a ZSM-5 jest wykorzystywany do dzisiaj, jako katalizator przy otrzymywaniu benzyny przez konwersję metanolu. Na początku lat 90-tych zsyntetyzowano nową grupę sit molekularnych – M41S, której przedstawicielem jest MCM-41 (Mobil Composition of Matter). Różnicą między nim, a innymi zeolitami jest amorficzność ścian przy jednoczesnej uporządkowanej strukturze kanałów. Nieco później zsyntezowano materiały typu MSU (Michigan State University), które posiadają lepsze właściwości niż MCM-41, m.in. są stabilniejsze przy prażeniu (Bieda 2011, Kasperkowiak 2014).

Zeolity dzięki swojej specyficznej budowie znalazły szereg zastosowań w różnych dziedzinach przemysłu i gospodarki. Zbudowane są one z nanokanalików o różnych średnicach, w które mogą wnikać drobiny wody, czy innych substancji. Zeolity mogą przyjmować wodę, a także ją oddawać bez zamiany kształtu kryształu. Ponadto można wprowadzić w ich strukturę atomy różnych pierwiastków, przez co mogą one być nośnikami katalizatorów bądź sitami molekularnymi (Pleśniak i in. 2016, Wieser 1994).

## 2. Budowa i struktura zeolitów

Zeolity są uwodnionymi krystalicznymi glinokrzemianami pierwiastków alkalicznych (Na, K, Li) lub ziem alkalicznych (Ca, Mg, rzadziej Ba, Sr), o wzorze ogólnym (Ziółek i in. 1999):

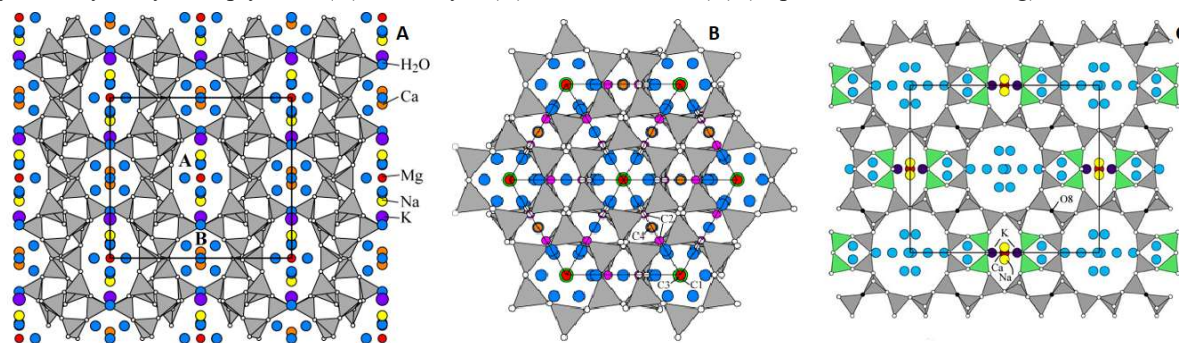


gdzie: M – kation metalu alkalicznego; w – liczba cząsteczek wody; x/y – stosunek równy lub większy od 1, w zależności od struktury; (x +y) – suma tetraedrów w komórce elementarnej.

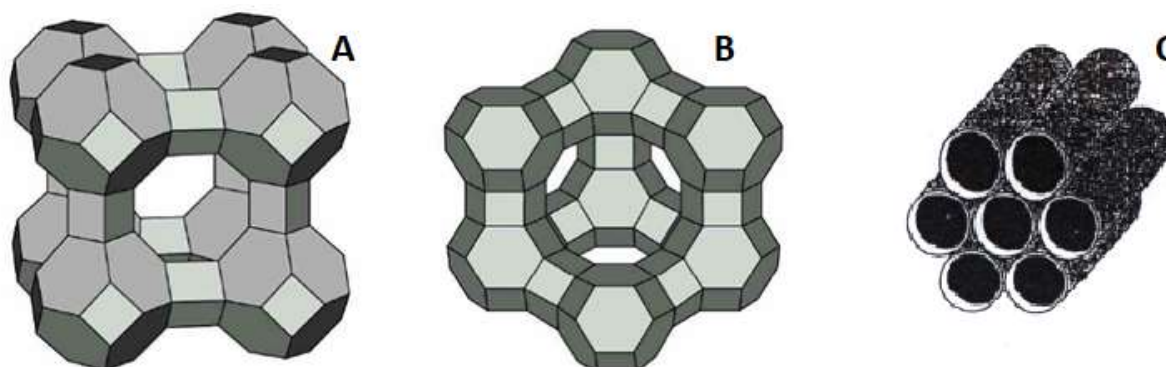
Wyróżnia się zeolity naturalne oraz syntetyczne. Zeolity naturalne występują w postaci kryształów lub tufów w skałach pochodzenia wulkaniczno - osadowego. Obecnie znanych jest ponad 40 minerałów zeolitowych. Najczęściej wstępujące w środowisku, to m.in. klinoptylolit, chabazyt oraz mordenit. Zdjęcia kryształów poszczególnych zeolitów naturalnych przedstawia Rys. 1, a ich struktury zostały pokazane na Rys. 2. Zeolitów syntetycznych jest znacznie więcej (ponad 100), jednak tylko część z nich ma zastosowanie w przemyśle. Do najpopularniejszych należą zeolity typu: A, X, Y oraz MCM-41 (Winczaszek 2006, Suchecki 2005). Ich struktury pokazane są na Rys. 3.



Rys. 1. Kryształy klinoptylolitu (A), chabazytu (B) oraz mordenitu (C) (<http://www.iza-online.org>)



Rys 2. Struktura klinoptylolitu (A), chabazytu (B) oraz mordenitu (C) (<http://www.iza-online.org>)



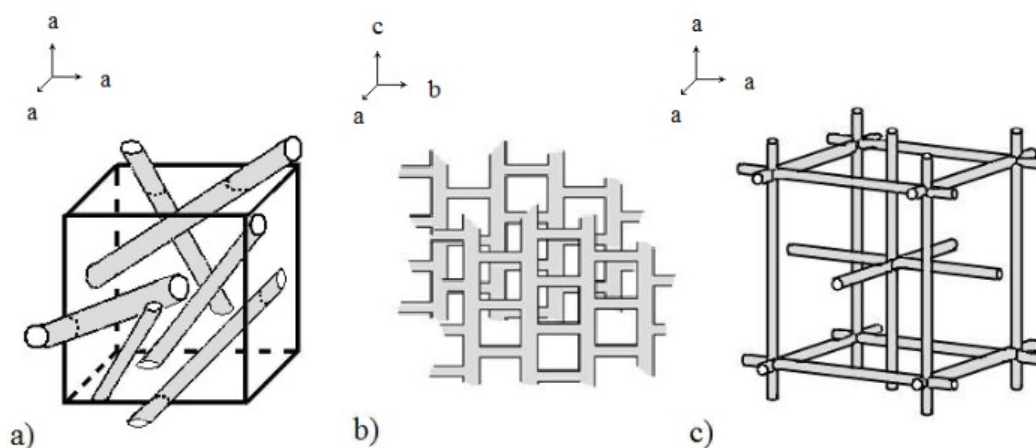
Rys. 3. Struktura zeolitu typu A (A), Y (B) oraz MCM-41 (C) (<http://biodrain.pl/>, Wróblewska i in. 2005)

Na strukturę zeolitów składają się trójwymiarowe sieci tetraedrów  $\text{AlO}_4$  i  $\text{SiO}_4$ , połączonych ze sobą poprzez atomy tlenu. Atomy krzemu lub glinu znajdują się w centrum tetraedru, a naroża wypełnione są przez cztery atomy tlenu, przy czym każdy atom tlenu jest wspólny dla dwóch tetraedrów. Każdy czworościan to tzw. pierwszorzędowy element budowy (PBU, ang. Primary Building Unit). Łączenie się PBU prowadzi do postawiania drugorzędowych elementów budowy (SBU, ang. Secondary Buildings Units). Natomiast połączenia SBU tworzą trójwymiarową strukturę zeolitów (Winczaszek 2006, Suchecki 2005, Wróblewska i in. 2005).

W zeolitach naturalnych stosunek molowy krzemu do glinu mieści się w granicach 1 – 6. Zgodnie z regułą Loewesteina tetraedry  $\text{AlO}_4$  nie mogą łączyć się ze sobą wspólnym atomem tlenu. Mogą łączyć się tylko z tetraedrami  $\text{SiO}_4$ , a te mogą się łączyć także ze sobą. Przy stosunku Si: Al=1 tetraedry  $\text{AlO}_4$  i  $\text{SiO}_4$  występują na przemian, tworząc

uporządkowany szkielet. Zeolity, które zawierają niską zawartość krzemu są hydrofilowe, a także bardziej stabilne w przypadku działania wysokich temperatur. Wykazują one także zwiększoną kwasoodporność. Natomiast zeolity, które zawierają wysoką zawartość krzemu są hydrofobowe oraz w większym stopniu podlegają wymianie jonowej (Bieda 2011, Wróblewska i in. 2005)

Glinotlenowe tetraedry posiadają ujemny ładunek ze względu na zawartość glinu w swojej strukturze. Ładunek ten może być równoważony poprzez wymianę jonową, gdy kationy glinu są zastępowane przez inne. Rozmieszczenie tych kationów jest głównym czynnikiem decydującym zarówno o liczbie, rodzaju centrów aktywnych katalizatora, jak i rozmiarze kanałów, komór i porów. Jednostką strukturalną wyższego rzędu, która powtarza się w strukturze całego zeolitu są komory. Są to zazwyczaj wielościany, posiadające wewnątrz puste przestrzenie. W strukturze zeolitów są także obecne pory, czyli otwory wprowadzające do komór. Dzięki odpowiedniej wielkości porów zatrzymywane są w nich cząsteczki związków o określonych rozmiarach, co czyni z zeolitów sita molekularne. Ogólnie sita molekularne dzieli się na trzy klasy ze względu na wielkość porów. Kanały to komory o nieskończonej długości. Ich wielkość oraz kształt wpływa na właściwości sorpcyjne zeolitów, gdyż przepuszczają one lub zatrzymują cząsteczki związków organicznych o konkretnych wielkościach. Systemy kanałów (pokazane na Rys. 4) mogą być jednowymiarowe (np. analcym), dwuwymiarowe (np. modernit) lub trójwymiarowe (np. paulingmit) (Kasperkowiak 2014, Wróblewska i in. 2015, Gęsikiewicz-Puchalska 2018).



Rys. 4. Kanały a) jednowymiarowe; b) dwuwymiarowe; c) trójwymiarowe (Kasperkowiak 2014)

W kanałach jednowymiarowych ruch kationu lub cząsteczki możliwy jest wyłącznie w jednym kierunku, w kanałach dwuwymiarowych ruch odbywa się w płaszczyźnie, a dla kanałów trójwymiarowych w dowolnym kierunku (Sarbak 2009).



### 3. Zastosowanie zeolitów w procesach adsorpcyjnych

Dzięki doskonałym właściwościom sorpcyjnym zeolity wykorzystuje się w procesach, takich jak: osuszanie i oczyszczanie gazów np. związków siarki i azotu, pary wodnej i dwutlenku węgla z gazu ziemnego; osuszanie i rozdział etylenu, propylenu, acetonu, butadienów, benzenu, chloroformu i innych związków; oczyszczanie gazów spalinowych z silników samochodowych; otrzymywanie powietrza wzbogaconego w tlen; rozdział węglowodorów np. n-alkanów od izo-alkanów; usuwanie z atmosfery par rtęci oraz tlenków azotu i siarki; oczyszczenie wody, ścieków oraz gleby z metali ciężkich i związków organicznych oraz oczyszczanie stopionych metali stosowanych do odlewów (Sarbak 2000, Bieda 2011, Oszust i in. 2012).

W związku z nieustającym wzrostem stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze, opracowuje się coraz nowsze materiały do jego wychwytu oraz magazynowania. Adsorbenty o wysokiej zdolności sorpcyjnej względem CO<sub>2</sub> cechują się dobrze rozwiniętą mikroporowatością oraz powierzchnią właściwą. Zalicza się do nich m.in. węgle aktywne, mezoporowate krzemionki oraz zeolity, które należą do najlepszych nieorganicznych adsorbentów dwutlenku węgla ze względu na swoje właściwości sorpcyjne. Istnieje szereg badań, w których zastosowano zeolity w celu wychwytu CO<sub>2</sub> w różnych procesach przemysłowych. Były to m.in. zeolity typu X, Y oraz ZSM-25, które były poddawane wcześniejszej wymianie jonowej kationami metali alkalicznych – litu oraz sodu (Walton i in. 2006, Choma i in. 2013, Li i in. 2017).

Klinoptylolit jest zeolitem o wzorze  $(K_2Na_2Ca)_2[(Al_6Si_{30})O_{72}] \cdot 24H_2O$ , którego największe złoża znajdują się m.in. w Stanach Zjednoczonych, Meksyku oraz na Ukrainie i Słowacji. Zeolit ten charakteryzuje się dobrymi właściwościami adsorpcyjnymi, jonowymiennymi i katalitycznymi, które można zwiększać przez chemiczną modyfikację. Klinoptylolit cechuje się również dużą odpornością termiczną i chemiczną. Na skalę przemysłową klinoptylolit jest stosowany w procesie oczyszczania wody ze związków żelaza, manganu i zawiesin oraz w procesach dezodoryzacji (Kalenik 2014).

Zeolity syntetyczne są częściej stosowane, jako adsorbenty, jednak naturalne zeolity również mogą być z powodzeniem stosowane w procesach sorpcyjnych. Klinoptylolit stosowano, jako adsorbent względem CO<sub>2</sub> zarówno w niezmodyfikowanej formie, jak i po wbudowaniu w jego strukturę kationów wapnia, sodu i potasu (Triebe i in. 1995, Hernandez-Huesca i in. 1999, Aguilar-Armenta i in. 2001, Aguilar-Armenta i in. 2003, Cakicioglu-Ozkan i in. 2003, Siriwardane i in. 2003, Bonenfant i in. 2008, Aguilar-Armenta i in. 2009).

## 4. Zwiększane mikroporowatości klinoptylolitu do procesu adsorpcji CO<sub>2</sub>

### 4.1. Materiały i metody

Klinoptylolit utarto w moździerzku z wodorotlenkiem potasu w stosunku masowym 1:1, a następnie wymieszano z 3 cm<sup>3</sup> wody dejonizowanej. Tak przygotowaną mieszaninę pozostawiono w temperaturze pokojowej przez 3 godziny, a następnie suszono w 200°C przez 19 godzin. Po tym czasie otrzymany materiał ponownie utarto w moździerzku, umieszczono w łódce kwarcowej i poddano kalcynacji w temperaturze 800°C w atmosferze azotu, którego przepływ wynosił 18 dm<sup>3</sup>/min. Po procesie kalcynacji materiał przemywano wodą dejonizowaną do stałego pH równego 6,5, a następnie próbkę traktowano roztworem kwasu chlorowodorowego o stężeniu 1 mol/dm<sup>3</sup> przez 19 godzin. Po upływie 19 godzin materiał ponownie przemywano wodą dejonizowaną aż do uzyskania stałego pH wynoszącego 6,5 i suszono w temperaturze 200°C.

Charakterystyka teksturalna otrzymanego materiału (MKLI) oraz klinoptylolitu (KLI) została określona na podstawie izoterm adsorpcji-desorpcji mierzonych w temperaturze wrzenia ciekłego azotu (-196°C) przy pomocy automatycznego analizatora Quadrasorb (Quantachrome Instruments). Przed pomiarem materiały zostały odgazowane w temperaturze 200°C w warunkach obniżonego ciśnienia. Do określenia morfologii badanych materiałów zastosowano skaningową mikroskopię elektronową. Mikroskop SU8020 (Hitachi) o napięciu przyspieszającym około 15 kV rejestrował obrazy przy 20000-krotnym powiększeniu.

### 4.2. Wyniki i dyskusja

Powierzchnia właściwa (SSA) została obliczona przy użyciu wielopunktowego równania Brunauera-Emmetta-Tellera (BET). Objętość mikroporów (MPV) oraz dystrybucję wielkości porów wyznaczono za pomocą numerycznej metody niezlokalizowanej teorii funkcjonału gęstości (NLDFT), a całkowitą objętość porów (TPV) obliczono na podstawie objętości azotu zaadsorbowanej pod ciśnieniem p/po ≈ 1. Wartości powierzchni właściwej, objętości mikroporów oraz całkowitej objętości porów materiałów KLIN oraz MKLIN przedstawiono w Tab. 1.

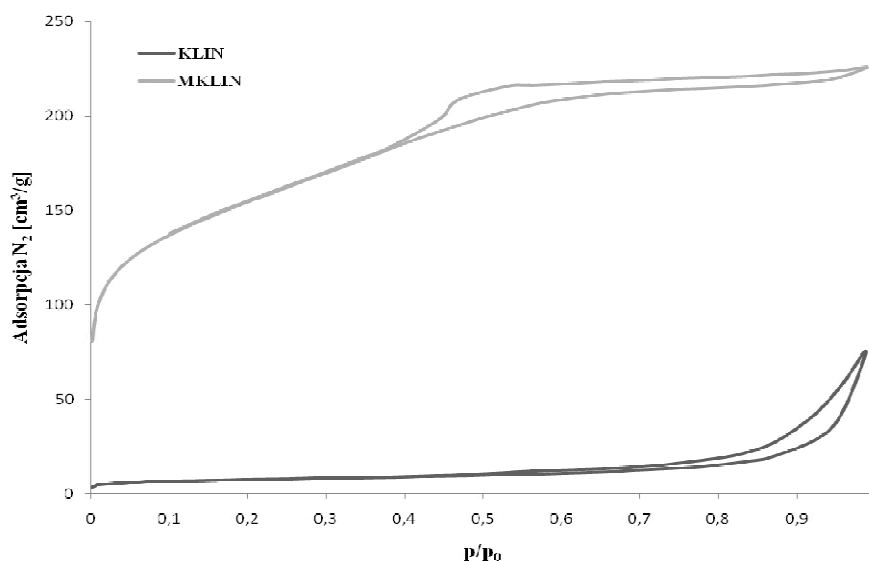
Tabela 1. Właściwości powierzchniowe badanych materiałów (źródło własne)

Materiał	SSA [m <sup>2</sup> /g]	MPV [cm <sup>3</sup> /g]	TPV [cm <sup>3</sup> /g]	MPV/TPV [%]
KLIN	26	0,002	0,116	1,724
MKLIN	553	0,099	0,350	28,286

Wartości wszystkich badanych właściwości uległy znacznej poprawie. Powierzchnia właściwa materiału MKLIN rozwinęła się ponad 20-krotnie (z 26 m<sup>2</sup>/g do 553 m<sup>2</sup>/g) względem KLIN, całkowita objętości porów wzrosła prawie 50-krotnie, a objętość mikroporów 3-krotnie. Udział mikroporów w całkowitej objętości porów materiału KLIN

wynosił 1,724%, a MKLIN 28,286%, co stanowiło ponad 16-krotnie wyższą wartość. Otrzymany materiał charakteryzował się niewielką mikroporowością.

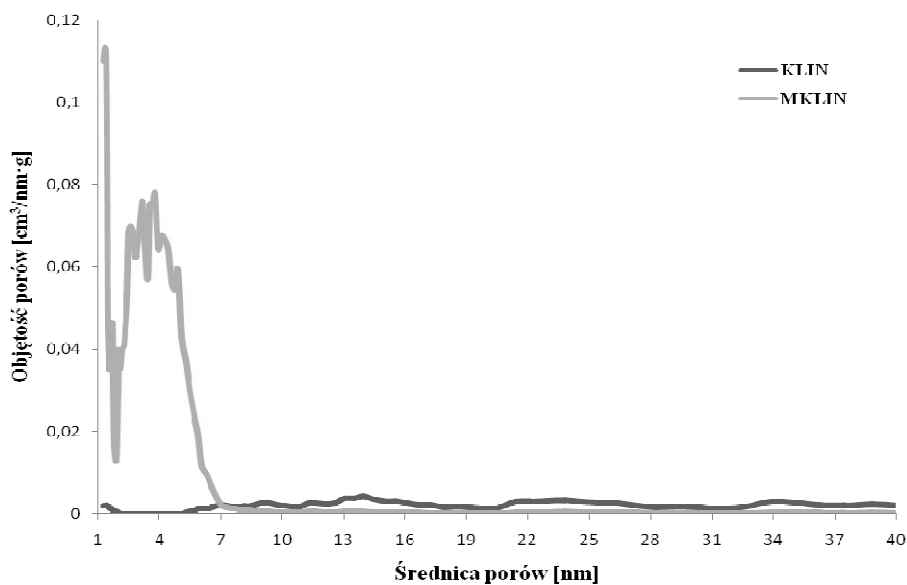
Rys. 5 przedstawia izotermy adsorpcji-desorpcji azotu mierzone w temperaturze  $-196^{\circ}\text{C}$



Rys. 5. Izoterma adsorpcji/desorpcji  $\text{N}_2$

Izoterma materiału KLIN reprezentuje typ II izotermy według Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC, ang. International Union of Pure and Applied Chemistry), natomiast izoterma materiału MKLIN połączenie typu I i IV. Typ II izotermy świadczy o nieporowatości lub makroporowatości adsorbentu, a połączenie typów I i IV oznacza, iż w strukturze adsorbentu obecne są zarówno mikropory, jak i mezopory (Thommes 2015).

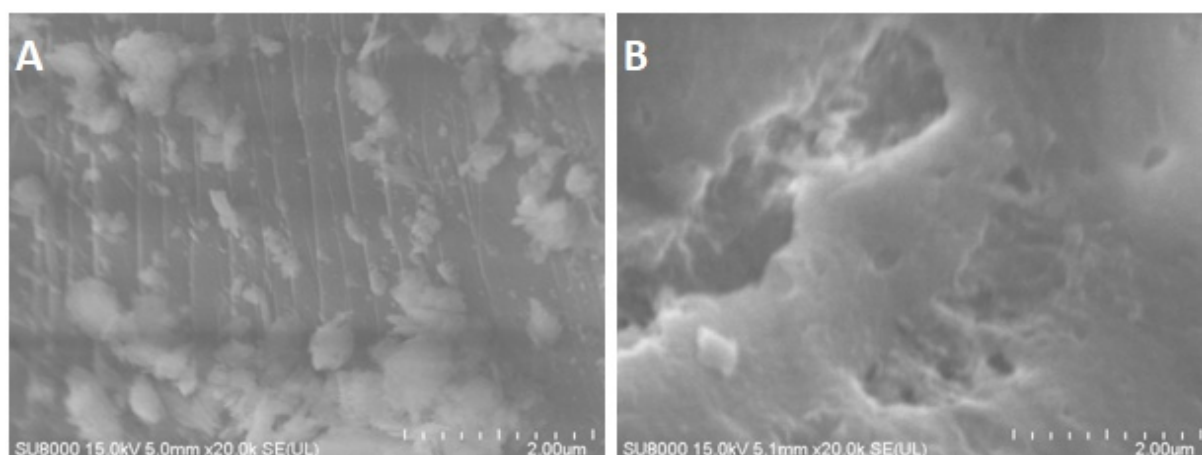
Rys. 6 przedstawia rozkład objętości porów dla klinoptylolitu oraz otrzymanego materiału.



Rys. 6. Rozkład objętości porów dla badanych materiałów

Zamieszczony wykres przedstawia rozkłady wielkości porów materiałów KLIN oraz MKLIN, które zostały ustalone przy pomocy izoterm adsorpcji N<sub>2</sub>. Objętość porów w materiale MKLIN stopniowo zmniejszała się wraz ze wzrostem ich średnicy. Potwierdza to zawartość mikroporów, a także obecność mezoporów o średnicy poniżej 6 nm. W materiale KLIN występują mezopory o średnicach poniżej 40 nm.

Na Rys. 7 zostały umieszczone zdjęcia SEM obu badanych materiałów.



Rys. 7. Zdjęcie SEM materiału KLIN (A) oraz MKLIN (B)

Na zdjęciu (Rys. 7) wykonanym elektronowym mikroskopem elektronowym można zauważyć brak makroporów w materiale KLIN oraz obecność nielicznych makroporów w materiale MKLIN, które wytworzyły się na skutek traktowaniem klinoptylolitu wodorotlenkiem potasu.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Zeolity znalazły wiele zastosowań w różnych gałęziach przemysłu. Poprzez swoją budowę – wielkość oraz kształt porów, komór i kanałów, wykazują bardzo wysoce rozwinięte zdolności sorpcyjne. Z uwagi na to stosuje się je do osuszania i oczyszczania różnych gazów, w tym dwutlenku węgla.

Właściwości teksturalne klinoptylolitu potraktowanego KOH uległy poprawie względem właściwości samego zeolitu. Powierzchnia właściwa wzrosła z 26 m<sup>2</sup>/g do 553 m<sup>2</sup>/g, całkowita objętość porów z 0,116 cm<sup>3</sup>/g do 0,350 cm<sup>3</sup>/g, a objętość mikroporów z 0,002 cm<sup>3</sup>/g do 0,099 cm<sup>3</sup>/g. Udział objętości mikroporów w całkowitej objętości porów wzrósł ponad 16-krotnie.

Materiał otrzymany na skutek traktowania klinoptylolitu wodorotlenkiem charakteryzował się znacznym rozwinięciem mikro- oraz mezoporów i może być zastosowany, jako potencjalny sorbent.

## 6. Literatura

- Aguilar-Armenta G., Hernandez-Ramirez G., Flores-Loyola E., Ugarte-Castaneda A., Silva-Gonzalez R., Tabares-Munoz C., Jimenez-Lopez A., Rodriguez-Castellon E., 2001. Adsorption Kinetics of CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> in Cation-Exchanged Clinoptilolite. *The Journal of Physical Chemistry B* 105: 1313–1319.
- Aguilar-Armenta G., Patiño-Iglesias M.E., Leyva-Ramos R., 2003. Adsorption Kinetic Behaviour of Pure CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in Natural Clinoptilolite at Different Temperatures. *Adsorption Science & Technology* 21: 81–91.
- Aguilar-Armenta G., Romero-Pérez A., 2009. Adsorption of C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> and CO<sub>2</sub> on Cation-exchanged Clinoptilolite. *Adsorption Science & Technology* 27: 523–536.
- Bieda A., 2011. Epoksydacja alkoholi allilowych na katalizatorze tytanowo-silikalitowym Ti-MWW. Rozprawa doktorska, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin.
- Bonenfant D., Kharoune M., Niquette P., Mimeault M., Hausler R., 2008. Advances in principal factors influencing carbon dioxide adsorption on zeolites. *Science and Technology of Advanced Materials* 9: 1–7.
- Cakicioglu-Ozkan F., Ulku S., 2003. Adsorption Characteristics of Lead-, Barium- and Hydrogen-rich Clinoptilolite Mineral. *Adsorption Science & Technology* 21: 309–317.
- Choma J., Jedynek K., Fahrenholz W., Ludwinowicz J., Jaroniec M., Rozwijanie mikroporowatości w węglach mezoporowatych. *Ochrona Środowiska* 35: 3–10.
- Gęsikiewicz-Puchalska A., 2018. Preparatyka i charakterystyka adsorbentów ditlenku węgla. Rozprawa doktorska, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin.
- Hernandez-Huesca R., Díaz L., Aguilar-Armenta G., 1999. Adsorption equilibria and kinetics of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> in natural zeolites. *Separation and Purification Technology* 15: 163–173.  
<http://biodrain.pl/> (dostęp online: 25.01.2019)
- <http://www.iza-online.org> (dostęp online: 25.01.2019)
- Kalenik M., 2014. Skuteczność oczyszczania ścieków w gruncie piaszczystym z warstwą naturalnego klinoptylolitu. *Ochrona Środowiska* 36: 43–48.
- Kasperkowiak M., 2014. Materiały mikro- i mezoporowate jako napełniacze aktywne. Rozprawa doktorska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Li Y., Li L., YU J., 2017. Applications of Zeolites in Sustainable Chemistry. *Chem* 3: 928–949.

- Oszust M., Baczak M., Dąbrowski A., 2012. Mezoporowate materiały krzemionkowe - charakterystyka i zastosowanie. Adsorbenty i katalizatory: wybrane technologie a środowisko 2: 53–67.
- Pleśniak J., Trzop W., 2016. Codziennosc z zeolitami. Analit 2: 146–151.
- Sarbak Z., 2000. Adsorpcja i adsorbenty: teoria i zastosowanie. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Sarbak Z., 2009. Nieorganiczne materiały nanoporowate, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Siriwardane R.V., Shen M-S., Fisher E.P., 2003. Adsorption of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and O<sub>2</sub> on Natural Zeolites. Energy & Fuels 17: 571–576.
- Suchecky T.T., 2005. Zeolity z popiołów lotnych. Otrzymywanie i aplikacje w inżynierii środowiska. Wydawnictwo Zakładu Narodowego im. Ossolińskich, Wrocław.
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. & Sing, K.S.W., 2015. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure Appl. Chem. 87, 1051–1069.
- Triebel R.W., Tezel F.H., 1995. Adsorption of nitrogen, carbon monoxide, carbon dioxide and nitric oxide on molecular sieves. Gas Separation & Purification 9: 223–230.
- Walton K.S., Abney M.B., LeVan M.D., 2006. CO<sub>2</sub> adsorption in Y and X zeolites modified by alkali cation exchange. Microporous and Mesoporous Materials 91: 78–84.
- Wieser T., 1994. Zeolity - kopaliny XXI wieku. Przegląd Geologiczny 42: 477–478.
- Winczaszek B.A., 2006. Analiza możliwości zastosowania zeolitów syntetycznych z popiołów lotnych w procesach oczyszczania ścieków. Rozprawa doktorska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Wróblewska A., Milchert E., 2005. Aktualne i perspektywiczne zastosowanie katalizatorów tytanowo-silikalitowych. Przemysł Chemiczny 84: 923–926.
- Wróblewska A., Milchert E., 2005. Charakterystyka katalizatorów tytanowo-silikalitowych. Przemysł Chemiczny 84: 723–727.
- Ziółek M., Nowak I., 1999. Kataliza Heterogeniczna wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.

# Węgle aktywne z biomasy do procesu adsorpcji CO<sub>2</sub>

Alicja Szymańska <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Instytut Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska  
Alicja Szymańska: alicja.szymanska@zut.edu.pl

## Streszczenie

Przedstawiono przegląd literaturowy w zakresie wytwarzania węgla aktywnych z biomasy pochodzącej z różnych źródeł przy zastosowaniu aktywacji chemicznej. Prekursorami węgla były łupiny m.in. orzechów włoskich, orzechów arachidowych, palmy olejowej oraz pestek słonecznika. W analizowanych publikacjach, jako czynnik aktywujący wykorzystano wodorotlenek potasu. Przegląd obejmuje zarówno właściwości teksturalne węgla aktywnych, takie jak powierzchnia właściwa, całkowita objętość porów oraz objętość mikroporów, jak i zdolność do adsorbowania dwutlenku węgla w temperaturze 0°C i 25°C.

**Słowa kluczowe:** adsorpcja CO<sub>2</sub>, biomasa, węgle aktywne, KOH

## Activated carbons from biomass for CO<sub>2</sub> adsorption

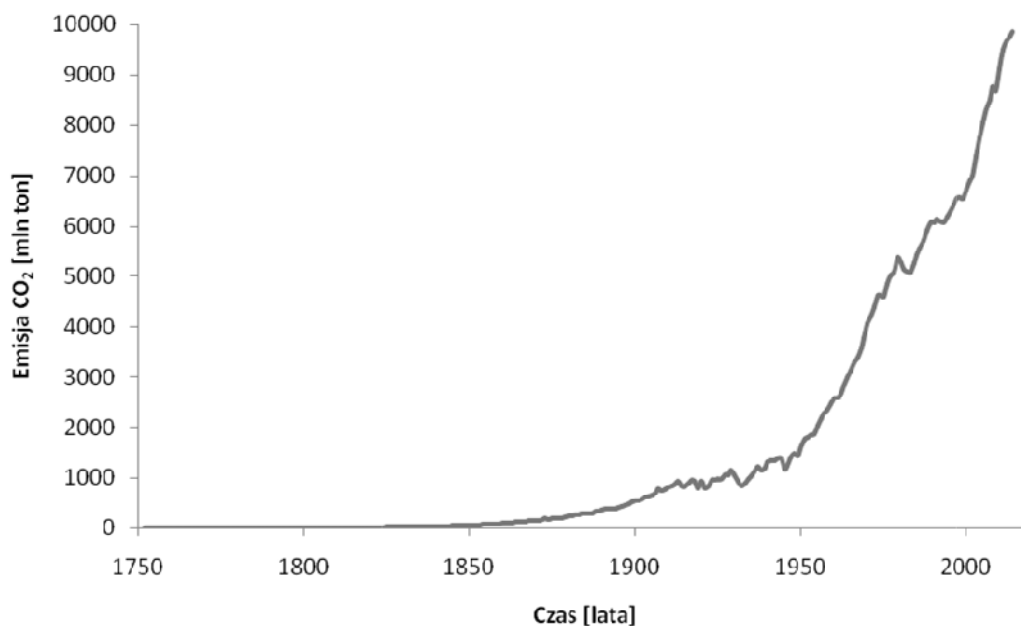
### Summary

This paper presents a literature review of the production of activated carbons from biomass using chemical activation. Carbon precursors were, for instance, walnut shell, peanut shell, oil palm shell, and sunflower seed shell. In the analyzed publications potassium hydroxide was used as an activating agent. The review contains both the structural properties of activated carbons (such as specific surface area, total pore volume, and micropores volume) and the ability to adsorb carbon dioxide at 0 °C and 25 °C.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> adsorption, biomass, activated carbon, KOH

### 1. Wstęp

Według Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (ICCP, ang. Intergovernmental Panel on Climate Change) temperatura powierzchni Ziemi wzrosła o około 1°C od czasu epoki przemysłowej (1750 r.) i wykazuje dalszą tendencję rosnącą na poziomie ok. 0,2°C na dekadę (<https://www.ipcc.ch>). Główną przyczyną powodującą intensyfikację tego zjawiska jest wysoka emisja antropogenicznych gazów, takich jak dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), podtlenek azotu (N<sub>2</sub>O) oraz freony (CFC, HCFC). Udział poszczególnych gazów w tworzeniu efektu cieplarnianego, a także czas ich rezydencji w atmosferze kształtuje się następująco (Lewandowski 2006, Haman 2008): CO<sub>2</sub> – 57,8% (50 – 200 lat), CH<sub>4</sub> – 17,4% (ok. 10 lat), N<sub>2</sub>O – 10,4% (ok. 150 lat), CFC – 5,2% (65 – 130 lat) oraz inne gazy – 9,2%. Od czasów rewolucji przemysłowej (1750 r.) globalne stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze znacząco wzrosło. Spośród wymienionych gazów powstających na skutek działalności człowieka, najwyższym udziałem w tworzeniu efektu cieplarnianego oraz najdłuższym czasem rezydencji w atmosferze cechuje się dwutlenek węgla. Rys. 1 przedstawia zmiany w światowej emisji CO<sub>2</sub> na przestrzeni kilkuset lat.



Rys. 1. Zmiany emisji CO<sub>2</sub> w latach 1750 – 2018 (Boden i in. 2017)

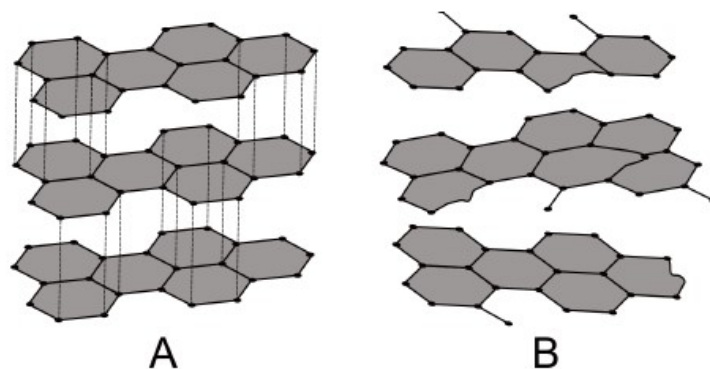
Wzrost emisji dwutlenku węgla spowodowany jest m.in. wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepłej z procesów spalania węgla kamiennego i brunatnego, wzmożonym transportem, szybko rozwijającym się przemysłem oraz postępującymi procesami wylesiania (Wolański i in. 2014, Barchański 2010, Choma i in. 2015). Wskutek tego na przestrzeni ostatnich lat prowadzone są intensywne badania nad metodami wychwytu i magazynowania dwutlenku węgla (CCS, ang. Carbon Capture and Storage) przy użyciu adsorbentów takich jak zeolity, modyfikowane porowate krzemionki, materiały metaloorganiczne oraz węgle aktywne (Choma i in. 2015, Kacema i in. 2015, Niu i in. 2016, Belmabkhout i in. 2016, Sethia i in. 2015).

## 2. Budowa i struktura węgli aktywnych

Głównym składnikiem budulcowym węgli aktywnych jest węgiel pierwiastkowy, który stanowi od 85% do 96% masowych materiałów węglowych. W składzie węgli aktywnych znajdują się również inne pierwiastki takie jak tlen, wodór, siarka, azot, czy chlorowce oraz substancje mineralne (Sreńscek-Nazzal 2017, Nowicki i in. 2012).

Węgłe aktywne zbudowane są z mikrokrystalitów, które pod względem budowy zbliżone są do kryształów grafitu. Jednak struktura węgli aktywnych charakteryzuje się większymi i niejednakowymi odległościami międzywarstwowymi, mniejszym stopniem uporządkowania oraz występowaniem defektów. Tego rodzaju odstępstwa od struktury grafitu zostały określone przez Biscoe i Warrena, jako struktura turbostratyczna (Nowicki i in. 2012, Meller 2014). Obie struktury zostały zaprezentowane na Rys. 2.





Rys. 2. Struktura sieci krystalicznej grafitu (A) oraz struktura turbostratyczna (B) (Nowicki i in. 2012)

Węgłe aktywne o znacznym uporządkowaniu mikrokrystalitów cechują się słabo rozwiniętą strukturą porowatą w przeciwieństwie do węgla o chaotycznym ułożeniu mikrokrystalitów. Przekłada się to bezpośrednio na dużą objętość porów, które mogą być różnej wielkości i kształtu. Według klasyfikacji Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC, ang. International Union of Pure and Applied Chemistry) pory dzieli się ze względu na średnicę na makropory, mezopory i mikropory, przy czym te ostatnie dzielą się również na submikropory, ultramikropory i supermikropory. Mikropory mają największe znaczenie w procesach adsorpcyjnych ze względu na to, iż zajmują nawet do 95% powierzchni właściwej węgla aktywnych. W Tab. 1 przedstawiono średnice poszczególnych porów (Lordgooei i in. 2001, Zdravkov i in. 2007).

Table 1. Podział porów oraz ich średnice (Zdravkov i in. 2007)

Rodzaj porów	Średnica [nm]
Submikropory	poniżej 0,4
Ultramikropory	poniżej 0,7
Supermikropory	0,7 – 2
Mikropory	poniżej 2
Mezopory	2 – 50
Makropory	powyżej 50

### 3. Otrzymywanie węgla aktywnych

Właściwości węgla aktywnych zależą przede wszystkim od rodzaju surowca (prekursora), z jakiego zostały one wytworzone. Wciąż poszukuje się nowych prekursorów węglowych, a szczególną uwagę zwraca się na odpady biomasy z przemysłu spożywczego, drzewnego oraz rolnictwa. Niewątpliwymi zaletami odpadów biomasy są ich fizyczne, chemiczne oraz mechaniczne właściwości, a także niskie koszty, łatwa dostępność oraz odnawialność (Kwiatkowski i in. 2017).

Struktura węgla aktywnych w dużym stopniu zależy również od warunków prowadzenia dwuetapowego procesu, tj. karbonizacji i następującej po niej aktywacji. Poprzez dostosowanie tych parametrów można znacząco wpłynąć na stopień rozwinięcia powierzchni właściwej oraz porowatość materiałów węglowych. Karbonizacja jest procesem

przebiegającym w wysokich temperaturach (500 – 800°C) w atmosferze beztlenowej lub gazu obojętnego, podczas którego następuje rozpad substancji organicznej, usunięcie lotnych związków oraz wilgoci. W wyniku tego procesu materiały wzbogacają się w węgiel pierwiastkowy, stają się bardziej jednorodne i wytrzymałe mechanicznie, jednak ich struktura porowata jest słabo rozwinięta, a powierzchnia właściwa niewielka. Aby zwiększyć porowatość karbonizatów poddaje się je procesowi aktywacji fizycznej lub chemicznej. Aktywacja fizyczna (termiczna) przebiega w temperaturze od 800 do 1000°C w obecności czynnika utleniającego, takiego jak para wodna czy dwutlenek węgla i może być zastosowana po wcześniejszej karbonizacji materiału. Na skutek reakcji zachodzących podczas procesu zwiększa się porowatość i powierzchnia wewnętrzna karbonizatu. Aktywację chemiczną przeprowadza się po wcześniejszym zaimpregnowaniu surowca czynnikiem aktywującym takim jak wodorotlenek potasu czy kwas fosforowy (V). Zaimpregnowany materiał poddaje się jednoczesnej aktywacji i karbonizacji w temperaturze od 500 do 900°C w atmosferze gazu inertnego. Zaletą aktywacji chemicznej jest obniżenie temperatury oraz skrócenie czasu prowadzenia procesu, ale także uzyskanie węgla aktywnych o dobrze rozwiniętej strukturze mikroporowatej. Natomiast wadą jest zastosowanie korozyjnych czynników aktywujących, które muszą być usuwane po procesie wraz z powstającymi produktami ubocznymi (Sreńscek-Nazzal 2017, Nowicki i in. 2012, Kwiatkowski i in. 2012).

#### **4. Adsorpcja CO<sub>2</sub> na chemicznie aktywnych węglach otrzymanych z biomasy**

Najczęściej używanym czynnikiem aktywującym w procesie otrzymywania węgla aktywnych jest wodorotlenek potasu. Zastosowano go w aktywacji chemicznej węgla otrzymywanych z owoców, łupin, pędów oraz innych części roślin. Wśród najchętniej wykorzystywanych w tym procesie źródeł biomasy znajdują się łupiny orzechów.

Lewicka (Lewicka 2017) w swoich badaniach wykorzystwała łupiny orzechów laskowych, włoskich oraz arachidowych, z których poprzez aktywację chemiczną KOH i jednoczesną karbonizację w temperaturze od 600 do 900°C otrzymała węgle aktywne. Karbonizacja prowadziła przez godzinę w atmosferze azotu, a stosunek masowy aktywatora do biomasy wynosił 1:1. Powierzchnię właściwą otrzymanych materiałów autorka wyznaczyła metodą Brunauera-Emmetta-Tellera (BET), całkowitą objętość porów obliczyła na podstawie objętości azotu zaadsorbowanej pod ciśnieniem  $p/p_0 \sim 0,99$ , a objętość mikroporów za pomocą modelu DFT. Największą powierzchnię właściwą uzyskała w przypadku materiałów aktywowanych w temperaturze 900°C – 1963 m<sup>2</sup>/g (prekursor: łupiny orzechów laskowych), 1962 m<sup>2</sup>/g (prekursor: łupiny orzechów arachidowych) oraz 1468 m<sup>2</sup>/g (prekursor: łupiny orzechów włoskich). Najwyższe wartości całkowitej objętości

porów, objętości mikroporów oraz adsorpcji CO<sub>2</sub> autorka również uzyskała w najwyższej temperaturze prowadzenia procesu aktywacji. Całkowita objętość porów dla materiałów otrzymanych z łupin orzechów laskowych wynosiła 1,15 cm<sup>3</sup>/g, z łupin orzechów arachidowych 1,03 cm<sup>3</sup>/g oraz łupin orzechów włoskich 0,76 cm<sup>3</sup>/g. Objętość mikroporów otrzymanych materiałów wyniosła kolejno 0,68 cm<sup>3</sup>/g (łupiny orzechów arachidowych), 0,64 cm<sup>3</sup>/g (łupiny orzechów laskowych) oraz 0,52 cm<sup>3</sup>/g (łupiny orzechów włoskich). Węgiel aktywny otrzymany z orzechów arachidowych zaadsorbował najwięcej CO<sub>2</sub> – 5,5 mmol/g w temperaturze 0°C, natomiast w temperaturze 25°C najwyższą adsorpcją autorka uzyskała stosując węgiel otrzymany z orzechów włoskich – 4,3 mmol/g. W 0°C adsorpcja CO<sub>2</sub> odbywała się głównie w mikroporach o średnicach w zakresie 0,31 – 0,82 nm, natomiast w 25°C w porach o średnicy od 1,91 nm do 2,12 nm.

Chomiak i współprac. (Chomiak i in. 2017) również otrzymali węgle aktywne z łupin orzecha włoskiego, które najpierw poddali wstępnej karbonizacji w temperaturze 520°C, a następnie dalszej obróbce cieplnej w temperaturze od 700 do 900°C w atmosferze azotu. Tak przygotowane węgle granulowane aktywowali w temperaturze 800°C przez godzinę (stosunek karbonizatu do KOH wynosił 1:2) również w atmosferze azotu. Wzrost temperatury wstępnej obróbki cieplnej powodował zahamowanie tworzenia struktury porowatej – powierzchnia właściwa (wyznaczona metodą BET), całkowita objętość porów (obliczona na podstawie objętości azotu zaadsorbowanej pod ciśnieniem  $p/p_0 \sim 0,96$ ) oraz objętość mikroporów (wyznaczona z równania Dubinina-Radushkevicha) wykazały tendencje malejące. Wartości parametrów strukturalnych zmniejszały się liniowo wraz ze wzrostem temperatury – powierzchnia właściwa z 1982 m<sup>2</sup>/g do 1351 m<sup>2</sup>/g, całkowita objętość porów z 0,82 cm<sup>3</sup>/g do 0,56 cm<sup>3</sup>/g, objętość mikroporów z 0,80 cm<sup>3</sup>/g do 0,54 cm<sup>3</sup>/g. Najwyższą adsorpcją CO<sub>2</sub> pod ciśnieniem 1 bar charakteryzował się materiał przygotowany w temperaturze 700°C – 7,2 mmol/g (adsorpcja w 0°C) oraz 750°C – 3,0 mmol/g (adsorpcja w 25°C). Również pod ciśnieniem 30 bar najwyższą adsorpcją zarówno w 0°C, jak i 25°C cechował się materiał karbonizowany w temperaturze 700°C – 18,2 mmol/g (adsorpcja w 0°C) oraz 16,6 mmol/g (adsorpcja w 25°C). Pojemność sorpcyjna względem CO<sub>2</sub> pod ciśnieniem 1 bar była związana z objętością mikroporów o średnicach do 0,8 nm, które dominują w otrzymanych przez autorów materiałach. Natomiast ilość zaadsorbowanego CO<sub>2</sub> pod ciśnieniem 30 bar była skorelowana z występowaniem mikroporów średnicach poniżej 0,95 nm oraz wąskich mezoporów.

Węgle aktywne z łupin orzechów pinii otrzymał Deng i współprac. (Deng i in. 2014). W pierwszym etapie biomasę poddali karbonizacji w temperaturze 500°C przez 1,5 godziny,

a następnie dodawali aktywatora (stosunek masowy karbonizatu do KOH wynosił od 1:0,5 do 1:4). Aktywacja trwała od 0,5 do 2,5 godzin w temperaturze od 500 do 900°C w atmosferze azotu. Powierzchnia właściwa materiałów (wyznaczona metodą BET) rozwijała się wraz ze zwiększaniem ilości KOH w stosunku do karbonizatu, a także wraz ze zwiększaniem temperatury aktywacji. Najkorzystniejszymi parametrami strukturalnymi charakteryzował się węgiel otrzymany w temperaturze 800°C (stosunek karbonizatu do KOH = 1:2), którego powierzchnia właściwa wynosiła 2207 m<sup>2</sup>/g, a całkowita objętość porów (obliczona na podstawie objętości azotu zaadsorbowanej pod ciśnieniem  $p/p_0 \sim 0,99$ ) wynosiła 1,23 cm<sup>3</sup>/g. Materiał ten jednak nie zaadsorbował największej ilości CO<sub>2</sub> w porównaniu z innymi otrzymanymi węglami. Węgiel przygotowany w temperaturze 700°C (stosunek masowy karbonizatu do KOH równy 1:2) cechował się najwyższą sorpcją CO<sub>2</sub> - 7,7 mmol/g w temperaturze 0°C i 5,0 mmol/g w temperaturze 25°C. Adsorpcja w temperaturze 0°C pod ciśnieniem 1 bar zachodziła najefektywniej dla mikroporów o średnicy 0,33 – 0,82 nm, natomiast w wyżej temperaturze (25°C) zakres średnic mikroporów uległ zwężeniu do 0,33 – 0,52 nm (objętości mikroporów zostały obliczone przy użyciu modelu NLDFT). Prowadzenie procesu w zakresie wyższych ciśnień prowadziło do dalszego zwężenia średnic mikroporów, które warunkowały wysoką wartość adsorpcji CO<sub>2</sub>.

W innej pracy Deng i współprac. (Deng i in. 2015) otrzymali węgle aktywne z łupin orzechów arachidowych oraz łupin pestek słonecznika. W obu przypadkach pierwszym krokiem była karbonizacja biomasy w temperaturze 500°C przez 1,5 godziny, a następnie aktywacja KOH w temperaturze od 600°C do 800°C przez godzinę w atmosferze azotu. Stosunek karbonizatu do KOH wynosił od 1:0,5 do 1:1,5. Właściwości węgla otrzymanego z łupin pestek słonecznika były korzystniejsze – materiał charakteryzował się wyższą powierzchnią właściwą wyznaczoną z równania BET (1790 m<sup>2</sup>/g) oraz większą porowatością (całkowita objętość porów obliczona na podstawie objętości azotu zaadsorbowanej pod ciśnieniem  $p/p_0 \sim 0,99$  wyniosła 0,77 cm<sup>3</sup>/g) niż materiał otrzymany z łupin orzechów arachidowych (powierzchnia właściwa wyniosła 956 m<sup>2</sup>/g, a całkowita objętość porów 0,43 cm<sup>3</sup>/g). Najwyższe wartości adsorpcji CO<sub>2</sub> autorzy uzyskali dla węgla otrzymanych z łupin orzechów arachidowych aktywowanych w temperaturze 700°C w stosunku masowym karbonizatu do KOH równym 1:1. W przypadku węgla otrzymanych z łupin pestek słonecznika najkorzystniejszą temperaturą prowadzenia procesu aktywacji również była temperatura 700°C, a stosunek masowy karbonizatu do KOH = 1:1,25. Adsorpcja CO<sub>2</sub> pod ciśnieniem 0,15 bar przy zastosowaniu łupin pestek słonecznika jako prekursora węgla wynosiła 7,06 mmol/g w 0°C i 4,61 mmol/g w 25°C, natomiast przy zastosowaniu łupin

orzechów arachidowych wynosiła 5,23 mmol/g w 0°C i 4,03 mmol/g w 25°C. Autorzy przeprowadzili również badania adsorpcji CO<sub>2</sub> w temperaturze 25°C pod ciśnieniem 0,15 bar na otrzymanych materiałach. Wartość ta dla węgla otrzymanego z łupin pestek słonecznika wynosiła 1,46 mmol/g i była niższa od wartości uzyskanej dla węgla otrzymanego z łupin orzechów – 1,56 mmol/g. Wyniki adsorpcji CO<sub>2</sub> w temperaturze 25°C pod ciśnieniem 0,15 bar mają liniowy związek z objętością mikroporów o średnicy 0,33 – 0,44 nm (wyznaczona z modelu NLDFT), co wskazuje, że były one kluczowe dla tego procesu.

Jako prekursora węgla Ello i współprac. (Ello i in. 2013) użyli łupin palmy olejowej. W pierwszej kolejności biomasę poddali karbonizacji w temperaturze 600°C oraz 700°C, a następnie aktywacji przy użyciu KOH w 850°C przez godzinę w atmosferze azotu (stosunek masowy karbonizatu do aktywatora wynosił od 1:1 do 1:5). Największą powierzchnią właściwą (obliczoną z równania BET) wykazał się materiał karbonizowany w temperaturze 600°C przy użyciu największej ilości czynnika aktywującego – 1890 m<sup>2</sup>/g. Całkowita objętość porów tego materiału (obliczona na podstawie objętości azotu zaadsorbowanej pod ciśnieniem p/p<sub>0</sub> ~ 0,98) wyniosła 0,90 cm<sup>3</sup>/g, a objętość mikroporów (obliczona za pomocą metody α<sub>s</sub>) wyniosła 0,82 cm<sup>3</sup>/g. Wraz ze zmniejszaniem temperatury karbonizacji oraz stosunku masowego karbonizatu do KOH, wartości powierzchni właściwej, całkowitej objętości porów oraz objętości mikroporów zmniejszały się. Adsorpcja CO<sub>2</sub> pod ciśnieniem 1 bar była najwyższa dla materiału, który został przygotowany z mniejszą ilością KOH względem łupin palmy olejowej (3:1) w temperaturze karbonizacji wynoszącej 600°C – 6,3 mmol/g (0°C) oraz 4,4 mmol/g (25°C). Otrzymany przez autorów materiał, który zaadsorbował największą ilość CO<sub>2</sub>, charakteryzował się dużą objętością ultramikroporów (0,29 cm<sup>3</sup>/g) i submikroporów (0,26 cm<sup>3</sup>/g), które są kluczowe dla tego procesu. Niestety autorzy nie określili dokładnego zakresu średnic porów, w których adsorpcja zachodziła najefektywniej.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione dane literaturowe wskazują na dużą użyteczność węgla otrzymanych z biomasy w procesie adsorpcji dwutlenku węgla. Uzyskane materiały charakteryzowały się wysoce rozwiniętą powierzchnią właściwą (przekraczającą 1400 m<sup>2</sup>/g) oraz dużą porowatością. We wszystkich otrzymanych węglach najefektywniejsze w procesie adsorpcji CO<sub>2</sub> okazały się pory o średnicach poniżej 0,82 nm. Wartości zaadsorbowanego CO<sub>2</sub> w temperaturze 0°C pod ciśnieniem 1 bar przekraczały 4,4 mmol/g, przy czym dla niektórych materiałów wynosiły powyżej 7 mmol/g. Adsorpcja CO<sub>2</sub> w temperaturze 25°C pod ciśnieniem 1 bar osiągała wartości do 5 mmol/g. Struktura porowata przedstawionych węgla

aktywnych, a co za tym idzie ich zdolność adsorpcyjna względem CO<sub>2</sub> była w dużym stopniu zdeterminowana przez rodzaj zastosowanego prekursora oraz warunki preparatyki, takie jak temperatura karbonizacji, temperatura aktywacji, czy stosunek masowy źródła węgla do wodorotlenku potasu.

## 6. Literatura

Barchański B., 2010. A jednak węgiel to teraźniejszość i przyszłość energetyki. *Polityka Energetyczna* 13: 11–28.

Belmabkhout Y., Guillerm V., Eddaoudi M., 2016. Low concentration CO<sub>2</sub> capture using physical adsorbents: Are metal–organic frameworks becoming the new benchmark materials? *Chemical Engineering Journal* 296: 386–397.

Boden, T. A., Marland G., Andres R. J., 2017. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Choma J., Stachurska M., Osuchowski Ł., Dziura A., Jaroniec M., 2015. Adsorpcja dwutlenku węgla na węglach aktywnych otrzymanych z prekursorów polimerowych. *Ochrona Środowiska* 37, 4: 3–8.

Chomiak K., Gryglewicz S., Kierzek K., Machnikowski J., 2017. Optimizing the properties of granular walnut-shell based KOH activated carbons for carbon dioxide adsorption *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 21: 436–443.

Deng S., Hu B., Chen T., Wang B., Huang J., Wang Y., Yu G., 2015. Activated carbons prepared from peanut shell and sunflower seed shell for high CO<sub>2</sub> adsorption. *Adsorption* 21: 125–133.

Deng S., Wei H., Chen T., Wang B., Huang J., Yu G., 2014. Superior CO<sub>2</sub> adsorption on pine nut shell-derived activated carbons and the effective micropores at different temperatures. *Chemical Engineering Journal* 253: 46–54.

Ello A.S., de Souza L.K.C., Trokourey A., Jaroniec M., 2013. Development of microporous carbons for CO<sub>2</sub> capture by KOH activation of African palm shells. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 2: 35–38.

Haman K., 2008. Naturalne i antropogeniczne przyczyny zmian klimatu. *Nauka* 1: 119–127. <https://www.ipcc.ch> (dostęp online: 04.01.2019 r.)

Kacema M., Pellerano M., Delebarre A., 2015. Pressure swing adsorption for CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation: Comparison between activated carbons and zeolites performances. *Fuel Processing Technology* 138: 271–283.

Kwiatkowski M., Fierro V., Celzard A., 2017. Numerical studies of the effects of process conditions on the development of the porous structure of adsorbents prepared by chemical activation of lignin with alkali hydroxides. *Journal of Colloid and Interface Science* 486: 277–286.

Kwiatkowski M., Bronek E., 2012. Komputerowa analiza struktury porowatej adsorbentów otrzymanych z odpadowych materiałów pochodzenia roślinnego w procesie aktywacji chemicznej kwasem fosforowym. *Przemysł Chemiczny* 91: 2355–2360.

Lewandowski N., 2006. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Lewicka K., 2017. Activated carbons prepared from hazelnut shells, walnut shells and peanut shells for high CO<sub>2</sub> adsorption. *Polish Journal of Chemical Technology* 19: 38–43.

Lordgooei M., Rood M.J., Rostam-Abadi M., 2001. New General Pore Size Distribution Model by Classical Thermodynamics Application: Activated Carbon. *Journal of Environmental Engineering* 127: 281–287.

Meller M., *Procesy pseudopojemnościowe na granicy faz elektroda/elektrolit w elektrochemicznych systemach magazynowania energii. Rozprawa doktorska*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań (2014).

Niu M., Yang H., Zhang X., Wang Y., Tang A., 2016. Amine-Impregnated Mesoporous Silica Nanotube as an Emerging Nanocomposite for CO<sub>2</sub> Capture. *ACS Applied Materials & Interfaces* 8: 17312–17320.

Nowicki P., Pietrzak R., 2012. Węgle aktywne wzbogacone w azot - otrzymywanie, właściwości i potencjalne zastosowania. *Adsorbenty i katalizatory* 7: 129–144.

Sethia G., Sayari A., 2015. Comprehensive study of ultra-microporous nitrogen-doped activated carbon for CO<sub>2</sub> capture. *Carbon* 93: 68–80.

Sreńscek-Nazzal J., 2017. *Modyfikacja handlowych węgli aktywnych a ich zdolności sorpcyjne w stosunku do CO<sub>2</sub> oraz CH<sub>4</sub>. Rozprawa habilitacyjna*, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, Szczecin.

Wolański P., Oleszczak D., 2014. Analiza wpływu modernizacji środków transportu na emisję i zawartość dwutlenku węgla w atmosferze. *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 11: 3–4.

Zdravkov B.D., Cermak J.J., Sefara M., Janku J., 2007. Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. *Central European Journal of Chemistry* 5: 385–395.

# Biologiczne i kulturowe uwarunkowania przeżyć estetycznych

Witold Szymański <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Katedra Architektury Mieszkaniowej, Przemysłowej, Wnętrz, Ruralistyki, Krajobrazu, Sztuk Wizualnych i Systemów Konstrukcyjnych Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
Witold Szymański: witold.szymanski@pwr.edu.pl

## Streszczenie

Aktywność człowieka w tym **procesy poznawcze** warunkowane są pierwotnie jego biologią. Przez miliony lat ewolucji gatunku **cechy biologiczne** specyficzne dla obu płci decydowały o podjęciu ról społecznych, ustalały pozycję jednostki w hierarchiach zależności przyjętych w określonej wspólnotie. W okresie pierwotnym rozwoju gatunku były to wspólnoty plemienne, które przekształcały się z czasem w coraz większe społeczności posługujące się pamięcią zbiorową i tożsamością, które istniały w obszarze **kultury** będącej zarówno procesem jak i strategią przetrwania.

Każda **kultura** tworzy **wzorce zachowań adaptacyjnych** począwszy od tych preferowanych a kończąc na tych, których **bezwzględnie wymaga**. Przykładem są choćby kultury Grecji i Rzymu oraz kultury nam współczesne z bardzo zróżnicowanymi względem siebie systemami wartości.

Rozwój funkcji poznawczych człowieka kształtuje zarówno niepowtarzalność jego cech genotypowych w zakresie tej samej rasy czy grupy, ale też jego płciowość i to zarówno w sensie pierwotnym jak i wtórnym, kulturowym. Na tym tle, nawiązując do tematu, istnieją grupy problemów, które należałoby omówić.

Potocznie **przeżycia estetyczne** traktujemy, jako reakcje na przedmioty i obiekty, którym przypisuje się wartość estetyczną. Czym jest i od czego zależy **przeżycie estetyczne**, wartość estetyczna dzieła, sztuki? W artykule określono zakresy rozważań tego problemu.

**Słowa kluczowe:** kultura, sztuka, przeżycie estetyczne, wartość estetyczna

## Biological and Cultural Determinants of Aesthetic Experiences

### Summary

Biology conditions human activities. Cognitive processes are also part of this phenomenon. Human biological traits characteristic of both sexes have determined one's social roles in the course of millions of years of evolution. Also, they have determined how important an individual has been in the social ladder in accordance with the rules of a given community. In the early stages of the development of the human species there were tribal communities. Later on communities were bigger and bigger. They used the collective memory and identity which were both a process and survival strategy.

All cultures create adaptive patterns of behaviour. Some of them are obligatory whereas some other are just preferable. A good example could be both the cultures of ancient Greece and Rome and contemporary cultures, each of them with a set of characteristic systems of values.

The development of human cognitive functions is related both to the uniqueness of one's genotypic traits within each race or social community and to one's sex with respect to the primary and secondary culture-related meaning. Taking all these factors into consideration, there are some issues worth considering.

Aesthetic experiences are generally regarded as one's reaction to things and items of aesthetic value. A few questions should be posed. What is an aesthetic experience, the aesthetic value of a piece of art or artistry and what does it depend on? The article focuses on the range of deliberations on this issue.

**Keywords:** culture, art, an aesthetic experience, aesthetic value

Punktem wyjścia do naszych rozważań jest korelacja pomiędzy pojęciem przeżycia estetycznego i pojęciem przedmiotu posiadającego estetyczną wartość. Przeżycia estetyczne traktujemy, jako reakcje na przedmioty, którym przypisuje się wartość estetyczną (Ossowski 1966).

Pojęcie to w znacznej mierze odnosi się do obszaru sztuki a w szerszym ujęciu – kultury. Z tak określonym zakresem rozważań wiąże się grupa zagadnień dotycząca percepcji.



Percepcja jest w istocie złożonym procesem poznawczym człowieka. Składa się nań wiele elementów, poza osobowościowymi, także zewnętrznych – środowiskowych. Postrzegamy świat fizyczny i społeczny, także swoją tożsamość poprzez procesy myślowe, realizowane na poziomie świadomym, poza świadomym, intuicyjnym. Percepcja zależy od wiedzy, inteligencji, wrażliwości emocjonalnej i innych cech osobowościowych podmiotu a także uwarunkowań jego zachowań poznawczych wynikających z otoczenia i środowiska kulturowego.

W ramach tego artykułu wskazano na istotne elementy odnoszące się do tych grup problemów.

Każda aktywność człowieka w tym procesy poznawcze warunkowane są pierwotnie jego biologią. Przez miliony lat ewolucji gatunku to właśnie cechy biologiczne specyficzne dla obu płci decydowały o podjęciu ról społecznych, ustalały pozycję jednostki w hierarchiach zależności przyjętych w określonej wspólnocie. W okresie pierwotnym rozwoju gatunku były to wspólnoty plemienne, które przekształcały się z czasem w coraz większe społeczności posługujące się pamięcią zbiorową i tożsamością, które istniały w obszarze zjawisk rodzących się kultur będących strategiami przetrwania.

Kultura tworzy wzorce zachowań adaptacyjnych począwszy od tych preferowanych a kończąc na tych, których bezwzględnie wymaga (patrz: Unia Europejska). Przykładem są choćby kultury Grecji i Rzymu oraz kultury nam współczesne z bardzo zróżnicowanymi względem siebie systemami wartości.

Rozwój funkcji poznawczych człowieka kształtuje zarówno niepowtarzalność jego cech genotypowych w zakresie tej samej rasy czy grupy, ale też jego płciowość i to zarówno w sensie pierwotnym jak i wtórnym, kulturowym.

Na tym tle istnieją grupy problemów, które należałoby omówić. Zostały one przytoczone jedynie hasłowo ze względu na ramy artykułu.

Jak wspomniano przeżycia estetyczne traktujemy, jako reakcje na przedmioty i obiekty, którym przypisuje się wartość estetyczną. Należy postawić pytania: czym jest i od czego zależy przeżycie estetyczne, wartość estetyczna dzieła, sztuki? Odpowiedź na te, pytania wymagałaby rozważań w obszarach zagadnień, które ze względu na ramy tekstu, zostały tylko wymienione:

1. Cechy osobnicze postrzegającego podmiotu, na które składa się pamięć genetyczna, w której zapisana jest historia rozwoju naszego gatunku, działająca na poziomie podświadomości..., doświadczenia na poziomie pierwotnym dotyczące wizualnych

obrazów świata oraz sygnały tworzone i przekazywane w formie ustnej lub pisanej (Ogorzałek 2006).

2. Uwarunkowania funkcji poznawczych zależne od płci, predyspozycji, i elementów zmiennych takich jak inteligencja i wiedza oraz związane z nimi struktury pamięci. Postawy warunkujące inwencyjny bądź nieinwencyjny styl myślenia, motywacja, niedobory umysłowe (dysgrafia, dysprzestrzenność, dysobrazowalność, amuzja i wiele innych), halucynacje.
3. Uwarunkowania kulturowe funkcji poznawczych zależne od ról społecznych wynikających z płci, systemów wychowawczych i edukacyjnych ukierunkowanych namyślenie inwencyjne, rozwój wyobraźni, wysoką ocenę postaw indywidualnych bądź myślenie wtórne, oparte o schematy myślowe oraz wysoką ocenę automatyzmów w procesach myślowych i osiągnięcia doskonałości w ich powtarzalności. Mechanizmy i instytucje społeczne propagujące indywidualizm, bądź mu wrogie.
4. Kultury w czasie, kultury jako epoki, kultury w przestrzeni, uwarunkowania geograficzne, przyroda i sztuka, socjologia sztuki (Ossowski 1966).

\*

Każdy z nas ma w mózgu zarejestrowaną własną galerię obrazów, specyficzną mapę świata, za pomocą której porusza się w otaczającej rzeczywistości (termin ten wprowadził Rene Tom). Składają się na nią przynajmniej trzy elementy; wspomniana wcześniej pamięć genetyczna, realistyczne obrazy, które w czasie naszego życia zostały odebrane za pośrednictwem naszego wzroku i przeniesione do struktur naszej pamięci i trzeci element to sygnały kulturowe, wieloznaczny, arbitralny, subiektywny sposób oprogramowania naszej wyobraźni (Ogorzałek 2006).

Oko jest narządem wzroku. Kamera fotograficzna rzutuje obraz posługując się przysłoną i soczewką, ale przetwarzanie zachodzi na błonie. Podobnie ma się sprawa ze źrenicą, soczewką i siatkówką. Przetwarzanie odbywa się w tej części układu nerwowego, która interpretuje informacje, docierające tam za pośrednictwem nerwu wzrokowego. Właściwe widzenie, czyli interpretacja impulsów elektrycznych biegnących wzdłuż nerwu wzrokowego, odbywa się w mózgu. Informacja z siatkówki, początkowo prosta, ulega niezmiernemu przemieszaniu na swej drodze ku korze mózgu. Neurony muszą ją tu rozszyfrować, nadać jej sens i odtworzyć ją dla nas w postaci trójwymiarowego wyobrażenia. Obraz musi, więc w rezultacie ulec skonstruowaniu od początku. Drugie źródło komplikacji polega na tym, że mózg jest narządem składającym się z dwóch części, otrzymuje informację z obydwu oczu, połowa pola widzenia trafia do lewego płata ciemieniowego i na odwrót. Mózg potrafi też

widzieć bez żadnych bodźców zewnętrznych, jak to się dzieje w snach. Istnieją halucynacje, czyli rzekome postrzeganie, które dają pełne wrażenie realności z tym tylko, że oko nie brało w tym udziału (Smith 1989).

Iluzjato zjawisko podobne, ale jest to raczej skrzywienie percepcji, niż jej stworzenie od nowa. Zarówno halucynacje, jak i iluzje mogą się wydawać w pełni prawdziwe, ponieważ realność jest cechą, którą mózg wytwarza wewnątrz siebie. Wrażenia są abstrakcją, a nie repliką rzeczywistego świata. Mózg widzi, ale też wybiera sobie to, co chce zobaczyć. Układ wzrokowy nie jest, więc przyrządem kopiującym, w którym dwuwymiarowy obraz zogniskowany na siatkówce staje się dwuwymiarowym widzeniem świata. Przede wszystkim obraz ten najpierw zostaje rozszyfrowany, a potem ukształtowany na nowo. Widzenie, mówiąc krótko, wiązano dotąd z funkcją oczu. Dokonało się jednak przesunięcie i widzeniem trzeba nazwać to, co mózg robi z informacjami, docierającymi doń za pośrednictwem nerwów wzrokowych (Smith 1989).

Spośród wszystkich ludzkich zmysłów wzrok i słuch mają największy wpływ na naszą wizję świata. Wzrok wyznacza naszą perspektywę świata zewnętrznego, słuch natomiast wykorzystujemy głównie do utrzymywania kontaktu z innymi ludźmi lub istotami żywymi. Zachodzi, więc bardzo wyraźna różnica, co do sposobu wykorzystywania obu tych zmysłów: wzrok dostarcza nam głównie informacji o świecie, słuch natomiast – o innych ludziach (Bronowski 1984). Jest to dodatkowo zależne od rodzaju bodźca (obraz lub dźwięk), jego złożoności (logiczny ciąg zdarzeń, czy też pojedyncze sygnały, które należy „połączyć”, aby odbierane elementy miały jakikolwiek sens), czasu trwania i intensywności (bodźce silniejsze łatwiej detekować, niż słabsze, które należy najpierw „oddzielić” od zakłócającego je tła). W rezultacie informacja ulega zatarciu, tworząc wrażenie braku bodźca (Dobrucki 2011).

\*

Podstawowym komunikatem fizycznej rzeczywistości jest jej wizualny obraz (w naukach przyrodniczych jest on podstawowym dowodem). Wiążą się z tym procesy rejestracji, analizy i interpretacji (semantycznej lub asemantycznej) otaczających nas zjawisk. Ważną cechą związaną z analizą obrazów jest to, że nie zauważamy, (choć widzimy) tych jego elementów, których wcześniej nie poznaliśmy np. w formie opisu. Wynika z tego, że świadomość tego, co widzimy ma swoje uwarunkowanie w wiedzy dotyczącej postrzeganego przedmiotu lub zjawiska, Fot.1. („Rozwój umysłu to poszerzenie granic świadomości” – pisał C.G. Jung, trafnie podsumowując przypuszczenia, że świadomość ulega przemianom, a wraz z nią zmienia się też własne poczucie tożsamości) (Smith 1989).



Fot. 1. Jerzy Olek, De-, Centrum Sztuki Współczesnej *Znaki Czasu*, Toruń 2014 (źródło: materiały prasowe)

Świadomość nie jest cechą wyłącznie człowieka, ale w żadnym razie świadomość innych zwierząt nie da się porównać do świadomości ludzkiej. Małpy niższych gatunków i małpy bezogonowe przejawiają na przykład pewne cechy świadomości plus inteligencję, komunikują się (za pomocą sygnałów widzialnych i dźwięków), rozpoznają swe własne odbicie, mają też i inne przymioty umysłowe, jak (niekiedy) zdolności naśladowcze. Człowiek dysponuje wszystkimi tymi zdolnościami, a ponadto posiada mowę gramatyczną, kulturę, zdolność tworzenia i wiele innych wybitnych cech umysłowych. Nikt dziś już nie wysuwa tezy, że świadomość stanowi wyłączność człowieka; jednakże, znowu powołując się na Junga, świadomość ludzka jest szersza, umysł człowieka jest, więc również szerszy. Zasadnicza biologiczna złożoność umysłu polega na tym, że wykształcił się on w toku ewolucji, mimo że nie bardzo wiadomo, po co? Złożoność ta jest integralną częścią świadomości, a ta z kolei stanowi nieodłączny składnik percepcji, która czerpie z układu czuciowego, zdolnego do postrzegania świata zewnętrznego (taki układ ma najniższe ze zwierząt) (Kuhn 1985).

Niepowtarzalność gatunku ludzkiego przejawia się w innych dziedzinach, wystarczy wymienić tylko jedną, choć tylko jedną z nich – ewolucję kulturową. Bliska zgodność

między obrazem rzeczywistości, jaki tworzymy a tymi jej aspektami, które były ważne dla przetrwania, zdecydowały o sukcesie ewolucyjnym naszego gatunku (Kuhn 1985).

Kultura jest funkcjonalną całością stanowiącą układ chaotyczny. Nieregularność zjawisk w kulturze powoduje, że dla ich rozumienia potrzebna jest pełna znajomość całości, a także społeczno–historycznych uwarunkowań odpowiednich doświadczeń kulturowych ludzkości. Z chaosem kultury wiąże się przypadek. Jego rola jak tego dowodzi historia jest olbrzymia (Lem 1988). Kulturaw skali osobowościowej i społecznej jest trudna do zdefiniowania. Obraz kultury przełomu XX i XXI wieku to rozpad pojęć i zjawisk w kulturze, rozpad systemu wartości. Następuje przesunięcie wartości z obszaru treści na obszar formy, np. w sztukach wizualnych. Forma i technologia dominują w muzyce, architekturze. Sprzyjają temu pewne nurty w filozofii i estetyce (behawioryzm, pragmatyzm, semiotyka, jako przeciwieństwa funkcjonalizmu). W przestrzeni formy i technologii rodzi się różnorodność, ale ona sprzyja rozpadowi i rozczłonkowaniu pojęć i wartości. Kultura jest obrazem i jednocześnie percepcją rzeczywistości społecznej w jej wielorakich przejawach; polityce, ekonomii, nauce, technice, sztuce. Technologia, jako źródło artystycznej inspiracji jest bezpłodna. Jest to jeden z objawów patologii kultury. Innym jest postępująca destrukcja kultury poprzez upatrywanie wartości w ich niszczeniu. Wartości można niszczyć w sposób skoordynowany albo namiastkowy, specjalizuje się w tym dzisiejsza sztuka; systematyka tortury, umęczonego i odkształconego ciała ludzkiego... niszczenie ładów i harmonii w sztukach wizualnych, muzyce, narracji w literaturze (Lem 1988), Fot. 2, Fot. 3.



Fot. 2. Kaori Horai, *Labirynt* Festiwal Nowej Sztuki, Frankfurt/O – Słubice 2010 (źródło: materiały prasowe)



Fot. 3. Paulina Hebda, Hybryda, *Labirynt*Festiwal Nowej Sztuki, Frankfurt/O – Słubice 2010 (źródło:materiały prasowe)

Zastanawia w tym kontekście wysiłek organizacyjny inwestowany w uczynienie dziełem sztuki tego, co dotąd żadną miarą być nim nie mogło. Ilość takich obiektów jest olbrzymia. Kultura staje się ucieczką z kultury: drogą donikąd. Współczesne pokolenie artystów zdaje się dążyć do wyczerpania pragmatyki twórczej bez względu na to, czym kiedyś była i czemu służyła (Lem 1988).

Jak w tę rzeczywistość wpisuje się percepcja i interpretacja zjawisk i obiektów sztuki? Interpretacja zależy od naszej postawy psychicznej względem przedmiotów. Czynnikiem mającym bezpośredni wpływ na interpretację, także na jej semantyczny lub asemantyczny charakter, jest świadomość.

Ze świadomością związane są struktury pamięci, odpowiadające m.in. za selekcję i dobór informacji wg. określonych (i wykształconych poprzez doświadczenie), niepowtarzalnych (typowych dla danej jednostki) wzorców percepcji. Związane z nią są też procesy myślowe niezbędne w procesie postrzegania. Na ich charakter, poza czynnikami kulturowymi, bezpośrednio kształtującymi osobowość, takimi jak; wychowanie, systemy edukacyjne, ideologie, religie, ma poziom rozwoju umysłowego, zwany potocznie i nieprecyzyjnie, (co należy podkreślić) inteligencją. Z inteligencją wiążą się niedobory umysłowe. Podobnie jak niektórzy ludzie wyrastają ponad normę, są inni, znajdujący się dużo poniżej. Muszą być zdolni i niezdolni, stanowiący obydwie końce skali Bella (przedstawiającej rozkład ilorazu inteligencji danej populacji). Nie jest możliwe, żadne podsumowanie ludzkich zdolności umysłowych. Zahaczenie o inteligencję, uczenie się, mowę i muzykę może dać pewne pojęcie o szerokości tematu, ale mało wnosi do naszej wiedzy o mądrości, myśleniu, percepcji, twórczych zdolnościach człowieka (Smith, 1989).

\*

Czym jest piękno? Mianem piękna można oznaczyć takie własności przedmiotów, które wywołują w umyśle pewien rodzaj zadowolenia, nazwany zadowoleniem estetycznym. Piękno nie jest pojęciem abstrakcyjnym, przedstawia się, bowiem w całym szeregu objawów wywołujących uczucia zadowolenia estetycznego (Struve 1892).

Odczuwanie przyjemności na poziomie fizjologicznym pewnych, jakości zmysłowych, bez jakichś czynników intelektualnych daje piękno barw lub dźwięków. W zakresie wrażeń wzrokowych i słuchowych przyjemny znaczy tyle, co piękny (Ossowski 1966).

Sztuka powinna oddziaływać na określony zmysł (plastyczne na wzrok, muzyczne na słuch, kulinarne na smak itp.) i przez ten zmysł trafiać do umysłu oraz do serca. Im bystrzejsze i bardziej wdrożone do widzenia będzie oko, tym głębiej w duszę zapadnie prawdziwe dzieło sztuki, zostawiając w niej niezatarte i niezapomniane wrażenie.

W sztuce przejawiają się dążności poznawcze. Historia kultury sugeruje, że podział dziedzin sfery kultury jest w zasadzie sztuczny, wywołany potrzebami praktycznymi, a odczuwana różnorodność dziedzin kultury jest odbiciem dążeń badaczy, dla których niezbędna jest systematyzacja i ściśle jakościowe rozgraniczenie badanych faktów. Równocześnie jednak postuluje się zasadność poszukiwania uniwersalizmów form artystycznych w ogólnej twórczości kulturalnej (Troczyński 1936).

Na przestrzeni więcej niż dwu tysięcy lat powtarza się koncepcja, że piękno polega na mierze, proporcji, liczbie, układzie i stosunku części. W ogólnym pojęciu piękne jest to, co oglądamy, słuchamy czy wyobrażamy sobie z upodobaniem i uznaniem. W ramach pojęcia

piękna można także rozpatrywać rzeczy mające cechy wdzięku, wzniosłości czy celowości. Stąd też kategoria rzeczy pięknych jest na tyle pojemna, że wszystko, co harmonijne, strojące, mające idealne (lub do ideału zbliżone) proporcje i współgrające z otoczeniem można zaliczyć do rzeczy pięknych (Tatarkiewicz 1978).

Postać oceny estetycznej (a tym samym pogład, czy dana rzecz jest piękna) może być absolutna bez odniesienia do żadnego czynnika relatywizującego (wzorca), dodatkowo wartość estetyczna nie jest związana z przedmiotem ocenianym, a zależy od poznającego dany przedmiot estetyczny. Rezultatem tego jest niejednolitość ocen w stosunku do ocenianego przedmiotu. Między ludźmi występują duże różnice w zdolnościach postrzegania, rozumienia i interpretacji emocjonalnej bodźców estetycznych, co ma niewątpliwy wpływ na ocenę dzieł sztuki i wszelkich innych bodźców estetycznych.

\*

Przeżycia estetyczne odbiorców, przeżycia estetyczne twórców, jak (i czy) mierzyć przeżycia estetyczne i takie cechy jak głębię, intensywność, efektywność, czy poprzestać na prostej sumie subiektywnych opisów, a jeśli tak to czy ma to jakiś sens?

W kompleksie zagadnień wchodzących w zakres estetyki są piękno i sztuka. Interferencja tych dwóch ośrodków zainteresowań zdecydowała o terenie estetyki, a interferencja... różnych punktów widzenia wpłynęła na uformowanie się jej pojęć. Stąd beznadziejność wielu dyskusji dotyczących zakresu estetyki i jej zadań (Ossowski 1966).

### **Literatura**

Bronowski J., Źródła wiedzy i wyobraźni, Warszawa, PIW, 1984, 24–32.

Dobrucki A., Szum jako paradygmat ciszy, w: Przestrzeń ciszy, Wrocław, Wyd. DSW, 2011, 248.

Kuhn T. S., Dwa bieguny, Warszawa, PIW, Warszawa 1985, 258–264.

Lem S., Filozofia przypadku, Literatura w świetle empirii, Kraków, Wydawnictwo Literackie, 1988, 322–343.

Ogorzałek A., Mózgowy procesor symultaniczny, Gdańsk, Nowa Oficyna, 2006, 2–6.

Ortega y Gasset J., Dehumanizacja sztuki i inne eseje, Warszawskie Wydawnictwo Literackie. 1996.

Ossowski S., U podstaw estetyki, Warszawa, PWN, 1966, 17, 26, 281–290.

Smith A., Umysł, Warszawa, PZWL, 1989, 289–322, 348–354.

Struve H., 1892. Sztuka i piękno, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2010, 28–35.

Tatarkiewicz W., 1978. Parerga, w: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2004,



120–128.

Troczyński K., 1936. Elementy form literackich, w: Wybór pism estetycznych, Karków, Univeritas, 2014, 117–118.

# Pompy wyporowe stosowane w przemyśle spożywczym

Krzysztof Towarnicki <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska  
Krzysztof Towarnicki: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

## Streszczenie

W przemyśle spożywczym stosuje się różnego rodzaju pompy do transportowania wszelkiego rodzaju cieczy przeznaczonych do spożycia. Elementy wyporowe pomp muszą być odporne na korozję, a ponadto ich powierzchnia nie powinna reagować z transportowaną cieczą. Ich niewątpliwie charakterystyczną cechą powinna być wyjątkowa wysoka odporność na ścieranie, tak, aby starte fragmenty nie zostały dalej transportowane. Poniższy artykuł przedstawia opis stosowanych pomp w piekarnictwie oraz przeprowadzone prace nad modernizacją dotychczas stosowanej pompy łopatkowej. Aby wspomniana pompa spełniała wyżej wymienione warunki została zmodernizowana konstrukcja wirnika oraz zmieniono materiał elementów wyporowych. Zastąpiono dotychczas stosowany silikon na twarde tworzywo, przeznaczone do kontaktu z żywnością. Zredukowano liczbę łopatek z 9 do 2. Zmieniono działanie pompy, w której wykorzystano elastyczne wyginanie łopatek, a zastąpiono je na mechaniczne przesuwanie się łopatek za pomocą siły wywieranej przez napięte sprężyny.

**Słowa kluczowe:** pompa wyporowa, pompa łopatkowa, łopatki pompy, żurownik.

## Positive displacement pumps used in the food industry

### Summary

In the food industry, various types of pumps are used for transporting all types of liquids intended for consumption. The displacement elements of the pumps must be resistant to corrosion and their surface should not react with the liquid being transported. Their undoubtedly characteristic feature should be exceptional high abrasion resistance, so that the fragments are not transported further. The following article presents a description of the used pumps in the bakery and carried out work on the modernization of the previously used vane pump. In order for the pump to meet the above-mentioned conditions, the rotor design has been modernized and the material of the displacement elements has been changed. The previously used hard plastic silicone intended for contact with food has been replaced. The number of blades from 9 to 2 was reduced. Pump operation was changed in which the flexible bending of the blades was used, and replaced by the mechanical movement of the blades by the force exerted by the biased springs.

**Keywords:** positive displacement pump, vane pump, pump vanes, a crane.

### 1. Wstęp

Początki hydrauliki można odnaleźć już w starożytności, gdzie człowiek wykorzystywał ruch cieczy na własne potrzeby. W tamtym czasie nie korzystano jeszcze ze sformułowanych praw, na których opiera się współczesna technika hydrauliczna. 200 lat przed naszą erą odkryto pompę ssąco-tłoczącą, a w 1600 roku J. Kepler wynalazł pompę zębatą, która wówczas nie znalazła praktycznego zastosowania w napędach. Następnie w kolejnych latach wprowadzano w niej kolejne udoskonalenia. Obecnie należy do najczęściej używanych pomp wyporowych w hydraulicznych układach napędowych. Dzisiejszy rozwój techniki hydraulicznej związany jest z rozpowszechnieniem się systemów elektroniki i automatyki w budowie maszyn. Zaletą hydraulicznych układów napędowych jest szeroka możliwość sterowania zarówno prędkością jak i mocą odbiorników. Wprowadzenie nowoczesnych,

wielopoziomowo rozwiniętych układów elektronicznych w układach hydraulicznych przyczyniło się do płynnej regulacji oraz znacznego obniżenia emitowanego przez nie hałasu. Obecnie trwają dodatkowe prace związane z optymalizacją budowy elementów układów hydraulicznych. Odnosi się to głównie do dwóch kierunków: minimalizacji ich masy, co wiąże się ze zmniejszeniem ich gabarytów oraz redukcji emitowanego przez nie hałasu. W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano rozwój mikrohydrauliki, która szeroko opisana jest w lit (Kollek i in. 2014). Niewątpliwą zaletą układów hydraulicznych jest przenoszenie dużych mocy, które pozwoliło na zastosowanie tego napędu do maszyn przemysłu spożywczego. W zachodniej Europie już w latach 80 XX wieku zastosowano ten napęd w urządzeniach do mieszania i dzielenia ciasta. W Polsce dopiero na początku XXI wieku zaczęto wprowadzać hydrauliczne układy napędowe w urządzeniach piekarniczych. Wynika to zarówno z zalety, jaką jest łatwość sterowania jak również z wysokiej odporności na pyły i zanieczyszczenia w stosunku do klasycznych mechanizmów śrubowych, mimośrodowych, krzywkowych czy zapadkowych. Dodatkowo rozwój techniki wprowadził systemy elektroniki i automatyki w budowie elementów oraz układów hydraulicznych. Wprowadzenie nowoczesnych rozbudowanych układów elektronicznych w układach hydraulicznych wpłynęło na płynną regulację oraz obniżenie emitowanego przez nie hałasu. W obecnym czasie zaobserwować można wzrost zainteresowania wprowadzania hydraulicznych układów napędowych do urządzeń przemysłu spożywczego. Ponadto trudno sobie wyobrazić transportowanie cieczy spożywczej bez wykorzystania pompy.

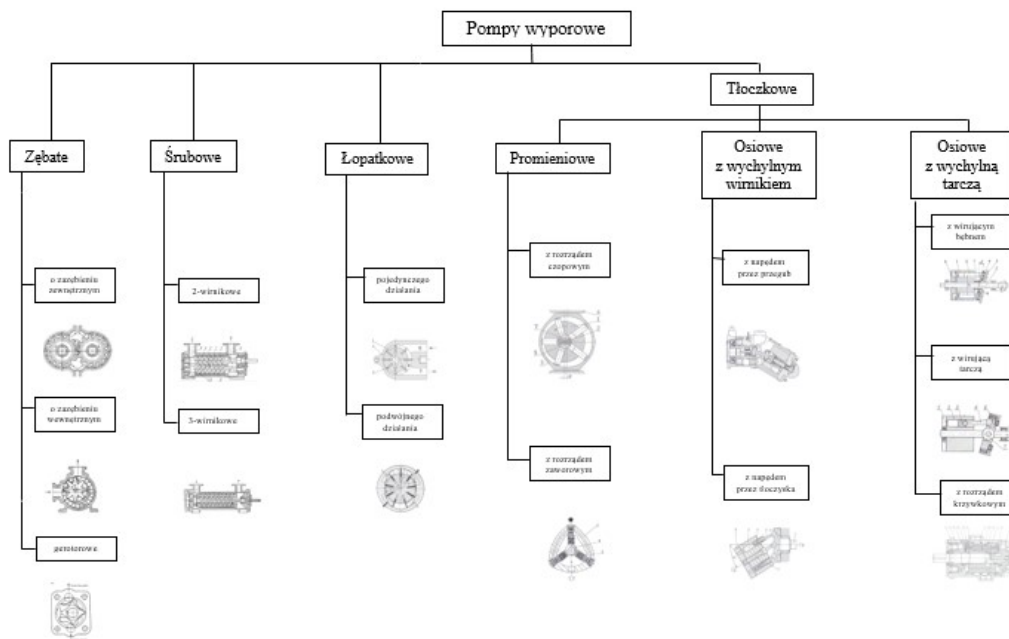
## **2. Wprowadzenie, klasyfikacja pomp**

Pompa to główny, elementarny komponent układu hydraulicznego. Jej działanie opiera się na zamianie dostarczanej z zewnątrz energii mechanicznej (np. silnik elektryczny lub spalinowy), na energię hydrauliczną zgromadzoną w ciekłym czynniku roboczym. Jej praca sprowadza się do zasysania z przestrzeni ssawnej cieczy, a kolejno wypychanie jej poprzez elementy robocze pompy do przestrzeni tłocznej. Prawidłowe działanie pompy wiąże się z zagwarantowaniem szczelnego rozdzielania obszaru ssawnego od tłoczego. Nieprzepuszczalne rozdzielanie obu przestrzeni umożliwia podwyższenie ciśnienia transportowanej cieczy. Sprzężenie elementów konstrukcyjnych powoduje, że obrót wirnika powoduje jednocześnie przemieszczenie ciekłej masy. Gdy nastąpi zatrzymanie wirnika przepływ czynnika roboczego staje się niewykonalny. Celem pompy jest zapewnienie dwóch funkcji: transportowanie cieczy z części ssawnej do części tłocznej oraz podniesienie jej ciśnienia. Aby zagwarantować ten warunek powinna posiadać poniższe cechy:

- powinna zapewnić stałą wydajność niezależnie od ciśnienia roboczego,

- osiągać wysokie ciśnienia pracy,
- szczelne rozdzielenie obszaru ssawnego od tłocznego ( wysoka sprawność wolumetryczna),
- możliwie małe straty związane z tarciami mechanicznymi i lepkościowymi (wysoka sprawność hydrauliczno-mechaniczna),
- zdolność do samozasysania czynnika roboczego.

Podział pomp wyporowych pod względem ich konstrukcji odnaleźć można w literaturze (Stryczek 2003, Towarnicki 2015), a w postaci graficznej przedstawiono na rys. 1 korzystając z lit. (Towarnicki 2015).



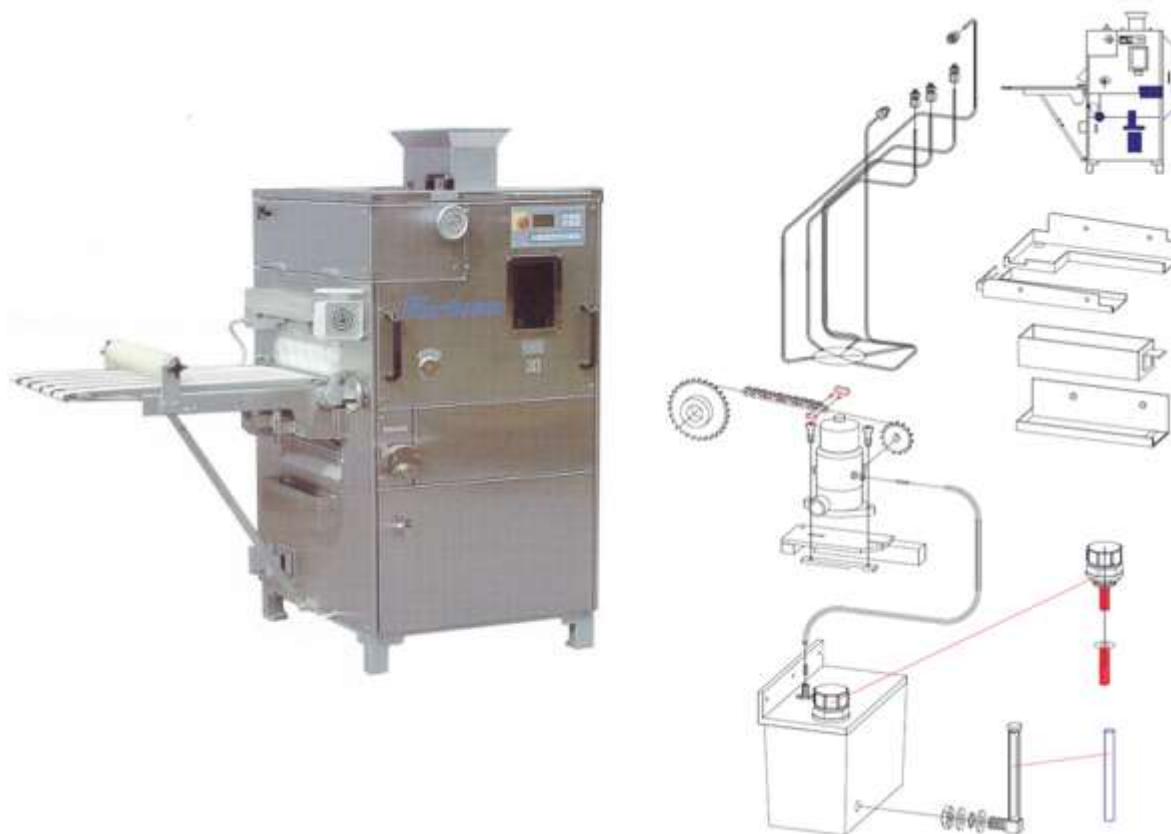
Rys. 1. Klasyfikacja pomp wyporowych (Towarnicki 2015)

### 3. Pompy stosowane w przemyśle piekarniczym

Pompy wyporowe stosowane w piekarnictwie pełnią dwie funkcje. Pierwszą z nich jest transportowanie cieczy spożywczej, co jest głównym tematem poniższego artykułu. Drugą generowanie energii strumienia cieczy do napędu maszyn piekarniczych. Zastosowanie układu hydraulicznego, jako główny napęd spotkać można w dzielarkach do bułek szerzej opisanej w literaturze (Towarnicki 2018). Dzielarki do ciasta są urządzeniami przeznaczonymi do pracy w piekarni. Służą do równomiernego podziału porcji urobionego ciasta, niektóre posiadają dodatkowo możliwość mechanicznego zaokrąglenia określonej liczby, w zależności od urządzenia, identycznych pod względem objętości porcji do wypieku, odnosi się to głównie bułek. Dla ukształtowania chleba budowane są linie technologiczne, a na ich początku zawsze znajduje się dzielarka. Wprowadzenie napędu hydraulicznego w tego typu urządzeniach wynika z kilku przyczyn. Wprowadzenia kompletnych zasilaczy

hydraulicznych, dzięki czemu projektant urządzeń piekarniczych nie musi się borykać z problemem doboru współpracujących elementów hydraulicznych. Zasilacze hydrauliczne w tych urządzeniach posiadają pompy zębate o zazębieniu zewnętrznym o których szerzej można dowiedzieć się w lit (Kollek 1996; Fiebig 2008) oraz zbiorniki oleju o pojemności od 5 do 6,5 L. Ciśnienie maksymalne w układzie to 140 bar, a ciśnienie robocze to 120 bar. Kolejny powód to znaczna odporność na zabrudzenia i zapylenia w stosunku do napędów mechanicznych. W przypadku urządzeń piekarniczych jest to istotny czynnik wpływający na pracę tych urządzeń. Najważniejszą przyczyną wprowadzenia tego napędu w dzielarkach jest przenoszenie dużych mocy. W związku z wprowadzaniem do wyrobów piekarniczych spulchniaczy oraz polepszaczy pieczywa, przygotowywane ciasto stało się sztywniejsze i dotychczasowe napędy mechaniczne miały problem ze sprasowaniem takiego ciasta. Dodatkowo łatwość automatyzacji i regulacji w napędzie hydraulicznym pozwala na pracę maszyny w linii technologicznej i zastąpienie człowieka w miejscu pracy. Ponadto stosowany jest również napęd hydraulicznych w układach wspomagających w miesiarkach do ciasta bądź ubijarkach do masy. Zastąpiono mechaniczne układy wspomagające układami hydraulicznymi do zapinania wózka oraz podnoszenia głowicy w miesiarkach. Dzięki temu uzyskano sztywne zamocowanie wózka oraz sztywne dociśnięcie głowicy do korpusu maszyny. Dodatkowo niewątpliwą zaletą układów hydraulicznych jest odporność na zanieczyszczenia w stosunku do mechanizmów śrubowych, zapadkowych lub przekładni zębatych stosowanych w starszych urządzeniach. Wracając do pierwszej funkcji, jaką jest transportowanie cieczy spożywczej to również tutaj można wyodrębnić dwa zadania, czyli transportowanie cieczy oraz pełnienie funkcji smarowania cieczą spożywczą. Smarowanie tego typu spotyka się głównie w dzielarkach do ciasta pszennego, żytniego i mieszanego. Głównym elementem układu smarowania jest pompa, która powoduje przepływ cieczy smarującej. Kolejnym elementem układu sterowania są zawory oraz rozdzielacze, dzięki którym uzyskuje się równomierne wraz z regularną częstotliwością smarowanie. Następnym ważnym elementem są przewody elastyczne lub sztywne. Ostatnimi elementami układu smarowania są końcówki, które są dedykowane do konkretnego zużywającego się elementu. W ostatnich latach w układach hydraulicznych zaczęto stosować olej biodegradowalny, którego składnikiem bazowym jest olej roślinny. Wpływ stosowania olejów biodegradowalnych odnaleźć można w literaturze (Poprawski 2014), (Rogoś i Urbański 2009) i (Sacha 2013). Ciągła produkcja wymusza odpowiedni sposób zabezpieczenia elementów maszyn przed ich zbyt szybkim zużywaniem się. Z tego względu wprowadza się centralne smarowanie, które zapewnia automatyzację procesu smarowania olejem lub smarem.

Znacząco podnosi komfort operatora maszyny, które musiał dotychczas wykorzystywać do tego ręczne urządzenia pomocnicze. Centralne smarowanie pozwala na precyzyjne dozowanie substancji smarujących, zachowując przy tym dokładność i regularną częstotliwość dawkowania. W urządzeniach przemysłu spożywczego układy smarowania dzieli się na dwie kategorie, w których olej smarujący ma kontakt z żywnością lub nie. Olej przeznaczony do smarowania elementów mających kontakt z żywnością musi być transportowany przez układ zbudowany z elementów, które są odporne na korozję oraz ich użytkowanie nie powoduje wprowadzenia zanieczyszczeń do oleju. Materiałami spełniającymi te kryteria są głównie metale nierdzewne i kwasoodporne oraz tworzywa sztuczne. Głównym elementem układu smarowania jest pompa, która powoduje przepływ cieczy smarującej. Poniżej przedstawiono dzielarkę do bułek wraz ze schematem centralnego układu smarowania przez mimośrodową pompę wyporową.



Rys. 2. Dzielarka do bułek wraz ze schematem smarowania (opracowanie własne)

Spełnienie jedynie funkcji transportowej cieczy przez pompę odbywa się głównie w żurownikach do ciasta. Żuownik zaprojektowany jest do przygotowywania kwasu chlebowego. Na początek urządzenie to miesza wszystkie składniki (zaczątek, mąkę i wodę) z niewielką prędkością. Odbywa się to za pomocą wbudowanego, mechanicznie napędzanego mieszadła oraz przepompowywania cieczy z dolnej części zbiornika do jego górnej części.

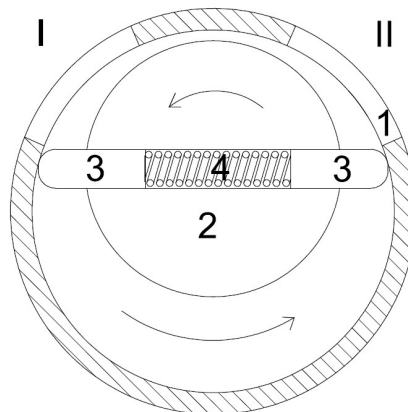
Proces ten trwa aż powstanie jednolita masa. Następnie rozpoczyna się dojrzewanie kwasu poprzez utrzymywanie go w stałej temperaturze 30°C przez 2,5 h. Kolejno następuje jego konserwacja poprzez powolne schładzanie do temp. 14°C lub 12°C (w zależności od założonego czasu odświeżenia max. 48h od poprzedniego nastawienia urządzenia). Proces dojrzewania i konserwacji może trwać nawet do 12 h. W celu przemieszczania żuru chlebowego stosuje się głównie pompy zębate oraz pompy łopatkowe. Poniżej przedstawiono rozebraną pompę zębatą o zazębieniu zewnętrznym, która pracowała w żurowniku.



Rys. 3 Widok zębatej pompy waporowej stosowanej do transportu cieczy spożywczej (opracowanie własne)

#### 4. Zasada działania pompy łopatkowej

Głównym tematemartykułu jest pompa łopatkowa, więc po krótkce zostanie przedstawiona jej zasada działania. Stosowana jest w dwóch wariantach: pojedynczego działania i podwójnego działania. Niniejszy artykuł poświęcony będzie pompie łopatkowej pojedynczego działania, z tego względu zostanie przedstawione działanie tego typu pompy. Ogólną zasadę działania pompy łopatkowej pojedynczego działania przedstawia rys. 2.



Rys. 4. Zasada działania pompy łopatkowej (opracowanie własne)

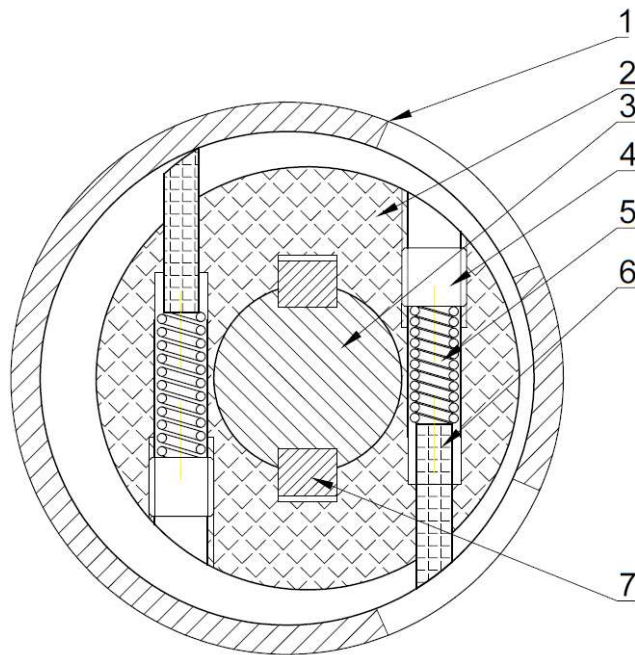
Łopatki (3) umiejscowione są wewnątrz wirnika (2), który umieszczony jest mimośrodowo w korpusie (1). Nacięty wirnik (2) napędzany jest poprzez wał z zewnątrz. W wyniku obrotu wirnika (2) w lewo, dociskana łopatka (3) do ścianki korpusu (1) powoduje zassanie czynnika roboczego z przestrzeni ssawnej I. Kolejno w wyniku obrotu wirnika (2) następuje wysunięcie się łopatki (3), aż do położenia granicznego. Następnie łopatka jest wsuwana do wirnika i wzrasta ciśnienie po stronie tłocznej pompy. Dla zapewnienia docisku łopatek do bieżni korpusu zastosowano sprężynę (4). W żurowniku firmy Spomasz stosowano dotychczas pompę mimośrodową z silikonowym wirnikiem. Ze względu na ciecz, jaką jest kwas chlebowy silikonowe łopatki pompy ulegały zniszczeniu. Drobne fragmenty odpadały od wirnika i były dalej transportowane wraz z kwasem chlebowym. Główną przyczyną tego zjawiska, jest fakt, że w kwasie chlebowym są drobne fragmenty zbrylonej mąki. Delikatne silikonowe łopatki nie są odporne na te zanieczyszczenia. Poniżej na rys.4. przedstawiono uszkodzony silikonowy wirnik.



Rys. 5. Widok uszkodzonego silikonowego wirnika (opracowanie własne)

Ze względu na zniszczenia powstałe w silikonowym wirniku, zastąpiono silikonowy wirnik z łopatkami, na wirnik z tworzywa z przesuwными łopatkami wykonanymi z tworzywa sztucznego. Docisk krawędzi łopatki do bieżni korpusu pompy zapewniają dwie sprężyny. Siła docisku sprężyny regulowana jest za pomocą śruby dociskowej. Do wirnika z tworzywa wstawiono wał wyciągnięty z wirnika silikonowego. Dzięki temu można wykorzystać dotychczas stosowane połączenie z napędem pompy. Pompa napędzana jest za pomocą silnika trójfazowego asynchronicznego klatkowego. Poniżej na rys. 5 przedstawiono schemat pompy po modernizacji.





Rys. 6. Schemat pompy łopatkowej: 1-korpus, 2-wirnik, 3-wał wirnika, 4-śruba dociskowa, 5-sprężyna ściskana, 6-łopatka, 7-wpust (opracowanie własne)

Do złożenia zmodernizowanej pompy użyto: przetoczony wał z silikonowego wirnika, wirnik z tworzywa, dwa wpusty, dwie łopatki, cztery sprężyny i śruby dociskowe. Poniżej na rys. 7. zostały przedstawione wspomniane użyte elementy.

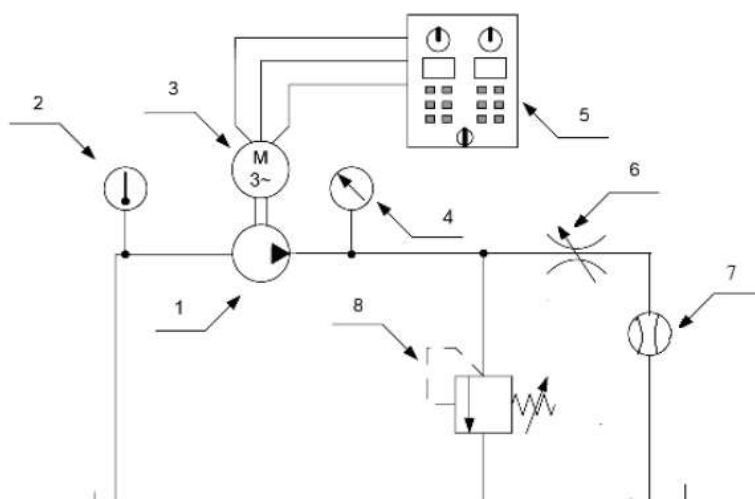


Rys. 7. Widok użytych elementów do złożenia pompy po modernizacji (opracowanie własne)



Rys. 8. Widok od dołu złożonej pompy (opracowanie własne)

Po złożeniu pompy zostało zbudowane stanowisko pomiarowe do wyznaczenia charakterystyki pompy  $Q(p)$  widoczne przedstawione na rys. 22. W skład stanowiska wchodzi pompa łopatkowa, która napędzana jest przez silnik 3-fazowy o mocy 1,1 kW. Prędkość obrotowa silnika może być zmieniana płynnie dzięki zasilaniu przez szafę sterującą z wbudowanym falownikiem. Układ ten pozwala na nastawę prędkości obrotowej silnika w zakresie od 0 do 1400 obr/min. Zainstalowana pompa 1 jest zabezpieczona przed przeciążaniem przez nastawny zawór bezpieczeństwa 8. Obciążenie jednostki wyporowej realizowane jest przez zawór dławiący 6. Wydajność rzeczywista mierzona jest za pomocą przepływomierza 7. Manometr 6 pozwala na odczyty ciśnienia tłoczenia pompy.



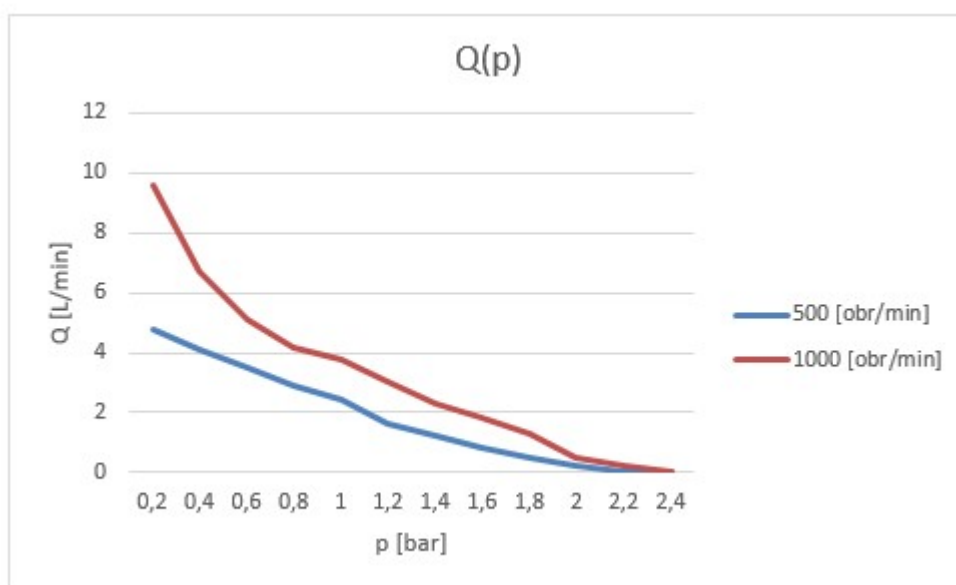
Rys. 9. Schemat hydrauliczny układu badawczego: 1 – pompa łopatkowa, 2 – termometr, 3 – silnik elektryczny, 4 – manometr, 5 – szafa sterująca, 6 – zawór dławiący, 7 – przepływomierz, 8 – zawór bezpieczeństwa (opracowanie własne)

Badania zostały przeprowadzone po próbnym uruchomieniu stanowiska. Podczas tego ruchu sprawdzono działanie pompy, zaworu bezpieczeństwa oraz wskazania wszystkich przyrządów pomiarowych. Po ustaleniu się właściwych parametrów eksploatacyjnych pompy

przystąpiono do przeprowadzenia pomiarów wielkości charakteryzujących pompę. Pomiary przeprowadzono dla dwóch prędkości obrotowych  $n_1 = 500$  [obr/min] oraz  $n_2 = 1000$  [obr/min]. Ciecżą zastosowaną do pomiarów była woda o temperaturze 293 K. Poniżej przedstawioną tabelę pomiarową oraz wykres przedstawiający zależność wydajności od ciśnienia tłoczenia.

Tabela 1. Wyniki pomiarów (opracowanie własne)

p [bar]	Q <sub>1</sub> [L/min]	Q <sub>2</sub> [L/min]
0,2	4,8	9,6
0,4	4,1	6,7
0,6	3,5	5,1
0,8	2,9	4,2
1	2,4	3,8
1,2	1,6	3
1,4	1,2	2,3
1,6	0,8	1,8
1,8	0,5	1,3
2	0,2	0,5
2,2	0	0,2
2,4	0	0



Rys. 10. Wykres przedstawiający wydajność pompy łopatkowej od ciśnienia tłoczenia (opracowanie własne)

## 5. Podsumowanie

W powyższym artykule zostały przedstawione urządzenia do dzielenia oraz formowania bulek. Te najstarsze posiadają napęd ręczny. Nowocześniejsze zostały wyposażone w napędy mechaniczne, a obecnie stosowane posiadają napęd hydrauliczny. Wprowadzenie napędu

hydraulicznego w tego typu urządzeniach wynika z kilku przyczyn. Wprowadzenia kompletnych zasilaczy hydraulicznych, dzięki czemu projektant urządzeń piekarniczych nie musi się borykać z problemem doboru współpracujących elementów hydraulicznych. Kolejny powód to znaczna odporność na zabrudzenia i zapylenia w stosunku do napędów mechanicznych. W przypadku urządzeń piekarniczych jest to istotny czynnik wpływający na pracę tych urządzeń. Najważniejszą przyczyną wprowadzenia tego napędu w dzielarkach jest przenoszenie dużych mocy. W związku z wprowadzaniem do wyrobów piekarniczych spulchniaczy oraz polepszaczy pieczywa, przygotowywane ciasto stało się sztywniejsze i dotychczasowe napędy mechaniczne miały problem ze sprasowaniem takiego ciasta. Dodatkowo łatwość automatyzacji i regulacji w napędzie hydraulicznym pozwala na pracę maszyny w linii technologicznej i zastąpienie człowieka w miejscu pracy. Ze względu na ciągłe zmiany w wyglądzie i kształcie bułek przewiduje się wzrost zainteresowania napędami hydraulicznymi wśród konstruktorów dzielarko-formierek do bułek. Niepodważalną zaletą napędów hydraulicznych jest możliwość przenoszenia dużych obciążeń, które przychyliło się do wprowadzenia tego napędu w urządzeniach przemysłu spożywczego. Często zdrowie człowieka uważane jest za największe dobro, a żywienie jest podstawą dla zachowania zdrowia. Dzisiaj trudno wyobrazić sobie wytwarzanie żywności bez użycia maszyn. Z tego względu podjęto próby udoskonalania maszyn, aby produkcja żywności była zgodna z zachowaniem zasad czystości i higieny. Ze względu na coraz większy stopień automatyzacji produkcji, przewiduje się wzrost wprowadzania centralnych układów smarowania w urządzeniach związanych z produkcją spożywczą. W powyższym artykule przedstawiono projekt modernizacji mimośrodowej pompy łopatkowej. Wprowadzona modyfikacja powinna zapobiec niedopuszczalnej sytuacji, w której fragmenty łopatek pompy dostawały się do transportowanej cieczy. W poprzednim w silikonowym wirniku pompy zastosowano 9 łopatek. W nowym rozwiązaniu umieszczono ich zaledwie dwie. Nie powinno to wpłynąć znacząco na zmniejszenie wydajności, zapewne zwiększy się pulsacja wydajności. Akurat w tym urządzeniu obie wspomniane wartości nie są istotne. Najważniejsza jest odporność na wtrącenia, które powodowały zniszczenia silikonowych łopatek. Zastosowane sprężyny w obecnym rozwiązaniu pozwolą schować się łopatce, gdy pojawią się wtrącenia zbrylonej mąki. W najbliższym czasie pompa zostanie zamontowana, przetestowana w warunkach pracy oraz po określonym czasie rozebrana, a jej elementy zostaną poddane weryfikacji.

## **6. Literatura**

Fiebig W. 2008. Geräuschminderung in hydraulischen Systemen, VDI Verlag, Düsseldorf 2008: 53-66.

- Kollek W., 1996. Pompy zębate, konstrukcja I eksploatacja. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1996: 10-21.
- Kollek W., Osiński P., Stosiak M., Wilczyński A., Cichon P., 2014. Problems relating to highpressure gear micropumps, Archives of civil and Mechanical Engineering (14) 2014: 88-95
- Poprawski W., 2014 Biodegradowalne smary w zastosowaniu do węzłów łożyskowych elementów wykonawczych maszyn roboczych, Inżynieria Maszyn (2)2014: 99-107.
- Rogoś E., Urbański A., 2009. Biodegradowalny olej hydrauliczny o podwyższonych właściwościach smarnych, Tribologia (2)2009: 201-212.
- Sacha D., 2013. Nowe metody oceny właściwości olejów hydraulicznych i turbinowych wprowadzone w specyfikacjach produktowych według PN-ISO, NAFTA-GAZ (3)2013: 263-270.
- Stryczek S.: Napęd hydrostatyczny, tom I , elementy. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2003: 20-35.
- Towarnicki K., 2015. Projekt wstępny pompy zębatej, Wrocław: Praca inżynierska. Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej 2015: 7-14.
- Towarnicki K., 2018. Hydrauliczne układy napędowe w dzielarkach do bułek. W: Nauki techniczne i inżynierskie. Cz. 5 Poznań: Młodzi Naukowcy: 120-135.

# Współczesne autonomiczne systemy obsługi magazynowania

Ewa Tulska <sup>(1)</sup>, Ariana Omarzai <sup>(1)</sup>, Justyna Tulska <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

<sup>2</sup> Wydział Humanistyczny, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

EwaTulska: ewa\_tulska@sggw.pl

## Streszczenie

Procesy magazynowania i składowania odgrywają kluczową rolę w każdej współczesnej gałęzi gospodarki. Rozwój technologiczny oraz ciągła konkurencja rynkowa przyczyniają się do wzrostu ilości produkowanych przez przedsiębiorstwa wyrobów gotowych, różniących się od siebie specyfikacjami technologicznymi, często tylko w niewielkim stopniu. Zwiększenie rodzajów oraz ilości wytwarzanych produktów wymaga od przedsiębiorstw produkcyjnych ciągłego doskonalenia sieci łańcucha dostaw, lepszej organizacji, a w konsekwencji wydajniejszych magazynów, przy jak najmniejszej powierzchni magazynowania dostępnej infrastruktury przedsiębiorstwa. Wdrożenie nowych technologii takich jak: kodowanie kreskowe, komunikacja radiowa oraz systemy zarządzania, przyczyniają się do wzrostu poziomu automatyzacji w magazynie, oszczędności miejsca składowania oraz związanych z tym oszczędności finansowych. Zastosowanie autonomicznych systemów obsługi magazynowania umożliwi bardziej efektywną kontrolę i przepływ zapasów, krótszy czas reakcji na wymagania produkcyjne i większą różnorodność produktów.

**Słowa kluczowe:** automatyzacja, systemy składowania, magazyn.

## Modern autonomous systems to manage warehousing

### Summary

Warehousing and storing processes are playing a key role in modern economy. Technological development and continuous market competition contribute in increase of the production of ready goods which vary from each other only by slightly different technological specification. Because companies are producing more types of the products in bigger quantity, they must develop more their supply chain, organization, and therefore, have more efficient warehousing, by only using the space they own, which sometime may be to little. Implementation of new technologies such as; barcoding, radio communication and management systems contribute to increase of automatization in warehouse, storage area space saving and associated with them cost decrease. Adoption of autonomous systems to manage warehousing allows more efficient control and inventory flow, shorter respond time to production requirements and greater variety of products.

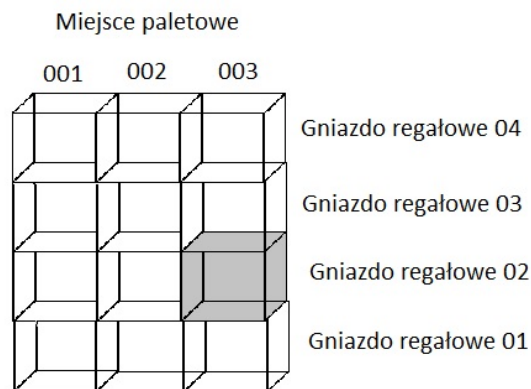
**Keywords:** automatization, warehouse, storage system, warehouse.

## 1. Wstęp

Magazynowanie to zespół czynności w łańcuchu dostaw związanych z przyjmowaniem, składowaniem, przechowywaniem, komplementowaniem, przemieszczaniem, konserwacją, ewidencjonowaniem, kontrolowaniem i wydawaniem zapasów, dla których determinującym czynnikiem jest czas. Składowanie natomiast to zbiór czynności związanych z umiejscowieniem w sposób usystematyzowany zapasów na przestrzeni składowej magazynu, czyli budowli magazynowej (norma PN-84/N-01800). Obiekty logistyczne do składowania i magazynowania nazywane są magazynami (Kostrzewski 2010). Ich głównym zadaniem jest etykietowanie, personalizacja produktów gotowych oraz wyrównanie różnic pomiędzy przepływem materiałów między dostawcami, a klientami. Magazynowanie

wymaga uwzględnienia takich czynników jak sezonowość wyrobów gotowych i produkcji czy transport różnych wyrobów do tego samego klienta (Gu i in. 2007).

Ciągła konkurencyjność przedsiębiorstw produkcyjnych doprowadziła do organizowania dostaw tak, aby ich realizacja następowała w jak najkrótszym czasie. Umożliwia to zmniejszenie kosztów utrzymania zapasów i ogólnych kosztów magazynowania (Dudziński 2012). Zapasy mogą powstawać z różnych przyczyn i mogą mieć różnorodne przeznaczenie. Można je sklasyfikować na podstawie kryterium umiejscowienia w łańcuchu logistycznym, na zapasy: materiałów i surowców, półproduktów w toku, wyrobów gotowych, towarów czy materiałów pomocniczych i eksploatacyjnych (Krzyżaniak i in. 2008). Tradycyjnie w systemach magazynowych do obsługi zleceń wykorzystywane są wózki widłowe oraz przenośniki z ręcznym odbiorem i załadunkiem. Pobierają one towary z określonych gniazd regałowych na miejscach paletowych, które przedstawiono poniżej (Rys.1).



Rys. 1. Miejsca paletowe i gniazda regałowe. (opracowanie własne na podstawie Przybysz 2016)

Ze względu na konieczność obniżenia kosztów składowania i operacji logistycznych najczęściej stosowane są wielopoziomowe systemy składowania wyposażone w systemy automatycznego wyszukiwania i transportu materiałów. Ze względu na rozbudowę głębokości systemów magazynowych koniecznym staje się odpowiednie zorganizowanie procesu realizacji zamówień magazynowych. Odpowiednie zarządzanie magazynowaniem stanowi podstawę płynnego łańcucha logistycznego. Obecnie, wraz ze zmianą spojrzenia zapatrywania na parametry magazynu składowania, takie jak: czas składowania czy szybkość dostępu do gniazd, nastąpiło wprowadzenie nowych rozwiązań technologicznych związanych z automatyzacją procesów produkcyjnych (Coyle i in. 2002). Główny ciężar sterowania procesami magazynowymi spoczywa na odpowiednio dobranym wyposażeniu technicznym oraz oprogramowaniu. Oprogramowanie stosowane w nowoczesnych magazynach

regalowych składa się z współpracujących aplikacji umożliwiających kontrolę zapasów magazynowych, sterowanie przepływem materiałów, zarządzanie i sterowanie urządzeniami transportowymi (Son 2015).

Celem niniejszego opracowania było przedstawienie wybranych automatycznych systemów obsługi implementowanych w magazynach wysokiego składowania.

## **2. Rola systemów obsługi magazynów**

Z punktu widzenia logistycznego podstawowymi zadaniami obiektów magazynowych jest przyjęcie produktu i umieszczenie go w odpowiednim miejscu składowania w celu obniżenia kosztów transportu. Następnie odpowiednie przechowywanie, zabezpieczając wytworzone towary przed obniżeniem lub utratą pożądaną przez klienta jakości. Istotnym i trudnym zadaniem jest dobór pod względem ekonomicznym wielkości partii transportowanych oraz kompletacja wyrobów w taki sposób, aby ich transportowanie było ekonomicznie uzasadnione, czyli opłacalne dla przedsiębiorstwa. Końcowym etapem jest odpowiednie wydanie wybranego produktu do klienta, przy jak najkrótszym czasie reakcji (Koster i in. 2007).

Ze względu na budowę można rozróżnić trzy podstawowe typy magazynów:

1. Otwarte - służące do magazynowania produktów odpornych na działanie czynników atmosferycznych, np. węgiel, drewno, wyroby stalowe i żeliwne;
2. Półotwarte- posiadające dach i minimum jedną ze ścian, czyli tzw. wiaty, zabezpieczające zapasy przed bezpośrednim wpływem warunków atmosferycznych;
3. Zamknięte- posiadające pełną budowę ścian, drzwi, podłogę oraz opcjonalnie okna. W tego rodzaju magazynach znajdują się otwory bramowe, a przy nich występuje zazwyczaj rampa z daszkiem (jeśli podłoga magazynu znajduje się ponad powierzchnią otaczającego terenu).

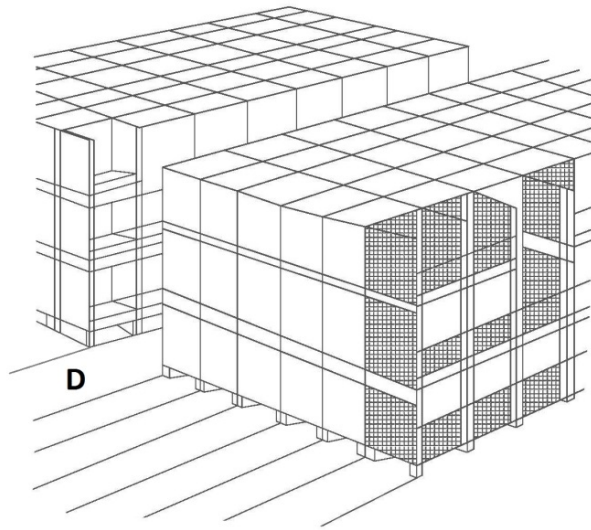
Te ostatnie stanowią najliczniejszą grupę i przeznaczone są do składowania różnorodnych zapasów. Wśród nich można wyróżnić magazyny niskiego składowania - do 4,2 m wysokości, średniego składowania- 4,2-7,7 m wysokości oraz magazyny wysokiego składowania od 7,2 m wzwyż nawet do 25-30 m wysokości (Bryła 2015).

Niezależnie od wyboru magazynu należy wybrać odpowiedni rodzaj składowania zapasów, który jest uwarunkowany systemem składowania, wykonywania czynności piętrzenia (ręczny lub zautomatyzowany), i sposobem składowania tzn. sposobem piętrzenia zapasu, który jest wykonywany w stosach lub w urządzeniach.

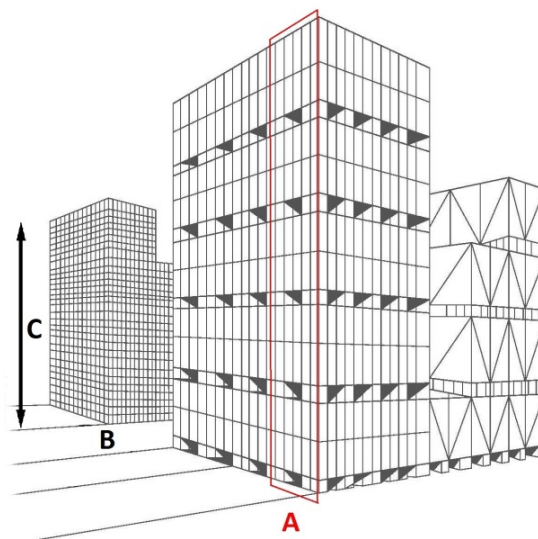
Składowanie w stosach ma zastosowanie w przypadku asortymentów o dużej liczbie jednostek ładunkowych. Są to najczęściej magazyny spedycyjne, dla samonośnych zapasów (ewentualnie nakładane na palety), których układ może być blokowy lub rzędowy.



W układzie blokowym (Rys. 2) można osiągnąć wyższy wskaźnik wykorzystania powierzchni składowej magazynu (0,6-0,8) niż w przypadku układu rzędownego (0,3-0,4) (Rys.3). Wynika to ze zwiększonej liczby dróg manipulacyjnych dla wózków widłowych i podnośnikowych tak, aby zapewnić dojazd do każdego sortymentu. Największą wadą tego układu jest niemożność składowania niejednorodnych asortymentów. Litery na rysunkach 2 i 3 oznaczają odpowiednio: A- rząd; B, D- drogi manipulacyjne, C- wysokość składowania (piętrzenia) (Dudziński 2012).



Rys. 2. Składowanie w układzie blokowym. (opracowanie własne na podstawie Przybysz 2016)



Rys. 3. Składowanie w układzie rzędownym (opracowanie własne na podstawie Przybysz 2016)

Składowanie w urządzeniach znajduje zastosowanie najczęściej w magazynach wysokiego składowania, gdzie jednostki ładunkowe nie są przystosowane do piętrzenia. Najczęściej są to przedsiębiorstwa komplementujące zamówienia do wydania, a zapas stanowią jednostki ładunkowe niejednorodnych asortymentów. Najczęstszymi urządzeniami stosowanymi w tego typu magazynach są regały. Mogą to być regały paletowe, przystosowane do składowania asortymentów na paletach euro i robione pod wymiar tych palet. Obsługiwane są głównie przez wózki widłowe. (Dudziński i in. 2002).

Innym typem są regały zblokowane wjazdne, przelotowe lub nieprzelotowe. Służą głównie do składowania zapasów w bloki jednego asortymentu. Magazyny tego typu w większości przeznaczone są do długoterminowego składowania. Obowiązuje w nich zasada FILO „first in last out” („pierwsze weszło-ostatnie wychodzi”).

Kolejny typ regałów to regały Push Back, gdzie paleta umieszczana w kanale regału przepycha w głąb kolejne palety. Regał przejezdny to umieszczenie zwykłego regału paletowego na torowisku, co umożliwia przesuwanie całego regału. Regał przepływowy umożliwia stosowanie zasady FIFO „first in-first out” (pierwsze weszło-pierwsze wyszło), która znajduje szczególne zastosowania w przedsiębiorstwach sektora rolno-spożywczego, gdzie zapasy posiadają ograniczony termin przydatności do spożycia. Cechą charakterystyczną stanowią wałki na spodzie, przesuwające palety z jednej strony regału na drugą.

Ostatni typ to regały specjalne przystosowane do składowania towarów nie wymiarowych, np. szpul z kablem czy rur (Niziński i in. 2011).

### **3. Automatyczne systemy magazynowe**

Automatyzacja systemu magazynowania to wprowadzanie nowych technologii, czyli systemów automatycznych, które pozwalałyby na ograniczanie w znacznym stopniu pracy ludzkiej w magazynach. Systemy automatyczne mogą pomagać w realizacji wszystkich niezbędnych procesów. Ponadto system magazynowy działa jak bufor pomiędzy producentami i odbiorcami, dzięki czemu przyczynia się do zmniejszenia wpływu niepewności związanych z brakiem lub ograniczonym dostępem do produktów (Ogawa 2011).

W nowoczesnych systemach magazynowania pracę wózków widłowych przejmują układnice magazynowe wykorzystując w pełni optymalnie powierzchnię magazynową oraz zapewniając szybkie i bezpieczne przemieszczanie produktów, a do zarządzania lokalizacją, poprzez system, potrzebny jest tylko jeden pracownik. Podobnie jest z bazami danych, które

odpowiednio zarządzane minimalizują czas realizacji zleceń, a rola człowieka ogranicza się jedynie doprowadzenia w system odpowiednich danych (Michalski 2008).

W odniesieniu do poziomu automatyzacji w miejscach składowania można wyróżnić trzy podstawowe typy systemów:

1. Ręczne systemy magazynowe (systemy do wyboru produktów),
2. Zautomatyzowane systemy magazynowe (systemy typu "produkt-do-zebrania"),
3. Automatyczne systemy magazynowe (Van den Berg 1999)

#### **4. Wybrane automatyczne systemy magazynowe**

Obiektem zautomatyzowanym pod względem technologicznym jest magazyn firmy Amazon, który mieści się w Bielanach Wrocławskich w Polsce. Jest to jedyne centrum logistyczne sieci Amazon w Europie wykorzystujące roboty- Amazon Robotics. Częściej spotykane w Stanach Zjednoczonych.

Amazon Robotics to system oparty na pracy robotów przypominających samojezdne odkurzacze. Urządzenia są od nich stosunkowo większe, ich waga wynosi 332kg, wysokość 30 cm i powyżej 1 m szerokości. Roboty pracują w strefie komplementacji produktów, które zakupili klienci. Dzięki wgranemu oprogramowaniu w sterownik robota, podjeżdża on pod odpowiedni regał, unosi regał na wysokość umożliwiającą przemieszczanie i podjeżdża do stanowiska kompletacyjnego czekając, aż pracownik pobierze potrzebny produkt. Po tej czynności robot odstawia regał w odpowiednie miejsce. W tym samym czasie w strefie komplementacji ustawiają się w kolejce inne roboty z odpowiednimi regałami. Dodatkową zaletą jest zainstalowanie robotom algorytmu nauczającego i wybierającego najkrótszą drogę dojazdu do regału i stanowiska kompletacyjnego. Roboty dzięki algorytmowi mogą też odstawiać regały z najczęściej zamawianymi produktami najbliższej stanowisk kompletacyjnych. Stwierdzono, że przedsiębiorstwo Amazon wykorzystując roboty w strefie komplementacji wyrobów do klienta, znacznie skróciło czas dostępu do wyrobu gotowego. Magazyn nie jest całkowicie zautomatyzowany, roboty wykonują tylko niektóre czynności, a do ich obsługi wymagane jest zatrudnienie pracowników (Libiszewska 2015a).

Innym interesującym obiektem magazynowym jest ogromny koncern technologiczny- JD Company. Przedsiębiorstwo posiada zautomatyzowany magazyn w Chinach, w którym zatrudnia czterech pracowników przy obsłudze 200 000 zamówień dziennie. Opisany magazyn, na przedmieściach Szanghaju, zajmuje powierzchnię 16 tys. m<sup>2</sup>, a pracowników zastąpiły roboty stacjonarne i mobilne. Magazyn wykorzystuje zautomatyzowaną technologię sortowania, aby sortować do 16 000 paczek na godzinę z dokładnością na poziomie 99,99%. Centrum sortowania wykorzystuje sztuczną inteligencję do skanowania i kontroli paczek

podczas ich przetwarzania. Po zdjęciu opakowań z ciężarówek są one ładowane na złożoną sieć automatycznych maszyn, gdzie szybkie, automatyczne przenośniki skanują każde pudełko. Następnie skanery obrazu sprawdzają pakiety, a inteligentny system logistyczny firmy oblicza miejsce, w którym należy je usunąć. Pakiety są pogrupowane według regionów, odebrane przez autonomiczne wózki widłowe i dostarczone do ciężarówki w celu dostawy (Rajamanickam 2018).

Warto wspomnieć również o magazynie spółki Amica we Wronkach w Polsce. Ten w pełni zautomatyzowany wysoki na 48 metrów obiekt, może obsłużyć dziennie 30 tys. (na wejściu) oraz 36 tys. (na wyjściu) sztuk towaru zatrudniając jednego pracownika, który nadzoruje prawidłową pracę całego systemu. W obiekcie nie występują wypadki przy pracy, a towar przenoszony jest przez pięć ramion o długości 44 m. Całą pracę koordynuje system komputerowy, który odszukuje lokalizację każdego z produktów. W obiekcie magazynowym spółki Amica nie ma ogrzewania, a światło jest wyłączone lub możliwie przyciemnione, co pozwala na oszczędność poboru energii elektrycznej, a co z tym związane obniżeniem kosztów utrzymania magazynu. W dni wolne od pracy magazyn zaprogramowany jest do optymalizacji ułożenia towarów pod zlecenia na następny tydzień (Biedrzycki 2017).

Innym przykładem zautomatyzowanego magazynu jest nowy obiekt firmy Komputronik pod Poznaniem w Polsce. Magazyn wysokiego składowania działa w oparciu o system kolektorów. Zastosowano tam kompletację strefową, która opiera się na przypisaniu pracownika do jednej strefy, w której kompletuje zamówienia. W magazynie firmy Komputronik zastosowano także komasatory, których funkcją jest koncentracja towaru przeznaczonego dla jednego klienta, a pochodzącego z różnych stref kompletacji. Większość wyrobów jest magazynowana i kompletowana na antresoli, a następnie transportowana do komasatora przenośnikiem rolkowym. Stamtąd pobierana jest do strefy pakowania lub dostarczana do stanowisk pakujących znajdujących się wzdłuż przenośnika (Libiszewska 2015b)

Intreresującym rozwiązaniem jest zaproponowany przez norweską firmę Hatelland - system AutoStore. AutoStore to system obsługi magazynu obsługujący towary małe pod względem masy i gabarytów. Oparty jest na konstrukcji sześcienniej, umożliwiającej wykorzystanie jak największej możliwej dostępnej przestrzeni magazynowej. Skrzynki wypełniające przestrzeń magazynową nałożone są jedna na drugiej i tworzą tzw. siatkę aluminiową. Sterowane radiowo roboty przesuwają się po torach nad konstrukcją i zjeżdżają w dół, aby chwycić skrzynki i dostarczać je do stanowisk roboczych. Aby uzyskać dostęp do skrzynek znajdujących się na dole konstrukcji sześcienniej roboty wydobywają skrzynki po kolei,

rozpoczynając od górnej. Skrzynki odbierane ze stanowisk roboczych umieszczone są na szczycie konstrukcji, dzięki czemu wszystkie najrzadziej używane asortymenty przechodzą na sam dół sześcianu. Sposób układania w znacznym stopniu zwiększa wydajność pracy jednego robota. Aby uzyskać większą wydajność magazynu, można zwiększyć ilość robotów. Istotnym elementem jest też możliwość prostego i stosunkowo nisko kosztowego rozbudowywania powierzchni magazynowej, bez konieczności zatrzymywania pracy całego systemu. Siatka, po której poruszają się roboty może wypełniać przestrzenie o nieregularnych kształtach. Konstrukcję sześcienną można zbudować wokół filarów, czyli w niekoniecznie prostopadłościennym magazynie. System AutoStore może zwiększyć pojemność magazynu nawet czterokrotnie, bez potrzeby zwiększania powierzchni magazynowej. W przypadku awarii, gdy jeden robot przestanie działać, reszta robotów funkcjonuje bez zmian, przejmując jego zlecenia. Każdy z robotów może uzyskać dostęp do każdej ze skrzynek, tak samo jak każda skrzynka może być dostarczona do dowolnego stanowiska roboczego. System ten odznacza się niskim poborem energii (strona internetowa [hatteland.com](http://hatteland.com)) (strona internetowa [autostoresystem.com](http://autostoresystem.com)).

## **5. Wnioski**

Niezależnie od zastosowanego (w pełni lub częściowo) systemu obsługi, wszystkie zautomatyzowane magazyny wysokiego składowania odznaczają się kilkoma cechami: pozwalają na lepsze wykorzystanie powierzchni magazynowej ze względu na możliwość automatycznego składania produktów na większych wysokościach, redukują liczbę błędnych lub niekompletnych zamówień, skracają czas kompletacji i realizacji zamówień, zmniejszają ryzyko wystąpienia sytuacji zagrażających życiu bądź zdrowiu pracowników, obniżają jednostkowe koszty procesów oraz pozwalają na obniżenie kosztów utrzymania magazynów. Często innowacyjne technologie wdrażane w magazynach wymagają dużego nakładu finansowego, jednak ostatecznie ich implementacja do systemu produkcyjnego może prowadzić do obniżenia kosztów całkowitych przedsiębiorstwa oraz usprawnić procesy magazynowania.

W nowocześnie prosperującym przedsiębiorstwie niezbędne jest zastosowanie nowych rozwiązań, które oprócz zapewnienia optymalizacji procesów dostawczych są bezpieczniejsze dla pracowników poprzez ograniczenie pracy ludzkiej. Zastosowany system magazynowy należy dopasować do specyfiki przedsiębiorstwa i typów produktów przez niego wytwarzanych. Dzięki zastosowaniu automatyzacji, proces ten może być dużo bardziej wydajny i efektywny.

## 5. Literatura

- Bhasin K., Clark P. 2016. How Amazon Triggered a Robot Arms Race. Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-06-29/how-amazon-triggered-a-robot-arms-race>, dostęp 29.01.2019.
- Biedrzycki P. 2017. 26 tys. miejsc paletowych i jeden pracownik. Widzieliśmy automatyczny magazyn wysokiego składowania spółki Amica. Strefa inwestorów. <https://strefainwestorow.pl/artykuly/relacja-z-wydarzenia/20171020/automatyczny-magazyn-wysokiego-skladowania-amica>, dostęp 20.01.2019.
- Coyle J. J., Bardi E. J., Langley Jr C. J. 2002. Zarządzanie logistyczne. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- De Koster R., Le-Duc T., Roodbergen, K. J. 2007. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European journal of operational research*, 182(2): 481-501.
- Dudziński Z. 2012. Poradnik organizatora gospodarki magazynowej w przedsiębiorstwie. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Dudziński Z., Kizyn M. 2002. Vademecum gospodarki magazynowej. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr.
- Fijałkowski J. 2000. Transport wewnętrzny w systemach logistycznych. Wybrane zagadnienia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 35-61.
- Gu J., Goetschalckx M., Leon F., McGinnis. 2007. Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, Volume 177, 1: 1-21.
- Van den Berg J. P., Zijm W. H. M. 1999. Models for warehouse management: Classification and examples. *International Journal of Production Economics*, 519-528.
- Kostrzewski M. 2010. Symulacyjne badania geometrii magazynu. *Logistyka*, 4: 1-8.
- Krzyżaniak S., Cyplik P., 2008, Zapasy i magazynowanie. Instytut Logistyki i Magazynowania. Seria: Biblioteka Logistyczna, Tom I.
- LeVine S. 2018. In China, a picture of how warehouse jobs can vanish. *Axios*. <https://www.axios.com/china-jd-warehouse-jobs-4-employees-shanghai-d19f5cf1-f35b-4024-8783-2ba79a573405.html>, dostęp 29.01.2019.
- Libiszewska M. 2015a. Amazon robotics już w magazynie WR03. *Nowoczesny Magazyn*, 5.
- Libiszewska M. 2015b. Przygotowanie logistyczne do rozwoju sprzedaży. *Komputronik uruchomił nowe centrum logistyczne. Logistyka a Jakość*, 4(16).
- Niziński S., Żurek J., Ligier K. 2011. *Logistyka dla inżynierów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- Norma PN-84/N-01800- Gospodarka Magazynowa. Terminologia podstawowa.

- Ogawa K. 2011. Automatic warehouse and warehousing method into automatic warehouse. Us Grant. <https://patents.google.com/patent/US8731740B2/en>, dostęp 29.01.2019.
- Palmer A. 2018. Chinese e-commerce company is running a nearly autonomous warehouse with almost ZERO human employees. Daily Mail. <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5845805/Chinese-e-commerce-company-JD-com-running-nearly-autonomous-warehouse.html>, dostęp 29.01.2019
- Przybysz M. 2016. Magazyny Budowle magazynowe:4. <https://docplayer.pl/1078411-Magazyny-budowle-magazynowe.html>, dostęp 29.01.2019.
- Rajamanickam V. 2018. JD.com opens automated warehouse that employs four people but fulfills 200,000 packages daily. Freight Waves. <https://www.freightwaves.com/news/technology/jdcom-opens-automated-warehouse-that-employs-four-people-but-fulfills-200000-packages-daily>, dostęp 29.01.2019.
- Shed S. 2018. Inside JD.com, the giant Chinese firm that could eat Amazon alive. Wired. <https://www.wired.co.uk/article/china-jd-ecommerce-store-delivery-drones-amazon>, dostęp 29.01.2019.
- Son D.W., Chang, Y.S., Choi H.C., Kim W.R. 2015, Design of Warehouse Control System for Real Time Management. International Federation of Automatic Control, 48-3: 1435-1439.

# Redukcja strat wynikających z przygotowania maszyn produkcyjnych poprzez wprowadzanie technik LM

Ewa Tulska <sup>(1)</sup>, Paulina Sobol <sup>(1)</sup>, Justyna Tulska <sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

<sup>2</sup> Wydział Psychologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Ewa Tulska: ewa\_tulska@sggw.pl

## Streszczenie

W publikacji omówiono zarys filozofii Lean Manufacturing (LM) tłumaczonej, jako szczupłe wytwarzanie. Przedstawiono jeden z głównych problemów, jaki stanowi marnotrawstwo w każdej postaci. W artykule możemy przeczytać o podziale kosztów, jakości, na które mają wpływ różnorodne czynniki produkcyjne. Zaprezentowano zaimplementowanie narzędzi 5S i Poka-Yoke w systemie produkcyjnym przedsiębiorstwa rolno-spożywczego, które mają na celu wyeliminowanie marnotrawstwa oraz zawarte są najważniejsze informacje dotyczące tych narzędzi i sposobu ich wdrażania w przedsiębiorstwach. Pokazane są podstawowe bariery występujące podczas wdrażania wymienionych narzędzi LM. Możemy dowiedzieć się również o osiągniętych przez badane przedsiębiorstwo produkcyjne efekty umożliwiające zapobieganiu ewentualnych błędów pracowników. Zaprezentowano techniki oraz sposoby usprawniania pracy maszyn i urządzeń, tak, aby maksymalnie standaryzować czynności przygotowawcze i produkcyjne, skrócić czasy wytwarzania produktów gotowych oraz zapobiegać niepotrzebnym przestojom w badanym przedsiębiorstwie.

**Słowa kluczowe:** system produkcyjny, straty, Lean Manufacturing, 5S, Poka-Yoke.

## Reduction of losses caused from the preparation of production machines by introducing LM techniques

### Summary

The article presents the outline of the philosophy of Lean Manufacturing (LM) translated as a lean production. One of the main problems is represented by the waste in any form. Various production factors have influence on the division of quality costs, which is presented in this article. Article also says about implementation of the 5S and Poka-Yoke tools in the production system of an agri-food enterprise to eliminate wastage. The most important information about these tools and the way they are implemented in enterprises are included. Basic barriers appearing during the implementation of the mentioned LM tools are presented. We can read about the effects achieved by the surveyed manufacturing company to prevent possible errors because of employees. Techniques and ways to improve the work of machines and devices were presented, so as to maximize the standardization of preparatory and production activities, shorten the time of manufacturing finished products and prevent unnecessary downtime in the surveyed enterprise.

**Keywords:** production system, losses, Lean Manufacturing, 5S, Poka-Yoke.

### 1. Wstęp

Przemysł rolno-spożywczy zajmuje kluczowe miejsce w gospodarce krajowej. Dąży się do wprowadzenia produktów polskich na rynek europejski. Bardzo istotne są działania zmierzające do wprowadzania produktów rolno-spożywczych na rynkach zachodnich. Konkurencyjność na tych rynkach wymaga od producentów ciągłego udoskonalania przeprowadzanych procesów. Doskonalenie może się przejawiać w takich obszarach, jak jakość wykonywanych towarów lub usług przy jednoczesnym zmniejszaniu ich ceny, osiąganie jak najmniejszych strat, niezawodności produktu lub firmy dostarczającej produkty, czy możliwie najkrótszym czas oczekiwania klienta na produkt końcowy, co sprzyja



zadowoleniu klienta. Aby temu sprostać w przedsiębiorstwach produkcyjnych dąży się do poprawy wskaźników produkcyjnych we wszystkich działach (podzespołach) tych przedsiębiorstw (Kłós 2010).

Zaostrzona konkurencja w sektorze rolno-spożywczym wymaga od przedsiębiorstw wyboru odpowiedniej strategii stosowanych w światowych koncernach produkcyjnych. Jedną z najbardziej popularnych strategii w XXI wieku jest Lean Manufacturing, często tłumaczone, jako synonim Lean Production. Termin Lean Manufacturing narodził się po II wojnie światowej w wyniku połączenia technik, metod oraz dobrych praktyk głównie japońskich systemów produkcyjnych z dodatkiem praktyk pochodzących ze Stanów Zjednoczonych (Womack i in. 2001).

Koncepcja LM zakłada, że wszystko to, co nie tworzy wartości dodanej produktu gotowego, powinno zostać wyeliminowane. Głównym czynnikiem, który należy wykluczyć z procesu produkcji jest marnotrawstwo. Przejawia się on takimi cechami jak nadprodukcja, zapasy, zbędny ruch, błędy, zbędne oczekiwanie czy niepotrzebny transport. Odnosi się to zarówno do pracowników linii produkcyjnej pracujących przy wytwarzaniu produktu gotowego, wykorzystywanych maszyn i urządzeń oraz w głównej mierze do procesów przygotowawczych i specyficznych przy wyrobie poszczególnych produktów gotowych.

Marnotrawstwo wynika też z niedotrzymania odpowiedniego poziomu jakości, czyli ponoszenia dodatkowych kosztów. W literaturze można spotkać rozróżnienie kosztów jakości (ang. Cost of Quality) na koszty dobrej i złej jakości. Koszty dobrej jakości (ang. CODQ – Cost of Good Quality) to te, które przedsiębiorstwo ponosi w celu zapobiegania powstawania produktów wadliwych (złej jakości) lub usług. Można podzielić je na koszty zapobiegawcze oraz koszty kontroli. Pierwsze z nich (ang. Prevention Costs) obejmują wszystkie koszty poniesione na: planowanie i kontrolę jakości, działania innowacyjne, działania korygujące błędy, poprawę poprzez projektowanie sposobu zapewnienia jakości oraz kształcenie i szkolenia kadry pracowniczej. W skład drugich tzn. Appraisal Costs - wchodzi wszystkie koszty poniesione na sprawdzanie, testowanie, kalibrację i wszystkie inne czynności związane z zapewnieniem wysokiego poziomu jakości na wszystkich etapach procesu produkcyjnego. Koszty złej jakości (ang. COPQ – Cost of Poor Quality) są to koszty związane z wyprodukowaniem wyrobu niezgodnego z pożądanym poziomem jakości produktu czy usługi. Koszty te obejmują również wszystkie koszty utraconych zleceń w wyniku np. niedoborami, opóźnieniami, awariami, brakiem elastyczności, spóźnieniem z terminem dostarczenia zamówień do klienta. Są nazywane wewnętrznymi kosztami awarii. Natomiast

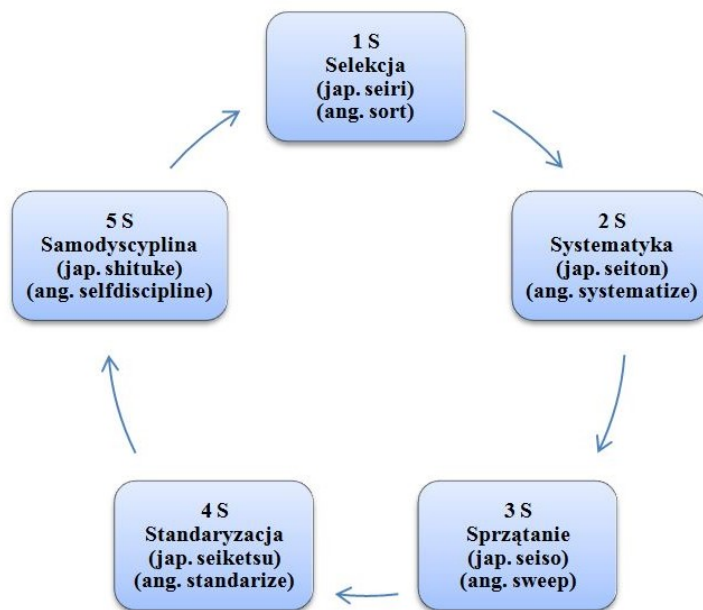
tw. zewnętrzne koszty awarii obejmują reklamacje, zwroty towarów czy skargi. Są one związane z wytworzeniem wyrobów złej jakości (niezgodnych) i niezadowoleniem po stronie klienta spowodowanym dostarczeniem wyrobów gotowych nieakceptowalnych jakościowo (Czerska 2014).

Dzięki wyeliminowaniu marnotrawstwa oraz innych składowych nieprzynoszących wartości dodanej możliwe jest uzyskanie lepszej jakości produkowanych towarów, skrócenie czasów wytwarzania czy minimalizacja kosztów produkcyjnych (Womack i in. 2008). Do osiągnięcia takich i innych efektów wykorzystuje się techniki i narzędzia Lean Manufacturing m.in.: 5S, VSM (ang. Value Stream Mapping – Mapowanie Strumienia Wartości), SMED (ang. Single Minute Exchange of Die), TPM (ang. Total Productive Maintenance), Poka-Yoke (system zapobiegania popełnianiu błędów), Kaizen, Kanban, JiT (ang. Just-in-Time) (Bell 2006).

Maszyny w przedsiębiorstwach produkcyjnych przygotowywane są do zmiany roboczej poprzez przezbieranie (czyli zmianę elementu/podzespołów maszyny w celu wyprodukowania różnorodnych produktów), mycie wodą, czyszczenie odpowiednimi środkami, sprzątanie na stanowiskach itd. (Harris i in. 2003). W zakładach przetwórstwa spożywczego produkujących produkty sypkie takie jak: kasze, mąki, wyroby ekstrudowane w postaci np. płatków śniadaniowych czy makaronów, znaczną ilość czasu produkcyjnego przeznaczają się na częste sprzątanie ze względu na możliwość szybkiego zapylenia oraz samozapłonu. W przypadku takich przedsiębiorstw procesy sprzątania wykonuje się kilkakrotnie w ciągu zmiany roboczej. W przypadku przedsiębiorstw branży spożywczej dużo uwagi poświęca się także na procesy dezynfekcji (Tulska 2016)

## **2. Materiał i Metody**

Narzędzie 5S (Rys.1) jest jednym z podstawowych i powszechnie stosowanych narzędzi wykorzystywanych do wizualnego utrzymania porządku na stanowisku pracy. Jest to narzędzie, z którego korzystamy mniej lub bardziej świadomie w wielu dziedzinach życia codziennego. 5 S wywodzi się od pierwszych liter pięciu japońskich słów: seiri, seiton, seiso, seiketsu, shitsuke, które w tłumaczeniu na język polski oznaczają odpowiednio: selekcję, systematykę, sprzątanie, standaryzację, samodyscyplinę. Rozwinięcie skrótu nazwy narzędzia 5S po angielsku to ciąg następujących słów: sort, systematize, sweep, standarize, self-discipline (Czerska 2014).



Rys. 1. Pięć filarów narzędzia 5S (opracowanie własne na podstawie Mak 1995)

Selekcja (1 S) to proces polegający na zbiorze informacji odnośnie potrzebnych i zbędnych przedmiotów na stanowisku pracy. Pozwala to ocenić i wyeliminować m.in. zbędny ruch pracowników po hali produkcyjnej (do i ze stanowiska pracy), błędy jakościowe (wynikające z używania nieodpowiednich narzędzi), czy przestojów produkcyjnych (wynikających ze złego montażu czy demontażu części maszyny). W literaturze fachowej określa się ten etap (1S) jako kluczowy, ponieważ jego rezultaty mogą bezpośrednio wpływać na jakość i efektywność danego stanowiska pracy (Antosz i in. 2013).

Kolejnym filarem jest systematyka (2 S). Proces ten polega na odpowiednim rozmieszczeniu narzędzi i przyrządów na stanowisku pracy, tak aby każde z nich posiadało stałe miejsce. Narzędzia najczęściej stosowane powinny znajdować się jak najbliżej, w łatwo dostępnym miejscu, Najmniej stosowane przyrządy powinny znajdować się dalej, gdyż są używane relatywnie rzadko. Na tym etapie wprowadzania usprawnień praktycznego i bezpiecznego stanowiska pracy powinno się wprowadzać matryce umożliwiające zapobieganiu błędów np. tzw. tablice cieni (Łopatomska 2002).

Sprzątanie (3 S) to etap, w którym powinno się zorganizować stanowisko pracy w taki sposób, aby zminimalizować czas niezbędny na sprzątanie. Zorganizowanie stanowiska to czyszczenie, odkurzanie, zmiatanie i usuwanie wszelkich odpadów produkcyjnych regularnie, najlepiej na bieżąco. Systematyczne sprzątanie umożliwia zachowanie czystości i bezawaryjności, ułatwia dostrzeżenie drobnych uszkodzeń czy braków.

Czwarta faza - standaryzacja (4 S) to opracowanie stałych procedur pozwalających na utrzymanie i ciągle rozwijanie wcześniej osiągniętych faz. Standaryzacja obejmuje

wprowadzanie kart kontroli, które kształtują nowe, poprawne przyzwyczajenia pracowników na stanowisku pracy. Standaryzacja ma na celu unikanie błędów i pomyłek wynikających np. ze znużenia pracowników pod koniec zmiany roboczej (Pawlak 2002).

Ostatnia faza – samodyscyplina (5 S) to dążenie do utrzymania efektów wprowadzania czterech poprzednich faz (etapów) i nieustannego doskonalenia warunków pracy przez wszystkich pracowników na każdym szczeblu. Istotną rolę we wdrażaniu praktyk Lean Manufacturing odgrywa osoba nadzorująca (na szczeblu kierowniczym) wdrażanie technik i narzędzi optymalizacyjnych. To kierownik bądź lider powinien przejawiać prawdziwe zaangażowanie i chęć współpracy w ich stosowaniu, ponieważ wykazano, że jest on „motorem napędowym” dla personelu dostępnego na hali produkcyjnej ze względu na znajdowanie się pod bardzo wnikliwą obserwacją wszystkich pracowników (Czerska 2014).

Kolejnym istotnym narzędziem LM jest Poka-Yoke. Najczęściej tłumaczone, jako procedura zapobiegania powstawaniu błędów podczas realizacji określonych zadań. Głównym celem wdrażania tego narzędzia jest możliwość eliminacji błędów w sposób niepowodujący zatrzymania linii produkcyjnej. Poka-Yoke umożliwia niewykwalifikowanym pracownikom wykonanie odpowiedniej czynności zamiast popełniania pomyłek, które mogłyby skutkować zatrzymaniem ciągu operacji technologicznych powstawania wyrobu gotowego [Borcz 2002]. Praktyczne zastosowanie narzędzi Poka-Yoke można zaobserwować poprzez np. stosowanie oznaczonych kolorem miejsc składowania części zamiennych najczęściej stosowanych przy konkretnych wyrobach, opisywanie elementów konstrukcyjnych i szczegółowe instrukcje postępowania, opisywanie włączników i wyłączników, czy w samych maszynach, jako wykrywacze metalu w produktach spożywczych czy optycznych czujnikach na liniach identyfikujących błędnie wytworzone produkty (Dudek-Burlikowska i in. 2009).

Warto również zwrócić uwagę na karty kontrolne. Są one powszechnie stosowane w przedsiębiorstwach produkcyjnych wszystkich gałęzi przemysłu. Nazywane są kartami statystycznego sterowania procesami i uznawane za podstawowe narzędzia SPC (Statistical Process Control- SPC). Są to graficzne wizualizacje położenia danej cechy lub miary produkowanego wyrobu gotowego oraz rozrzutu procesu. Ośią rzędnych na kartach kontrolnych są przeważnie numery badanych prób produktów, czasy pobierania prób czy też numer partii. Na osi odciętych umieszczane są wartości pomiarowe, wartości średnie oraz wskaźniki statystyczne takie jak mediana czy rozstęp. Wyniki kształtują się na wykresie w kształt tzw. „piły” (Hamrol i in. 2006). Bardzo interesującym wdrożeniem kart kontrolnych jest przypadek fabryki produkcyjnej silników Forda. W przeszłości produkcja tych

elementów, które potem składano w silniki, odbywała się w dwóch miejscach: Stanach Zjednoczonych oraz Japonii. Procesy produkcyjne były identyczne, części do podzespołów takie same, jednak silniki produkowane w Stanach Zjednoczonych wykazywały większą liczbę zwrotów i reklamacji. Po zbadaniu procesów i porównaniu ich okazało się, że pracownicy w Stanach Zjednoczonych skupiali się na pozostaniu w akceptowalnych granicach jakościowych procesu, natomiast w Japonii pracownicy produkowali silniki zbliżone do wartości centralnej, środkowej. Pokazuje to dwa podejścia, do jakości- jakość akceptowalną w ściśle wyznaczonym zakresie oraz jakość najwyższą, jaką można osiągnąć (Womack i in. 2008).

### **3. Wyniki i dyskusja**

W badanym przedsiębiorstwie należącym do sektora rolno-spożywczego znaczną część czasu produkcyjnego poświęcano na mycie i wysuszanie głowic do ekstruderów oraz procesy sprzątania. Były to procesy niedodające wartości wyrobu gotowego, jakim były płatki śniadaniowe, dlatego skupiono się na nich w pierwszej kolejności i podjęto próbę skrócenia czasu całkowitego tych procesów.

Płatki śniadaniowe w badanym studium przypadku powstawały w procesie ekstruzji. Wykorzystywana w tym procesie maszyna to ekstruder. Służy do termoplastycznej obróbki materiału zasypowego z dodatkiem wody przy odpowiednio ustawionych parametrach, jakimi są: wysoka temperatura i wysokie ciśnienie (Zasadzień, Skotnicka-Zasadzień 2013). Głowice w ekstruderze (oraz umieszczone w nich matryce) nadają końcowy kształt produktów śniadaniowych, dlatego są jednym z najistotniejszych elementów ze strony technologicznej (Tulska 2016).

Skupiono się na analizie problemu jakim było wydłużone mycie głowic. Stwierdzono, że pozostawienie głowicy po demontażu w miejscu składowania generuje marnotrawstwo czasu. Wprowadzono zasadę mycia głowic ekstruderów zaraz po demontażu, by nie dopuścić do zaschnięcia resztek produktów skrobiowych, które były bardzo trudne do usunięcia. Okresowe kontrole kierowników i karty mycia głowic umożliwiły znaczne zmniejszenie czasu przygotowania ich do ponownego montażu na ekstruderze do minimum. Przykład karty mycia głowicy przedstawiono poniżej (Rys. 2).

Karta mycia głowicy			
<b>Data:</b>	<b>Godzina:</b>	<b>Oznakowanie produktu końcowego (do którego używana była głowica):</b>	
<b>Aktualny kierownik zmiany:</b>	<b>Osoba odpowiedzialna za mycie głowicy i pozostawienie w wyznaczonym miejscu składowania:</b>	<b>Czy wykonano smarowanie (zaznaczyć):</b>	
		TAK	NIE

Rys. 2. Karta mycia głowicy (opracowanie na podstawie badań własnych)

Kolejnym problemem były procesy sprzątanía. Ze względu na częste zmiany produkowanych wyrobów po każdej zakończonej serii produkcyjnej pracownicy zobligowani byli do posprzątanía danej linii produkcyjnej. Na początku używano w tym celu szczotek i szufelek, jednak po naradach z pracownikami zaproponowano zakup odkurzaczy, które zminimalizowały czas sprzątanía z 45 do 20 minut. Poniżej przedstawiono przykładowy odkurzacz przemysłowy (Rys.3).



Rys. 3. Przykładowy odkurzacz przemysłowy EUROM 3080 (źródło: www.kt-24.eu)

Problematyczne okazało się utrzymanie porządku w miejscu składowania narzędzi operatorów wykonujących drobne naprawy oraz pracowników działu utrzymania ruchu<sup>1</sup>. Narzędzia i części nie posiadały swojego stałego miejsca, a ich znalezienie w momencie naprawy znacznie wydłużało czas pracy. Zabiegiem koniecznym było wykonanie tablic cieni dla operatorów wykonujących drobne naprawy oraz stanowiskach działu utrzymania ruchu. Przykładową tablicę cieni przedstawiono poniżej (Rys.4).

<sup>1</sup> Dział utrzymania ruchu to zespół pracowników odpowiedzialnych za zapewnienie ciągłej dostępności infrastruktury technicznej danego przedsiębiorstwa produkcyjnego oraz utrzymanie prawidłowej eksploatacji tych maszyn i urządzeń.



Rys. 4. Przykładowa tablica cieni. Źródło: <http://karbonit.pl>

Podążając drogą stałych miejsc składowania wyznaczono w badanym zakładzie miejsca stałego składowania odpadów nieprodukcyjnych i produkcyjnych (mokry i suchy). Stworzono oddzielne pojemniki i opisano je odpowiednimi nazwami. Stworzono również miejsca składowania palet do układania wyrobu gotowego.

#### 4. Wnioski

Zastosowanie narzędzi 5 S i Poka-Yoke znacznie usprawniło pracę w danym zakładzie przetwórstwa rolno-spożywczego. Zastosowanie kart mycia głowicy umożliwiło zniwelowanie przestojów produkcyjnych spowodowanych utrudnionym myciem głowic z zaschniętym produktem końcowym. Rozpoczęcie kontroli smarowania głowic np. olejem roślinnym umożliwiło znaczne przedłużenie ich żywotności. Wyeliminowano częściowe marnotrawstwo czasu przebrożeń (zmiany elementów maszyn – głowic) oraz nakładów finansowych ponoszonych przez zakład na zakup nowych głowic. Dzięki wprowadzonym zmianom w przypadku procesów sprzątania na linii produkcyjnej po tzw. przejściu na inny wyrób skrócił się czas sprzątania o 25 min (z 45 do 20 minut). Wymagało to od przedsiębiorstwa produkcyjnego niewielkich nakładów finansowych na zakup odkurzaczy, które usprawniły proces. Problemem we wdrażaniu tego rozwiązania było przyzwyczajenie pracowników do poprzednich zasad sprzątania narzędziami ręcznymi (szczotka) i niechęć do nowych urządzeń (odkurzacze). Reakcje pracowników zmieniły się w momencie zauważalnego skrócenia czasu wykonywanych czynności. Wykonane tablice cieni zmniejszyły czas poszukiwania odpowiedniego narzędzia lub części przez operatorów maszyn wykonujących drobne naprawy. Było to bardzo istotne w momencie awarii, gdy przybycie pracowników działu utrzymania ruchu było niemożliwe lub wymagało przestoju, a naprawa usterki była możliwa z panelu operatora maszyny. Koncepcja Lean Manufacturing odnosi się

przychylnie do napraw wykonywanych przez operatorów maszyn, ponieważ to operatorzy pracują przy niej najdłużej i posiadają dużą wiedzę na ten temat. Dzięki wprowadzeniu segregacji odpadów produkcyjnych na suche i mokre udało się zaoszczędzić czas wysuszania odpadów, które trafiały do przedsiębiorstw je przetwarzających. Dzięki wprowadzeniu rozwiązania podzielenia na odpady produkcyjne i nieprodukcyjne część odpadów można było ponownie wykorzystać na drodze recyklingu przez firmę zewnętrzną. Wyznaczenie dróg manipulacyjnych pracowników i wózków paletowych podniósł komfort i bezpieczeństwo pracy. Wprowadzenie krzyża bezpieczeństwa i wywieszenie go w widocznym miejscu na hali produkcyjnej pozwolił zaangażować się wszystkim pracownikom w misję bezpieczeństwa w swoim miejscu pracy.

## **5. Literatura**

Antosz K., Pacana A., Stadnicka D., Zielecki W. 2013. Narzędzia Lean Manufacturing. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów.

Bell S. 2006. Lean Enterprise Systems: Using IT for Continuous Improvement. John Wiley & Sons. Hoboken. New Jersey.

Borc A. 2002. Technika poka-yoke narzędziem zapobiegania błędom w procesach. Problemy Jakości. Nr 4.

Czerska J. 2014. Podstawowe narzędzia Lean Manufacturing. Wydawnictwo LeanQ team. Gdańsk.

Dudek-Burlikowska M., Szewieczek D. 2009. The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 36(1): 96-102.

Hamrol A., Kujawińska A. 2006. Nowa metoda analizy kart kontrolnych procesu. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 26(2), 149-158.

Harris, R., Harris, C., & Wilson, E. (2003). Making materials flow: a lean material-handling guide for operations, production-control, and engineering professionals. Lean Enterprise Institute.

Kłós M. 2010. Outsourcing w polskich przedsiębiorstwach. Wydawnictwo Fachowe. Warszawa.

Łopatowska J. 2002. Metoda 5S jako narzędzie modelowania procesów na stanowisku pracy. Inżynieria systemów zarządzania pod red. Zawadzkiej L. Gdańsk.

Pawlak W. R. 2002. Praktyki 5S w przedsiębiorstwach i instytucjach, czyli dbałość o porządek i skrzętne gospodarowanie. Warszawa.



Tulska E. 2016. Wpływ wdrożenia narzędzi Lean Manufacturing na dociążenie linii produkcyjnej – studium przypadku. Warszawa. Praca magisterska.

Womack J.P., Jones D.T. 2001. Odchudzanie firm. Eliminacja marnotrawstwa - kluczem do sukcesu. Centrum Informacji Menedżera. Warszawa.

Womack J.P., Jones D.T. 2008. Lean Thinking- szczupłe myślenie. Wydawnictwo ProdPress.com. Wrocław.

Zasadzień M., Skotnicka-Zasadzień B. 2013. Zastosowanie miar niezawodności do analizy awaryjności kluczowych maszyn w przedsiębiorstwie produkcyjnym – studium przypadku. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji.

# Koncepcja, projekt i badanie zasadności implementacji narzędzia komputerowego do wspomagania procesu edukacji muzycznej

Maciej Walczyński <sup>(1)</sup>, Anna Minkus <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Katedra Akustyki i Multimediów, Politechnika Wroclawska  
Maciej Walczyński: maciej.walczynski@pwr.edu.pl

## Streszczenie

Edukacja muzyka orkiestrowego to niezwykle długi i skomplikowany proces, który rozpoczyna się w pierwszej klasie szkoły podstawowej, a w niektórych przypadkach nawet wcześniej. Szczególnie w początkowym okresie nauki możliwe jest powstawanie złych nawyków, które utrwalane podczas samodzielnego ćwiczenia utrudniają i spowalniają rozwój muzyczny. W pracy przedstawiono koncepcję, projekt funkcjonalny oraz szczegóły implementacyjne wybranych modułów aplikacji komputerowej wspomagającej proces edukacji muzycznej instrumentalistów i wokalistów. Zaprezentowano i skomentowano analizę widmową części ustalonej dźwięków instrumentów muzycznych należących do grup chordofonów, aerofonów wykazując różnice pomiędzy poszczególnymi instrumentami. Przeanalizowano możliwość zastosowania autorskiej aplikacji komputerowej w procesie kształcenia muzyków instrumentalistów szczególnie w zakresie edukacji na poziomie podstawowym wykazując możliwość automatyzacji niektórych elementów procesu ćwiczenia.

**Słowa kluczowe:** cyfrowe przetwarzanie sygnałów akustycznych, edukacja muzyczna, algorytmika

## Concept, design and initial implementation of a computer application to support the music education process

### Summary

Education of classical musician is a nextremely long and complicated process that begins in the first grade of primary school, and in some cases even earlier. Especially in the initial period of learning, it is possible to create bad habits that are hindered by musical development which are perpetuated during an independent exercise. The work presents the concept, functional design and implementation details of selected computer application modules supporting the musical education process of instrumentalists and vocalists. Spectral analysis of a part of the established sounds of musical instruments belonging to the groups of chordophones, aerophones showing and differences between particular instruments was presented and commented on. The possibility of using a proprietary computer application in the process of teaching musicians of instrumentalists, especially in the field of education at the basic level, has been analyzed, showing the possibility of automating some elements of the exercise process.

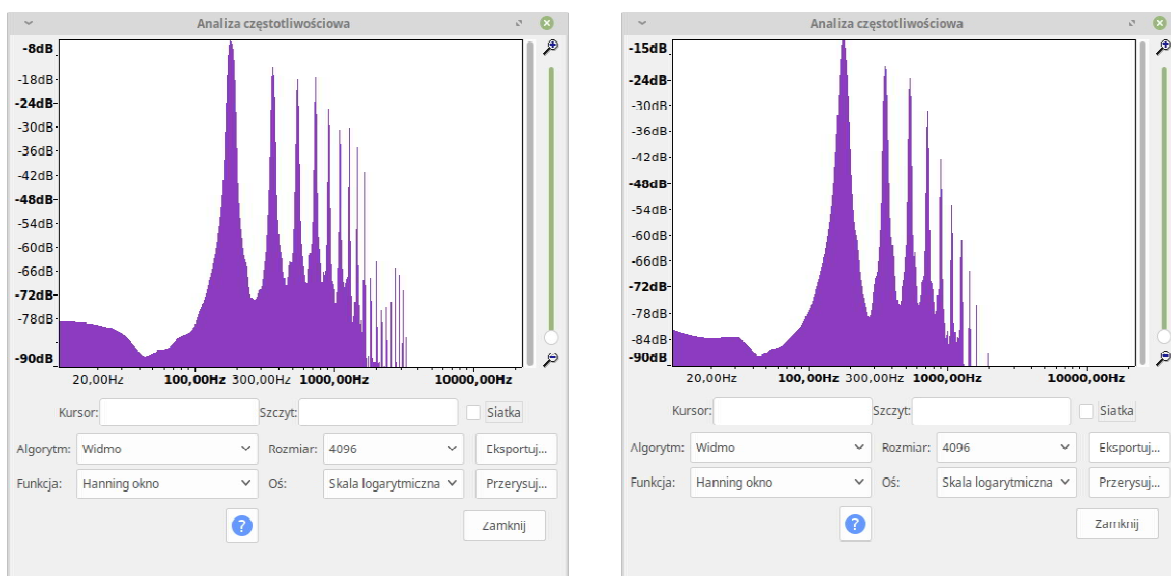
**Keywords:** digital signal processing, musical education, algorithms

### 1. Wstęp

Proces edukacji muzycznej jest długi i niezwykle skomplikowany. Wykształcenie muzyka orkiestrowego to zwykle 17 lat. Czas ten obejmuje edukację podstawową, ponadpodstawową i studia wyższe. W tym czasie adept sztuki muzycznej rozwija swe umiejętności pod okiem pedagoga prowadzącego go w zakresie gry na instrumencie głównym. Ponadto kształcenie muzyka jest uzupełniane o elementy podstaw harmonii, kształcenia słuchu, historii muzyki, gry w zespołach kameralnych i orkiestrowych oraz gry na instrumencie dodatkowym. Edukacja w zakresie gry na instrumencie wiodącym obejmuje indywidualne lekcje z pedagogiem. Praca ta realizowana jest w formie dwóch 45 minutowych lekcji w tygodniu. W międzyczasie uczeń utrwala materiał sam. Szczególnie w początkowym

okresie kształcenia obejmującym pierwsze klasy szkoły podstawowej możliwe jest popelnianie przez ucznia - wobec nie w pełni wykształconego jeszcze zmysłu muzycznego - licznych błędów. Błędy te - powtarzane w wielogodzinnym procesie ćwiczenia gry na instrumencie pomiędzy lekcjami z nauczycielem - mogą powodować powstawanie złych nawyków, które później ciężko wykorzenić. Z tego powodu autorzy postanowili przeanalizować możliwość i zasadność stworzenia aplikacji wspomagającej proces kształcenia muzyka.

W pracy położono szczególną wagę na zbadanie barwy dźwięku instrumentów należących do grup chordofonów smyczkowych i aerofonów. Wynika to z faktu, że w przypadku instrumentów należących do tych właśnie grup rola muzyka w procesie kształtowania barwy dźwięku jest szczególnie znacząca. Wydobycie dźwięku o poprawnych walorach brzmieniowych na chordofonie smyczkowym lub aerofonie (czy to drewnianym, czy blaszanym) jest o wiele trudniejsze na niż np. na fortepianie. W pierwszym przypadku nawet niewprawne ucho wychwyci dużą różnicę w barwie pomiędzy dźwiękami wykonywanymi przez muzyka z wieloletnim doświadczeniem, jak i początkującego muzyka. Natomiast w przypadku np. fortepianu różnica ta - choć obecna - nie będzie tak drastyczna.



Rys.1. Widma dźwięku f wykonywanego na tym samym puźonie (po lewej) przez profesjonalistę i (po prawej) przez muzyka amatora

Na rysunku 1 przedstawiono wykres widma części ustalonej dźwięku f (w oktawie małej) wykonywanego na (tym samym) puźonie przez zawodowego muzyka i muzyka amatora. W obu przypadkach (tj. dla dźwięku wykonywanego przez profesjonalnego muzyka, jak i amatora) maksymalny poziom ma pierwsza składowa harmoniczna. Również w przypadku drugiej składowej widma są zbliżone. Kolejne trzy składowe, to już obszar

znaczących różnic. W przypadku muzyka profesjonalnego składowa 3., 4. i 5. mają porównywalne poziomy, (przy czym zauważyć należy, że nieznacznie wyższy od pozostałych poziom posiada 5. Składowa). Dla dźwięku wykonanego przez muzyka amatora zaobserwować można znaczący spadek poziomu kolejnych składowych). Również dla wyższych częstotliwości można zaobserwować duże różnice. Porównując te dwa wykresy widmowe można dostrzec znaczącą różnicę w zakresie wyższych składowych harmonicznym. Dźwięk wykonany przez profesjonalnego muzyka obfituje w harmoniczne wyższych rzędów, natomiast dźwięk muzyka amatora jest ubogi w zakresie harmonicznym wyższych rzędów. Aby porównać widmo części ustalonej obu dźwięków obliczono współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy widmami części ustalonej. Wartość tego współczynnika dana jest wzorem:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

gdzie  $x_i$  oznacza poziom  $i$ -tej próbki pierwszego instrumentu,  $y_i$  jest poziomem  $i$ -tej próbki drugiego instrumentu,  $N$  liczbą próbek. Współczynnik korelacji pomiędzy dwoma dźwiękami  $f$  (w oktawie małej) wykonanymi przez profesjonalnego muzyka i amatora w tych samych warunkach akustycznych, na tym samym instrumencie wyniósł: 0,848.

W przypadku dźwięku  $a^1$  wykonywanego na tym samym fortepianie przez profesjonalistę oraz amatora nie dostrzeżono tak znacznych, jak w przypadku puzonu, różnic w widmie części ustalonej dźwięku. Współczynnik korelacji Pearsona był bardzo dla duży i wynosił 0,994.

Przykład chordofonów smyczkowych stanowią między innymi skrzypce, altówka, wiolonczela i kontrabas. Do grupy aerofonów (tj. instrumentów, w przypadku, których źródłem dźwięku są drgania słupa powietrza) zalicza się między innymi flet, klarnet, obój, fagot, trąbkę, puzon, waltornię. Wymienione tu instrumenty są zestawiane w orkiestrze symfonicznej w grupy (np. sekcja puzonów obejmująca najczęściej 3 instrumenty), przy czym dąży się do tego, aby instrumenty w obrębie grupy brzmiały możliwie podobnie.

Ćwiczenia – szczególnie w pierwszym okresie nauki gry na instrumencie muzycznym należącym do grupy chordofonów lub aerofonów – obejmują naukę gry długich dźwięków. Jest to ćwiczenie niezwykle ważne, pozwala, bowiem na wyrobienie umiejętności wydobywania szlachetnego dźwięku, o odpowiedniej barwie (Wick D, 1984).

Przystępując do realizacji aplikacji wspomagającej proces dydaktyczny gry na instrumentach muzycznych ograniczono zakres stosowalności tego narzędzia do badania widma części ustalonej dźwięku.

## 2. Analiza widmowa fazy ustalonej wybranych instrumentów

W tej części artykułu zostaną przedstawione badania dotyczące widma części ustalonej dźwięków różnych instrumentów należących do grup chordofonów i aerofonów. Porównane zostaną nagrania wykonane z wykorzystaniem profesjonalnego sprzętu w warunkach laboratoryjnych oraz te zarejestrowane z wykorzystaniem docelowego sprzętu, na którym ma działać aplikacja, tj. smartfonu.

### 2.1. Analiza widmowa dźwięku skrzypiec

Zastosowanie narzędzia do wspomaganie nauki gry na instrumencie muzycznym będzie zasadne tylko w przypadku, gdy widma części ustalonej dźwięków pochodzących z różnych instrumentów będą od siebie znacząco różne, a jednocześnie barwa dźwięku o tej samej wysokości wykonywanego, czy to chordofonie, czy aerofonie przez profesjonalistę i muzyka amatora będzie wystarczająco podobna. W celu zweryfikowania możliwości takiego podejścia przeprowadzono nagrania różnych instrumentów muzycznych oraz głosu wokalnego. Przeprowadzono je w warunkach naturalnych oraz laboratoryjnych. Praca programu ma z założenia odbywać się w warunkach naturalnych tj. w pomieszczeniu nie izolowanym akustycznie, z zakłóceniami w postaci szumów lub tła akustycznego wynikającego z miejsca w którym użytkownik się znajduje. Badania w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono dla analizy porównawczej. Wykonano je w komorze bezchowej używając mikrofonu RFT MK 102 z przedwzmacniaczem MKD MV101. Poniżej zostały przedstawione i omówione wykresy widma dla poszczególnych instrumentów.

Dźwięk muzyczny posiada następują fazy:

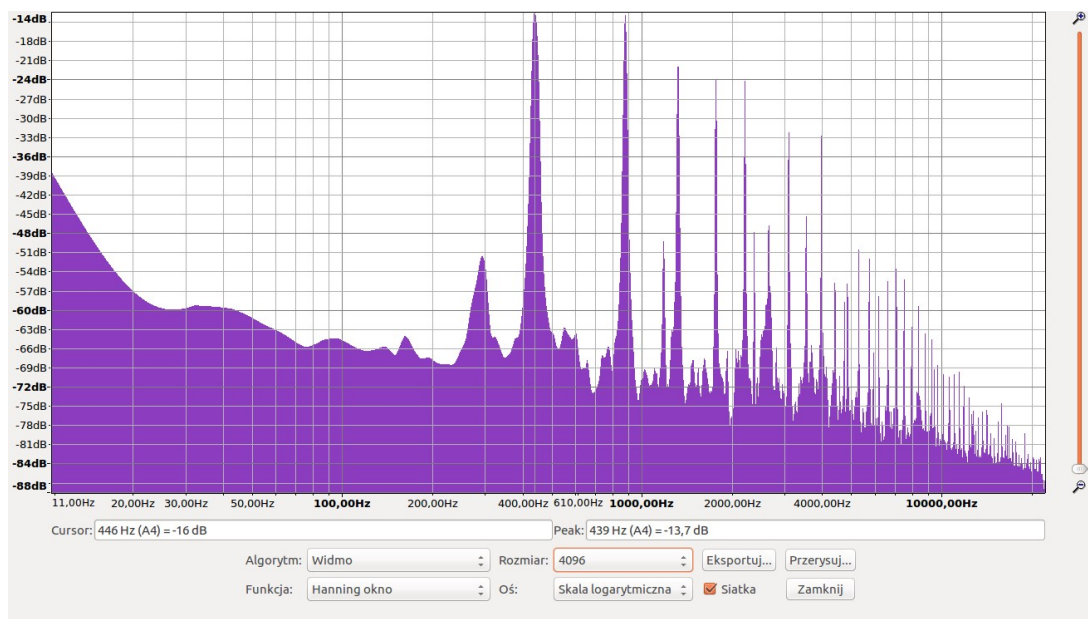
- fazę ataku (ang. *attack*),
- fazę podtrzymania (ang. *sustain*) – w tej fazie dźwięk jest stabilny i ma niezmienny charakter,
- fazę wybrzmiewania (ang. *release*) ustaloną oraz zanikania.

W badaniach uwzględniano tylko fazę podtrzymania ze względu na jej lokalnie stacjonarny charakter. Podczas fazy ataku oraz zaniku widmo zmienia się dynamicznie w czasie, co w przypadku niniejszej pracy jest przedmiotem badań.

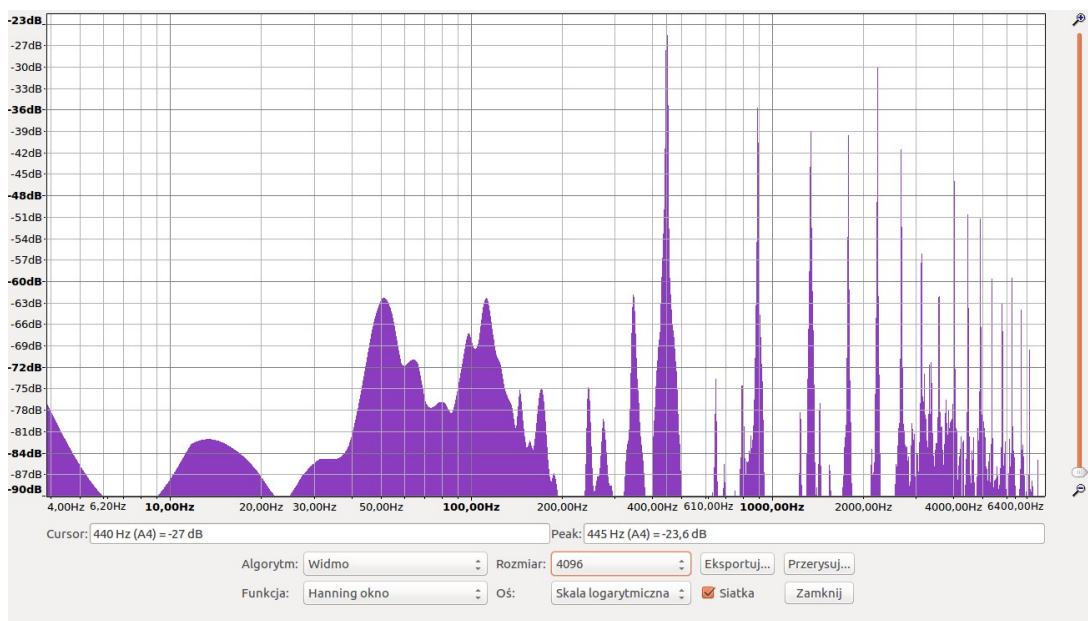
Docelowo program ma działać w warunkach naturalnych jednak badania przeprowadzono dla porównania również w laboratorium. Poniżej przedstawiono widmo skrzypiec badanych w warunkach laboratoryjnych.

Na Rys.2. znajduje się widmo części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup>wykonanego na skrzypcach. Maksymalny poziom sygnału przypada dla składowej częstotliwości 440Hz. Widmo posiada również pewne tło, którego poziom staje się coraz niższy wraz ze wzrostem wartości

częstotliwości. Ma to pewne odzwierciedlenie w subiektywnych odsłuchach dźwięku. Również barwa danego dźwięku posiada związek z zaobserwowaną obwiednią sygnału na tym wykresie. Na tym widmie przedstawiono dźwięk nagrany w komorze bezchowej. Przedstawiony powyżej wykres jest zgodny z literaturą (Kusiak, Perez). Pierwsza składowa harmoniczna jest najwyższa. Kolejne składowe harmoniczne pojawiają się zgodnie z odległościami w literaturze tj. drugi prążek jest w odstępnie oktawy (częstotliwość dwa razy większa), kolejny kwinty czystej, kwarty czystej itd. Poziomy kolejnych prążków są coraz niższe, co jest poprawne i pożądane, pozwala to na prostą detekcję wysokości dźwięku, jako częstości, dla której występuje najwyższy poziom.



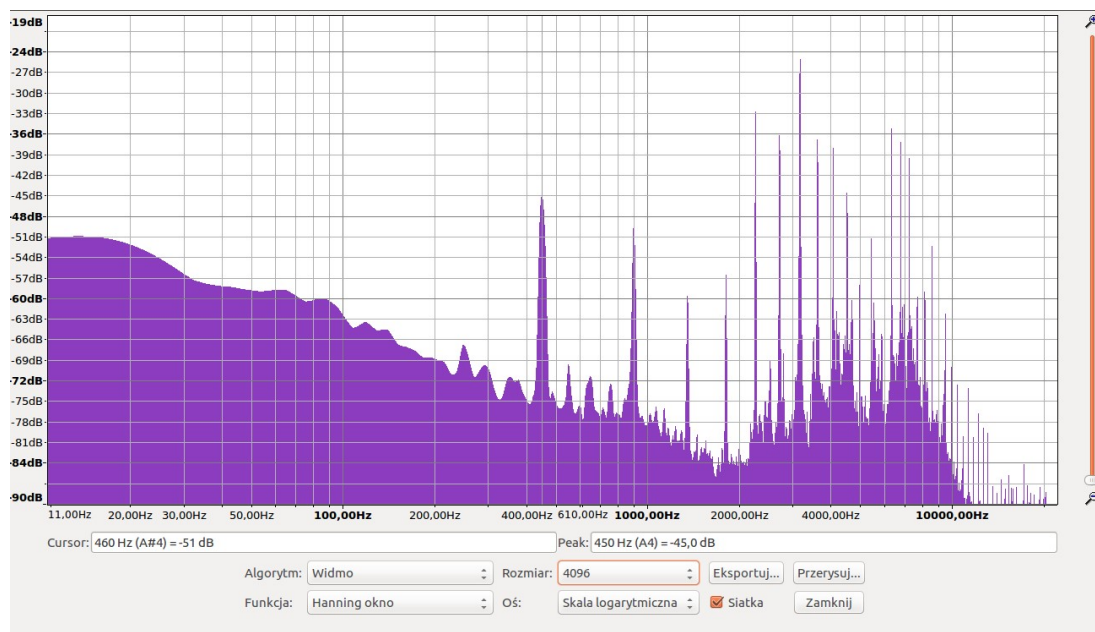
Rys.2. Analiza widmowa nagrania skrzypiec w warunkach laboratoryjnych



Rys.3. Analiza widmowa części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup> nagrania wykonanego na skrzypcach w warunkach nielaboratoryjnych

W tym przypadku próbka była pobrana z nagrania zupełnie innych skrzypiec oraz w warunkach naturalnych bez większych zakłóceń. Muzyk dobrze znał instrument, ponieważ grał na nim ponad 15 lat. Nagranie było wykonane za pomocą dyktafonu w telefonie. Wykres znacząco różni się od poprzedniego. Tło nie jest tak jednorodne jak we wcześniejszym przypadku. Do wartości 200 Hz zaobserwowano brak regularności. Natomiast detekcja przebiega w sposób poprawny. Prążek o najwyższym poziomie odpowiada częstotliwości około 445, przy czym należy zauważyć, że instrument przed nagraniem nie był dostrajany do częstotliwości 440Hz. Kolejna, tj. druga składowa - w przeciwieństwie do widma instrumentu nagrałego w warunkach laboratoryjnych – posiada w tym przypadku znacznie niższy poziom od tonu podstawowego. Kolejne składowe harmoniczne posiadają nieco niższe poziomy, co jest wspólną cechą z widmem części ustalonej dźwięku wykonanego w warunkach laboratoryjnych. Warto zauważyć znaczny poziom 5-tej składowej harmonicznej. Analiza obu sygnałów skrzypiec - jak i pozostałych instrumentów - została wykonana w programie Audacity z wykorzystaniem okna von Hann o długości 4096. Nie zaobserwowano większej różnicy wynikającej z charakterystyki akustycznej otoczenia. Warunki naturalne umożliwiają poprawną detekcję i sklasyfikowanie sygnału na potrzeby tworzonej aplikacji.

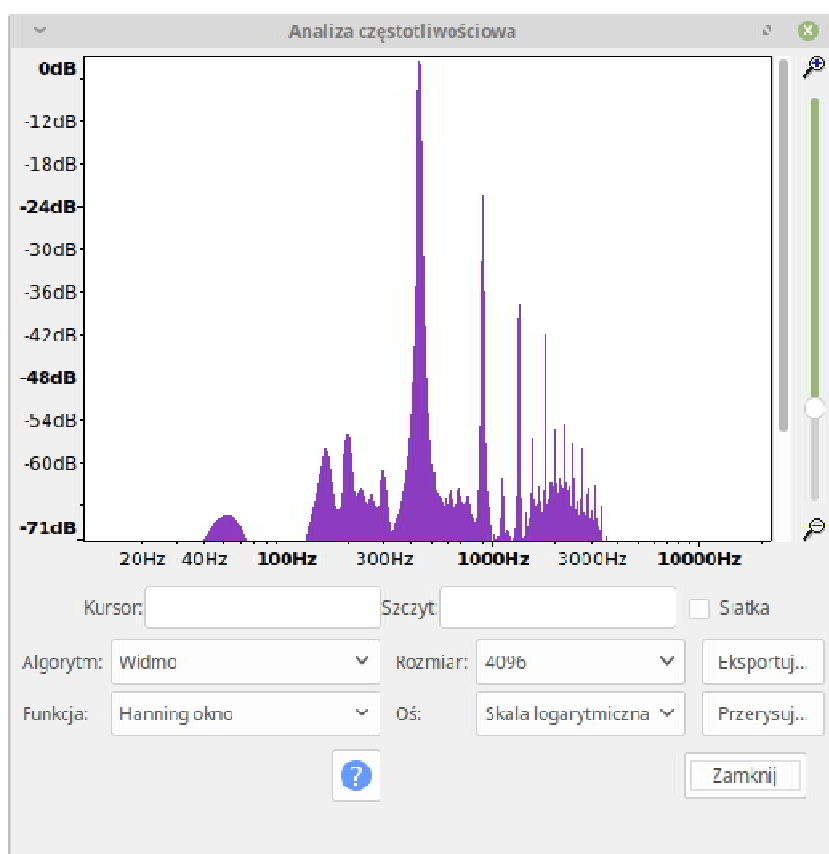
W celu zweryfikowania możliwości wykorzystania programu do wspomagania procesu nauki gry z wykorzystaniem instrumentu amplifikowanego elektrycznie autorzy wykonali w warunkach poza laboratoryjnych nagrania skrzypiec elektrycznych analiza widmowa części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup> wykonanego na takim instrumencie została pokazana na rysunku nr 4, a szersze jej omówienie znajduje się poniżej.



Rys. 4. Analiza widmowa części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup> nagrania wykonanego na skrzypcach elektrycznych w warunkach nielaboratoryjnych.

Na Rys.4. przedstawione jest widmo części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup>. Jest to sygnał pochodzący ze skrzypiec elektrycznych. Skrzypce te były amplifikowane za pomocą sprzętu firmy Kustom – model Sienna 35. Widmo do ok 1800 Hz przypomina widmo skrzypiec nagranych w laboratorium. Natomiast dla wyższych częstotliwości zaobserwowano wzrost poziomów. Taka, znacząca różnica w widmie pomiędzy skrzypcami elektrycznymi, a instrumentem lutniczym występuje dla wszystkich dźwięków ze skali skrzypiec. W niniejszym artykule przedstawione są przykładowe widma dźwięku „a” razkreślonego. Odsłuchy próbek potwierdzały subiektywne różnice w barwie pomiędzy skrzypcami amplifikowanymi elektrycznie, a instrumentami akustycznymi. Wydaje się, iż różnica w widmie części ustalonej dźwięku może mieć podłoże w zastosowanym sprzęcie wzmacniającym sygnał skrzypiec elektrycznych. Występująca różnica pomiędzy widmami dźwięków wykonywanych na skrzypcach elektrycznych i akustycznych powoduje, że niemożliwe będzie bezpośrednie porównywanie dźwięków obu typów skrzypiec.

## 2.2. Analiza widmowa dźwięku saksofonu altowego

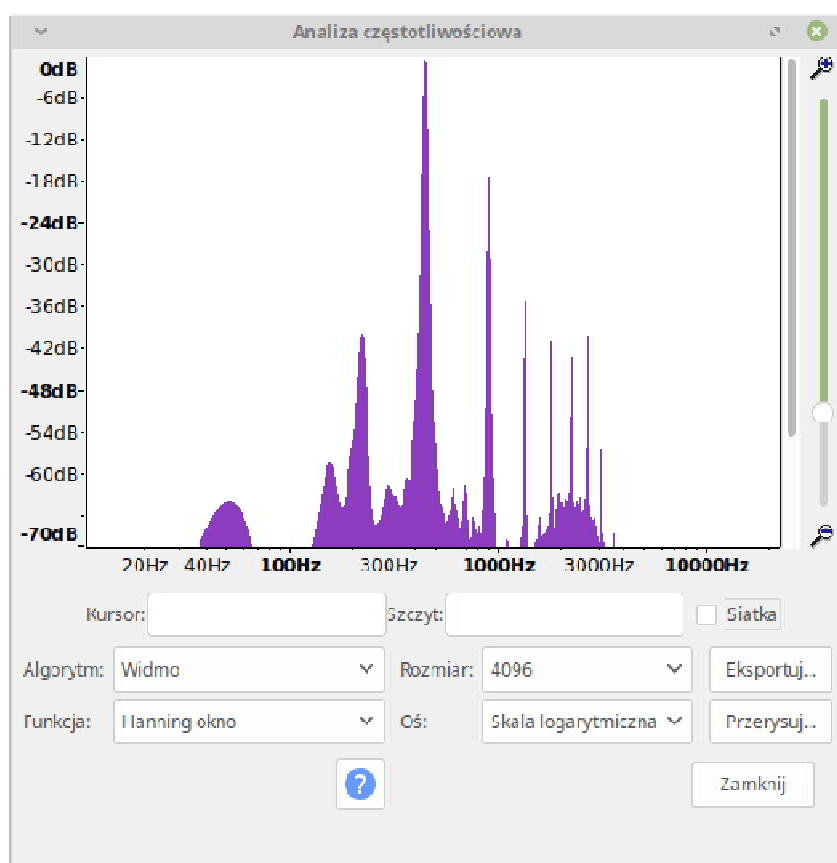


Rys. 4. Analiza widmowa części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup> wykonanego na saksofonie altowym w warunkach nielaboratoryjnych

Na rysunku nr 4 przedstawione zostało widmo części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup>. Akwizycji tego dźwięku (jak i dźwięków kolejnych instrumentów opisywanych w dalszej części artykułu)



dokonano z wykorzystaniem mikrofonu wbudowanego w telefon. Wykorzystano tu celowo nie profesjonalny sprzęt nagraniowy, lecz smartfon ze względu na fakt, że aplikacja ma być ogólnodostępna i nie ma wymagać do poprawnego działania sprzętu wysokiej klasy. Jedynym wymaganiem technicznym powinno być nagrywanie dźwięku w polu bliskim. Wracając do analizy widmowej, to podobnie jak w przypadku puzonu i skrzypiec, również dla fazy ustalonej dźwięku wykonywanego na saksofonie altowym pierwsza harmoniczna ma najwyższy poziom, który – w tym przypadku - wynosi  $-3,6\text{dB}$ . Druga składowa osiąga poziom  $-22,5\text{dB}$ . Trzecia składowa poziom około  $-30,8\text{ dB}$ , natomiast kolejne odpowiednio:  $-38,1\text{dB}$ ;  $-37,7\text{dB}$ ;  $-50,7\text{dB}$  i  $-61,6\text{dB}$ . Zauważyć można znaczną różnicę w poziomie pomiędzy pierwszą składową, a kolejnymi. Dla porównania na rysunku nr 5 przedstawione zostało widmo części ustalonej dźwięku innego saksofonu altowego. Na instrumencie grał również inny muzyk. Pozostałe czynniki (jak pomieszczenie, mikrofon i odległość od niego) pozostały niezmiennic.



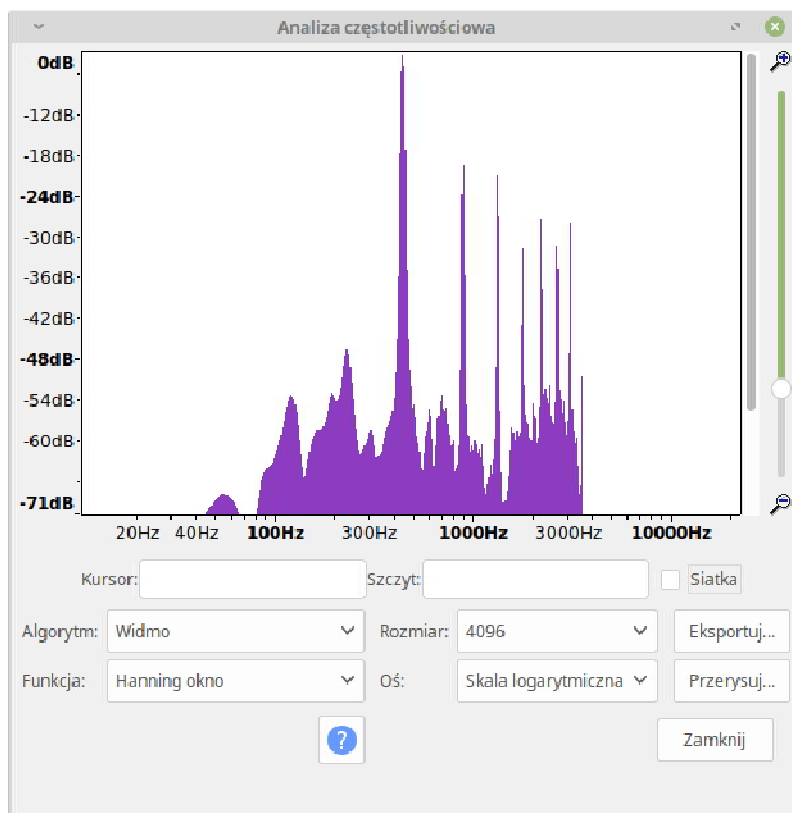
Rys. 5. Analiza widmowa części ustalonej dźwięku a<sup>1</sup>wykonanego na saksofonie altowym w warunkach nielaboratoryjnych.

Podobnie jak w przypadku poprzedniego saksofonu altowego, tak i tutaj widmo fazy ustalonej ukazuje najwyższy poziom pierwszej składowej (wynoszący  $-0,7\text{ dB}$ ). Kolejne składowe mają poziomy  $-16,5$ ,  $-31,1$ ,  $-35,8$ ,  $-30,1$ ,  $-29,3$ ,  $-59,4\text{ dB}$ . Korelacja pomiędzy widmami dźwięków wykonanych na obu saksofonach wynosi  $0,943$ , co jest wartością bardzo dużą. Należy tutaj

zaznaczyć, że obaj muzycy prezentowali zbliżony poziom wykonawczy, a instrumenty były podobnej klasy.

### 2.3. Analiza widmowa dźwięku saksofonu tenorowego

Podobnie jak saksofon altowy, tak i omawiany w niniejszym podrozdziale instrument – czyli saksofon tenorowy – należą do tej samej rodziny aerofonów drewnianych, których konstrukcję przedstawił w pierwszej połowie XIX wieku Adolph Sax (Gäbel, 2008; Kientzy, 1998; Pituch, 2013). Z racji zbliżonej budowy instrumentu należało się spodziewać podobnego widma części ustalonej. Podobnie jak w przypadku saksofonu altowego dokonano analizy dźwięków wykonywanych przez różnych muzyków na dwóch różnych instrumentach. W istocie widma obu saksofonów były do siebie bardzo zbliżone, o czym świadczy wartość współczynnika korelacji wynosząca 0,920.

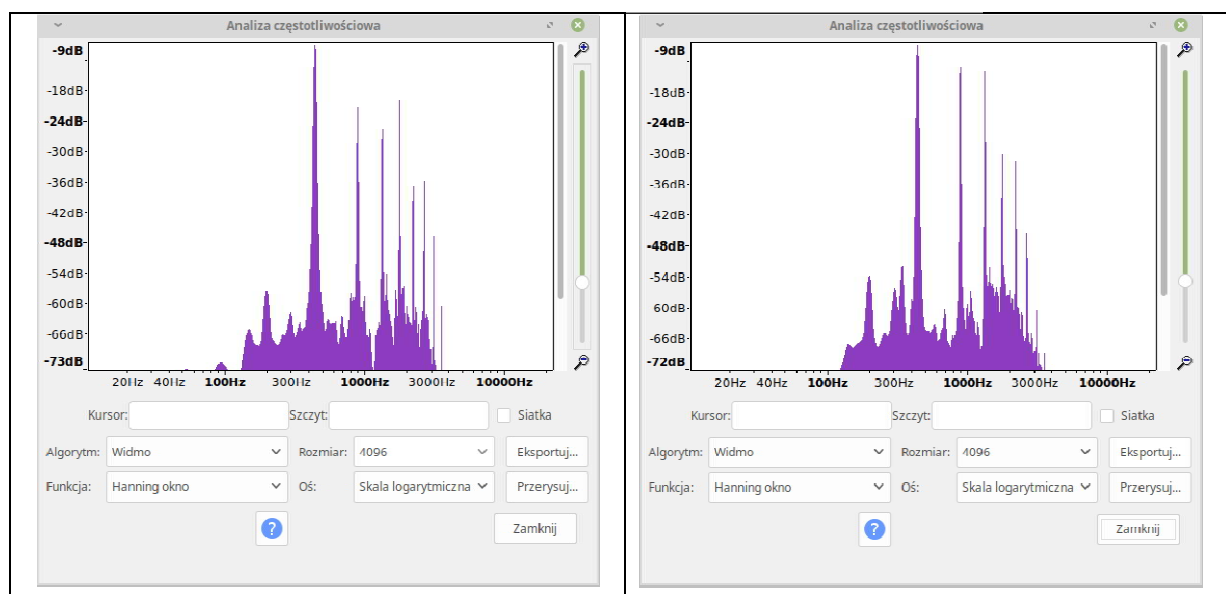


Rys. 6. Analiza widmowa części ustalonej dźwięku  $a^1$  wykonanego na saksofonie tenorowym w warunkach nielaboratoryjnych.

Na rysunku 6. Przedstawione zostało widmo części ustalonej dźwięku  $a^1$  wykonanego na saksofonie tenorowym. Podobnie jak w przypadku poprzednich instrumentów najwyższy (-3,4 dB) poziom posiadała pierwsza składowa harmoniczna. Druga i trzecia harmoniczna charakteryzowały się zbliżonym do siebie poziomem (-18,1 i -16,9 dB).

## 2.4. Analiza widmowa dźwięku trąbki

Trąbka jest instrumentem dętym blaszanym. Źródłem dźwięku są tu drgające wargi muzyka (Pawłowski, 1963). Na potrzeby niniejszej pracy przeprowadzono – w identycznych warunkach akustycznych – nagrania dźwięku  $a^1$  wykonanego przez dwóch różnych trębaczy na dwóch różnych trąbkach. Widmo dźwięku pierwszej z badanych trąbek przedstawione zostało po lewej stronie rysunku nr 7, natomiast widmo tego samego dźwięku wykonanego na drugim instrumencie po prawej stronie tego samego rysunku.



Rys. 7. Analiza widmowa części ustalonej dźwięku  $a^1$  wykonanego na trąbce w warunkach nielaboratoryjnych. W obu przypadkach pierwsza składowa najwyższy poziom. Kolejne składowe mają już nieco odmienną charakterystykę. Pomimo tego współczynnik korelacji pomiędzy widmami części ustalonych obu dźwięków wykonanych na trąbkach był wysoki i wynosił 0,93091931.

Korelację pomiędzy widmem części ustalonej dźwięków wykonywanych na omawianych instrumentach przedstawiono w tabeli 1:

Tabela 4: Współczynnik korelacji pomiędzy widmem części ustalonej dźwięku  $a^1$  dla różnych instrumentów

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
I1	1	0,943	0,860	0,779	0,875	0,871	0,742	0,726
I2	0,943	1	0,905	0,831	0,918	0,864	0,787	0,750
I3	0,860	0,905	1	0,920	0,912	0,868	0,825	0,845
I4	0,779	0,831	0,920	1	0,886	0,830	0,749	0,733
I5	0,875	0,918	0,912	0,886	1	0,931	0,772	0,751
I6	0,871	0,864	0,868	0,830	0,931	1	0,808	0,787
I7	0,742	0,787	0,825	0,749	0,772	0,808	1	0,936
I8	0,726	0,750	0,845	0,733	0,751	0,787	0,936	1

gdzie zastosowano następujące oznaczenia I1 – pierwszy saksofon altowy, I2 – drugi saksofon altowy, I3 – pierwszy saksofon tenorowy, I4 – drugi saksofon tenorowy, I5 – pierwsza trąbka, I6 – druga trąbka, I7 – pierwsze skrzypce, I8 – drugie skrzypce.

Zauważyć można, że korelacja pomiędzy widmami części ustalonej dźwięków wykonywanych na instrumentach tego samego typu jest większa niż w przypadku instrumentów różnego typu. Pozwala to na rozważenie implementacji automatycznej detekcji instrumentu.

### **3. Konstrukcja algorytmu wspomagającego naukę gry na wybranych instrumentach muzycznych**

Działanie aplikacji można podzielić na kilka etapów. Pierwszy z nich stanowi akwizycja sygnału akustycznego. Na tym etapie sygnał jest detekowany z wykorzystaniem mikrofonu wbudowanego w urządzenie wspomagające proces dydaktyczny. Urządzeniem tym może być zarówno komputer osobisty klasy IBM PC, jak i laptop, tablet, czy smartfon. Przed pierwszym użyciem aplikacji w danym środowisku akustycznym wymagane jest ustawienie progu detekcji dźwięku. Wymagano zarejestrowania dwóch sygnałów: szumu tła i dźwięku. Wersja testowa aplikacji jest implementowana w języku *Python*. Jest to wieloplatformowy, interpretowany język skryptowy wysokiego poziomu o przejrzystej i nieskomplikowanej składni (Lutz, 2010; Beazley i inni, 2014). Kolejnym krokiem jest detekcja początku i końca dźwięku. Wykorzystane tutaj zostają informacje o poziomie tła i poziomie dźwięku uzyskane podczas kalibracji. Następny krok stanowi detekcja części ustalonej dźwięku. Ponieważ aplikacja będzie dedykowana do procesu ćwiczenia długich dźwięków, dlatego zdecydowano się na przyjęcie założenia, że część ustaloną dźwięku stanowi 60% długości sygnału. Przy czym eliminowane z analizy jest 20% początkowego dźwięku i 20% końcowej części. Następny krok stanowi wyznaczenie widma dźwięku z wykorzystaniem okna von Hanną i szybkiej transformacji Fouriera. Tak sparametryzowany sygnał porównywany zostaje z sygnałami wzorcowymi dla danego instrumentu. Wynik porównania zostaje wyświetlony na ekranie.

### **4. Podsumowanie**

W niniejszej pracy przedstawione zostały badania uzasadniające zasadność implementacji i wdrożenia aplikacji wspomagającej proces dydaktyki gry na wybranych instrumentach orkiestrowych. Uzyskane wyniki w zakresie analizy widmowej części ustalonej dźwięków wybranych instrumentów orkiestrowych potwierdzają możliwość zastosowania opisywanego rozwiązania w procesie wspomagania dydaktyki gry na instrumencie muzycznym. Pamiętać jednak należy, że aplikacja ma być jedynie narzędziem

wspomagającym, które pozwoli zainteresować instrumentem młodego muzyka poprzez urozmaicenie żmudnego procesu ćwiczenia gry na instrumencie.

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0045/18.

## **5. Literatura**

Beazley D., Jones B.K. (2014), Python. Receptury. Wydanie III, Wydawnictwo Helion, ISBN 978-83-246-8180-8.

Gäbel D., Villmow M. (2008): Saxophone For Dummies. John Wiley& Sons, 2011-11-22, s. 13-15. ISBN 978-1-118-08487-8.

Kientzy D., Londeix J.M. (2008): El saxofón. SpanPress, 1998 – 92

Kusiak J. (2013), Skrzypce od A do Z, Polskie Wydawnictwo Muzyczne, Kraków 2013, ISBN 83-224-0346-1

Lutz M. (2010), Python. Wprowadzenie. Wydanie IV, Wydawnictwo Helion, ISBN 978-83-246-2694-6

Pawłowski J. (1963), Trąbka od A do Z, Polskie Wydawnictwo Muzyczne, Kraków 1963

Perez A., Bonada J., Maestre E., Gaus E., Blaauw M. (2008), Acquisition of violininstrumentalgesturesusing a commercial EMF trackingdevice, Proc. of the 11th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-08), Espoo, Finland, September 1-4, 2008

Pituch D. (2000), Saksofon od A do Z, Polskie Wydawnictwo Muzyczne, Kraków 2000, ISBN ISSN: 83-224-0666-5

Wick D. (1984), TromboneTechnique, Oxford University Press; 2 edition (December 6, 1984), ISBN 978-0193223783.

# Otrzymywanie kompozytów $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ o strukturze core-shell posiadających właściwości fotokatalityczne.

Agnieszka Wojciechowska <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>Institut Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Agnieszka Wojciechowska: awojciechowska152@wp.pl

## Streszczenie

Fotokatalizatory o strukturze core-shell posiadają kilka zalet, które odróżniają je od tradycyjnych fotokatalizatorów. Zastosowanie nanocząstek magnetycznych np. magnetytu, jako rdzenia, który posiada właściwości superparamagnetyczne umożliwia łatwe odzyskanie fotokatalizatorów po zakończonym procesie fotodegradacji zanieczyszczeń na drodze separacji magnetycznej. Dytlenek tytanu, jako powłoka umożliwia otrzymanie struktur o dużej aktywności fotokatalitycznej. Fotokatalizatory typu core-shell dzięki różnym metodą syntezy komponentów oraz dodatkowym modyfikacją struktur umożliwiają otrzymanie fotokatalizatorów aktywnych również w świetle widzialnym, a nie jak tradycyjne katalizatory w zakresie promieniowania ultrafioletowego. Wpływa to na zmniejszenie kosztów procesu oczyszczania ścieków. W pracy przedstawiono metody syntezy magnetytu oraz całych struktur core-shell, sposoby modyfikacji w celu zwiększenia ich aktywności w świetle widzialnym.

**Słowa kluczowe:** nanocząstki magnetyczne, fotokataliza, ditlenek tytanu

## Preparation of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ composites with a core-shell structure with photocatalytic properties.

### Summary

Photocatalysts with the core-shell structure have several advantages that distinguish them from traditional photocatalysts. The use of magnetic nanoparticles, e.g. magnetite, as a core that has superparamagnetic properties, allows easy recovery of photocatalysts after the photodegradation of pollutants by magnetic separation. Titanium dioxide, as a coating, makes it possible to obtain structures with high photocatalytic activity. Core-shell photocatalysts, due to various methods of component synthesis and additional modification of the structures, allow to obtain photocatalysts active also in visible light, rather than traditional UV-catalytic catalysts. This reduces the costs of the wastewater treatment process. In this work methods of magnetite synthesis, whole core-shell structures and modification methods to increase their activity in visible light were presented.

**Keywords:** magnetic nanoparticles, photocatalysis, titanium dioxide

### 1. Wstęp

Ze względu na szybki rozwój przemysłu w ostatnich latach, zanieczyszczenie wód jest dużym problemem w ochronie środowiska. Obecnie większość obszarów uprzemysłowionych próbuje skutecznie rozwiązać problem z trafiającymi do środowiska zanieczyszczeniami takimi jak: tlenki węgla ( $\text{CO}_x$ ), chlorofluorowęglowodory (CFC), metale ciężkie (arsen, chrom, ołów, kadm, rtęć i cynk) oraz barwniki, które ze względu na struktury aromatyczne i grupy azowe są toksyczne i słabo degradujące się. Do usuwania zanieczyszczeń z wody opracowano kilka metod m. in.: metody biologiczne, metody chemiczno-utleniające, separacja membranowa, fotokataliza, adsorpcja czy degradacja sonokatalityczna (Areerob i in. 2018, Panahi i in. 2018).

W ostatnich latach dużo uwagi skupia się na procesach fotokatalitycznych ze względu na całkowitą mineralizację zanieczyszczeń, niską temperaturę i niskie ciśnienie prowadzenia procesu fotodegradacji (Zhang i in. 2009). Proces chemiczny, jakim jest fotokataliza polega na zmianie szybkości reakcji chemicznej przy użyciu fotokatalizatora. Pod wpływem promieniowania o energii większej lub równej energii pasma wzbronionego, elektron zostaje przeniesiony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa z wytworzeniem luki elektronowej ( $h^+$ ). Tworzą się pary elektron ( $e^-$ ) – dziura elektronowa ( $h^+$ ). Jeżeli na powierzchni fotokatalizatora zaadsorbowane są cząsteczki wody lub grupy hydroksylowe ( $OH^-$ ) dochodzi do powstania rodników hydroksylowych ( $\cdot OH$ ), które posiadają wysoki potencjał utleniający, co powoduje, że zachodzi utlenianie zaadsorbowanych zanieczyszczeń na powierzchni fotokatalizatora (Kosmala i in. 2016).

Jako fotokatalizatory stosowane są półprzewodniki ( $CdS$ ,  $ZnS$ ,  $WS_2$ ,  $CdSe$ ,  $CdTe$ ) oraz tlenki metali ( $SnO_2$ ,  $ZnO$ ,  $WO_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ). Ze względu na nietoksyczność, niski koszt oraz obojętność biologiczną i chemiczną dobrym materiałem jest tlenek cynku. Jednak posiada on przerwę energetyczną ok. 3,3 eV co powoduje, że charakteryzuje się niską wydajnością fotokatalityczną w świetle widzialnym.

Powszechnie stosowanym fotokatalizatorem jest ditlenek tytanu ze względu na dobrą stabilność chemiczną i termiczną, wysoką aktywność fotokatalityczną, niską toksyczność i niski koszt oraz pełną mineralizację zanieczyszczeń do wody i dwutlenku węgla.

$TiO_2$  występuje w trzech odmianach krystalograficznych: anatazu, rutylu oraz brukitu. Różnią się one energią pasma wzbronionego, dla anatazu energia ta wynosi 3,2 eV, rutylu 3 eV, a dla brukitu 3,2 eV. Powoduje to, że występują pomiędzy nimi różnice w właściwościach fotokatalitycznych (Thejaswini i in. 2017). Anataz charakteryzuje się dużo większą aktywnością fotokatalityczną niż rutyl, który posiada mniejszą przerwę energetyczną. Tanaka i in. powiązali wyższą aktywność z mniejszą zdolnością adsorpcji tlenu przez anataz oraz z dużą powierzchnią właściwą, co powoduje, że jest więcej miejsc aktywnych do adsorpcji zanieczyszczeń (Tanaka i in. 1991). Fotokatalizatory będące mieszaniną dwóch form krystalograficznych  $TiO_2$  charakteryzowały się najlepszymi właściwościami fotokatalitycznymi. Najbardziej optymalny stosunek faz to 70-75% anataz i 30-25% rutyl (Hou i in. 2015).

Wadą  $TiO_2$  jest to, że posiada wysoką aktywność fotokatalityczną tylko w zakresie promieniowania ultrafioletowego. Przez co procesy oczyszczania ścieków są kosztowne, ze względu na konieczność stosowania lamp UV (Thejaswini i in. 2017). Prowadzone są badania, które mają na celu rozszerzenie aktywności fotokatalitycznej na zakres światła

widzialnego. Opracowano materiały na bazie  $\text{TiO}_2$ , które wykazują większą aktywność w świetle widzialnym od czystego ditlenku tytanu poprzez modyfikacje powierzchni, domieszkowanie innymi pierwiastkami czy tworzenie kompozytów.

Inną trudnością związaną z zastosowaniem, fotokatalizatorów na bazie ditlenku tytanu jest problem z ich odzyskaniem po zakończonym procesie fotodegradacji. Obecnie stosuje się dodatkowe procesy takie jak np. filtracja czy wirowanie w celu odzyskania katalizatorów ze środowiska po zakończonym procesie. Powoduje to, że wzrasta koszt procesu degradacji zanieczyszczeń (Popa i in. 2018). Dlatego szuka się nowych fotokatalizatorów, które rozwiązałyby powyższe problemy. Dobrym przykładem są fotokatalizatory na bazie materiałów kompozytowych typu core-shell gdzie, jako otoczka stosuje się ditlenek tytanu, który charakteryzuje się wysoką aktywnością fotokatalityczną. Natomiast, jako rdzeń stosuje się nanocząstki magnetyczne np. magnetyt. Kompozyty takie można z łatwością oddzielić od środowiska za pomocą prostego magnezu (Khashan i in. 2016).

## **2. Metody otrzymywania magnetytu**

Właściwości magnetytu silnie zależą od wielkości oraz kształtu cząstek. Cząstki poniżej 30 nm posiadają właściwości superparamagnetyczne oraz rozwiniętą powierzchnię. Wadą tlenku żelaza(II, III) jest to, że łatwo ulega utlenieniu oraz aglomeracji. W celu zapobiegania niepożądanym efektom, podczas syntezy stosuje się dodatkowe substraty, które mają na celu wytworzenie warstwy ochronnej. Do tych substancji zalicza się związki organiczne np. środki powierzchniowo czynne czy polimer np. glikol polietylenowy. Również wykorzystuje się związki nieorganiczne np.  $\text{SiO}_2$  czy węgiel [Wang i in. 2010, Soares i in. 2014].

W zależności od rodzaju syntezy oraz od parametrów można otrzymać nanocząstki różniące się właściwościami. Do najczęściej wykorzystywanych metod należą: metoda współstrącaniowa (Arndt i in. 2014, Alibeigi i in. 2008, Wu i in. 2008), termiczny rozkład prekursora żelaza (Arndt i in. 2014, Wang i in. 2014, El-Sheikh i in. 2009), metoda solwotermalna (Pang i in. 2016, Arndt i in. 2014, Kumar i in. 2013), hydrotermalna (Haw i in. 2010, Pang i in. 2016, Ozel i in. 2015) oraz mikroemulsja (Haw i in. 2010, Li i in. 2014, Zhang i in. 2010).

### **2.1. Metoda współstrącaniowa**

Metoda współstrącaniowa polega na dodaniu zasady (np. NaOH) do wodnego roztworu zawierającego jony żelaza (II) i (III), gdzie zachodzi strącanie nanocząstek tlenku żelaza (II, III). Nie jest wymagany środek stabilizujący, a jako rozpuszczalnik stosowana jest woda. Wadą tej metody jest szeroki rozkład wielkości oraz ograniczona kontrola nad kształtem otrzymanych nanocząstek. Do zalet tej metody należy szybkość syntezy, prostota w jej



wykonaniu oraz możliwość otrzymania dużej ilości produktu. Ze względu na brak szkodliwych substancji magnetyt otrzymany tą metodą może być potencjalnie wykorzystywany w medycynie czy w ochronie środowiska (Arndt i in. 2014).

## 2.2. Rozkład termiczny

Inną metodą jest rozkład prekursora żelaza w wysoko wrzącym rozpuszczalniku np. eterze benzylovym. Jako prekursor żelaza stosuje się octan, oleinian czy szczawian. Zaletą jest wąski rozkład wielkości cząstek oraz możliwość regulacji rozmiaru oraz kształtu otrzymanych nanocząstek. Wadą stosowania np. oleinianów jest to, że otrzymane nanocząstki charakteryzują się hydrofobową powierzchnią i aby można było je zastosować w medycynie stosuje się dodatkowe substancje np. polimery lub długołańcuchowe rozpuszczalne w wodzie węglowodory w celu modyfikacji. Co z kolei może negatywnie wpływać na właściwości magnetyczne otrzymanego tlenku żelaza (II, III).

W celu wyeliminowania problemu z powierzchnią hydrofobową wykorzystuje się zmodyfikowaną metodę polegającą na rozkładzie organicznego prekursora żelaza (np. acetyloacetonian żelaza) w wysokowrzących polioliach np. glikolu dietylenowym. Za pomocą polioli o różnej długości łańcucha można wpływać na rozkład acetyloacetonu żelaza. W zależności od temperatury oraz czasu prowadzenia reakcji można kontrolować wielkość magnetytu w zakresie od 6 do 30 nm (Arndt i in. 2014).

## 2.3. Metoda solwotermalna

W tej metodzie wykorzystuje się sole żelaza np. chlorek żelaza (III). Proces prowadzi się w obecności rozpuszczalnika np. metanol, etanol czy polioli w temperaturze wyższej niż temperatura wrzenia rozpuszczalnika. Metoda ta pozwala na uniknięcie aglomeracji powstających nanocząstek poprzez zastosowanie środków powierzchniowo czynnych takich jak: kwas oleinowy czy kwas akrylowy. Poliole oprócz pełnienia roli rozpuszczalnika są środkiem redukującym oraz stabilizatorem do kontrolowania rozmiarów cząstek i zapobiegają aglomeracji otrzymywanych struktur. Wielkość nanocząstek można kontrolować poprzez ilość środka powierzchniowo czynnego. W tym procesie otrzymywane są hydrofilowe nanocząstki tlenku żelaza. Dodatkowymi zaletami jest otrzymanie produktu o wysokiej krystaliczności i monodispersyjności. Metoda ta jest wrażliwa na stężenie wody oraz na zasadowość (Pang i in. 2016). Wadą metody solwotermalnej jest długi czas trwania procesu, który wynosi ok 12h. Metoda ta jest modyfikowana w celu przyspieszenia tworzenia się nanocząstek magnetycznych. Opracowano metodę, która wykorzystuje promieniowanie mikrofalowe, dzięki czemu synteza trwa 1h 20min. W tym celu chlorek żelaza (III) rozpuszczano w glikolu polietylenowym z dodatkiem octanu sodu. Proces prowadzono

w reaktorze mikrofalowym w temperaturze do 170 °C. Otrzymano magnetyt o rozmiarach poniżej 30 nm (Lendzion-Bieluń i in. 2018).

#### 2.4. Metoda hydrotermalna

Metoda hydrotermalna jest specyficznym procesem solwotermalnym, w którym, jako rozpuszczalnik organiczny stosuje się wodę. Zaletami tej metody jest: odstępianie od rozpuszczalników organicznych, wysoka wydajność procesu oraz otrzymanie cząstek o kontrolowanym rozmiarze. Dodatkowo nie jest wymagana obróbka cieplna po tym procesie, co zapobiega dodatkowej aglomeracji otrzymanego produktu (Haw i in. 2010). W tej metodzie istotna jest temperatura prowadzenia syntezy. Zaobserwowano, że wyższa temperatura spowodowała otrzymanie większych nanocząstek. Jako środki dyspergujące i stabilizujące stosuje się związki organiczne, najczęściej polimery.

Wadą metody hydrotermalnej jest powolna kinetyka, ze względu na stosowanie niższej temperatury. W tym celu powyższa metoda jest często modyfikowana na przykład poprzez zastosowanie promieniowania mikrofalowego. Dzięki temu uzyskuje się bardziej jednorodny proces ogrzewania. Dodatkowo dzięki zastosowaniu mikrofal: szybciej osiąga się pożądaną temperaturę, zwiększa się kinetykę reakcji, osiąga się wysoką czystość fazową oraz dobrą powtarzalność wyników [Pang i in. 2016].

#### 2.5. Mikroemulsja

Proces polega na otrzymaniu nanocząstek z dwóch niemieszających się roztworów zawierających jony żelaza w obecności środka powierzchniowo czynnego. Wykorzystanie tej metody zapobiega aglomeracji magnetytu, otrzymane nanocząstki są o jednolitym rozmiarze, morfologii i dyspersji. Rozmiar nanocząstek można kontrolować poprzez odpowiedni stosunek olej/woda. Kształt nanocząstek w dużej mierze zależy od pH roztworu. Zaobserwowano, że przy pH 8,5 otrzymano igiełkowate nanocząstki, natomiast przy pH 13,5 otrzymano sferyczne nanocząstki. Prawdopodobnie można to powiązać z kształtem miceli, który zmienia się w zależności od pH [Haw i in. 2010].

### 3. Metody otrzymywania struktur core-shell

W celu otrzymania struktur core-shell naukowcy opracowali różne metody syntez np.: metoda szablonowa (Agrawal i in. 2010), metoda solwotermalna (Cheng i in. 2013) czy metoda hydrotermalna (Li i in. 2016).

#### 3.1. Metoda szablonowa

Metoda szablonowa składa się z trzech etapów: (i) kapsułkowanie nanocząstek tlenku żelaza(II, III) za pomocą polimeryzacji emulsyjnej, gdzie otoczką jest polistyren, (ii) szablonowanie nanocząstek tytanu na wcześniej otrzymanych strukturach, (iii) i ostatni etap

to usunięcie rdzenia polistyrenu z pokrytych tytanem magnetycznych struktur za pomocą obróbki cieplnej. Powstałe w ten sposób kapsułki są puste, przez co oprócz zastosowań, jako fotokatalizatory mogą potencjalnie być wykorzystywane w medycynie, np. przy systemach kontrolowanego uwalniania leków (Agrawal i in. 2010).

### 3.2. Metoda solwotermalna

Liu i in. (Cheng i in. 2013) opracowali metodę otrzymywania struktur core-shell wykorzystując metodę solwotermalną. Pierwszym etapem było otrzymanie nanocząstek magnetytu, na które następnie nanoszono warstwę tlenku tytanu (IV). W tym celu, jako prekursor  $\text{TiO}_2$  zastosowano tytanian tetrabutylu. Proces prowadzono w autoklawie w temperaturze 200 °C. Ostatnim etapem było prażenie w 400 °C. Wadą tej metody jest stosowanie wysokich temperatur, co może prowadzić do utlenienia magnetytu oraz długi czas trwania syntez. Natomiast do zalet można zaliczyć otrzymanie struktur o dużej powierzchni właściwej.

### 3.3. Metoda hydrotermalna

Natomiast grupa Li (Li i in. 2016) wykorzystwała metodę hydrotermalną do otrzymania struktur  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$ . Jako źródło tytanu również zastosowali tytanian tetrabutylu. Proces prowadzili w autoklawie w temperaturze 150 °C. Otrzymany w ten sposób materiał był suszony w suszarce próżniowej w 110 °C. Dużą zaletą tej metody jest pominięcie procesu kalcynacji w wysokich temperaturach. Proces jest też bardziej ekologiczny niż wykorzystanie klasycznej metody solwotermalnej dzięki zastosowaniu wody, jako rozpuszczalnika.

## 4. Modyfikacje struktur core-shell

Prowadzone są badania nad modyfikacjami struktur core-shell w celu zwiększenia aktywności w świetle widzialnym.

Przykładem takich modyfikacji są przygotowane przez Choi i in. cząstki  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  metodą zol-żel, które następnie były pokryte srebrem. Kompozyty charakteryzowały się zwiększoną aktywnością w świetle widzialnym w przypadku degradacji różnych zanieczyszczeń organicznych (Choi i in. 2017).

Beydoun i in. zaproponowali, aby cząstki magnetyczne powlekać  $\text{SiO}_2$ , a dopiero później warstwą  $\text{TiO}_2$ . Twierdzono, że może to zapobiegać rekombinacji elektronów, a co za tym idzie zwiększyć aktywność fotokatalityczną (Beydoun i in. 2000).

Innym materiałem, który badali naukowcy, jako warstwę pośrednią pomiędzy tlenkiem żelaza (II, III), a  $\text{TiO}_2$  jest węgiel ze względu na wysoką stabilność chemiczną i termiczną, niską toksyczność oraz możliwość otrzymania różnych porów. Liu i in. opracowali tanią i przyjazną metodę otrzymywania warstwy węglowej stosując, jako prekursor węgla glukozę

(Liu i in. 2011). Wadą stosowania materiałów węglowych jest możliwość ich aglomeracji. Innym materiałem, który stosowano są polimery np. polistyren, glikol polietylenowy czy poli(alkohol winylowy). Kompozyty przy wytworzeniu, których stosowano polimery charakteryzowały się wysoką wytrzymałością mechaniczną, wysoką stabilnością termiczną, dobrymi właściwościami optycznymi, magnetycznymi czy elektrycznymi (Pang i in. 2016).

## 5. Literatura

Agrawal M., Gupta S., Pich A., Zafeiropoulos N.E., Rubio-Retama J., Jehnichen D., Stamm M., Template-assisted fabrication of magnetically responsive hollow titania capsules, *Langmuir* 26 (2010) 17649.

Alibeigi S., Vaezi M.R., Phase transformation of iron oxide nanoparticles by varying the molar ratio of  $Fe^{2+}:Fe^{3+}$ , *Chem. Eng. Technol.* 31(2008) 1591–1596.

Areerob Y., Cho J. Y., Jang W. K., Oh W., Enhanced sonocatalytic degradation of organic dyes from aqueous solutions by novel synthesis of mesoporous  $Fe_3O_4$ -graphene/ $ZnO@SiO_2$  nanocomposites, *Ultrasonics – Sonochemistry*, 41 (2018) 267–278.

Arndt D., Zielasek V., Dreher W., Bäumer M., Ethylene diamine-assisted synthesis of iron oxide nanoparticles in high-boiling polyols, *Journal of Colloid and Interface Science*, 417 (2014) 188-198.

Beydoun D., Amal R., Low G.K.C., Mc Evoy S., Novel photocatalyst: titania-coated magnetite, activity and photodissolution, *J.Phys.Chem.B* 104 (2000)4387–4396.

Cheng G., Wang Z.G., Liu Y.L., Zhang J.L, Sun D.H., Ni J.Z., Magnetic affinity microspheres with meso-/macroporous shells for selective enrichment and fast separation of phosphorylated biomolecules, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 5 (2013) 3182–3190.

El-Sheikh S.M., Harraz F.A., Abdel-Halim K.S., Catalytic performance of nanostructured iron oxides synthesized by thermal decomposition technique, *J. Alloys Compd.* 487 (2009) 716–723.

Haw C.Y., Mohamed F., Chia C.H., Radiman S., Zakaria S., Huang N.M., Lim H.N., Hydrothermal synthesis of magnetite nanoparticles as MRI contrastagents, *Ceram. Int.* 36 (2010) 1417–1422.

Hou H., Shang M., Wang L., Li W., Tang B., Yang W., Efficient Photocatalytic Activities of  $TiO_2$  Hollow Fibers with Mixed Phases and Mesoporous Walls, *Scientific Reports*, 5 (2015) 15228.

Kosmala K., Szymańska R., Nanocząstki tlenku tytanu(IV), otrzymywanie, właściwości i zastosowanie, *KOSMOS Problemy nauk biologicznych*, 311 (2016) 235-245.

Kumar S.R., Raja M.M., Mangalaraj D., Viswanathan C., Ponpandian N., Surfactant free solvothermal synthesis of monodispersed 3D hierarchical Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> microspheres, *Mater. Lett.* 110 (2013) 98–101.

Lendzion-Bieluń Z., Narkiewicz U., Pachla A., Sposób otrzymania nanokrystalicznego tlenku żelaza z wykorzystaniem metody solwotermalnej, Patent PL 230416 B1, 31.10.2018.

Li Y., Yi H., Tang X., Liu X., Wang Y., Cui B., Zhao S., Study on the performance of simultaneous desulfurization and denitrification of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> composites, *Chem. Eng. J.* 304 (2016) 89–97.

Li Y., Jiang R., Liu T., Lv H., Zhou L., Zhang X., One-pot synthesis of grass-like Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanostructures by a novel microemulsion-assisted solvothermal method, *Ceram. Int.* 40 (2014) 1059–1063.

Liu Y., Zhou L., Hu Y., Guo C., Qian H., Zhang F., Lou X.W., Magneticfield induced formation of 1D Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/C/CdS coaxial nanochains as highly efficient and reusable photocatalysts for water treatment, *J.Mater.Chem.* 21(2011)18359–18364.

Ozel F., Kockar H., Growth and characterizations of magnetic nanoparticles under hydrothermal conditions: Reaction time and temperature, *J. Magn. Magn. Mater.* 373 (2015) 213–216.

Panahi Y., Mellatyar H., Farshbaf M., Sabet Z., Fattahi T., Akbarzadehe A., Biotechnological applications of nanomaterials for air pollution and water/wastewater treatment, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 15550–15558.

Pang Y.L., Lim S., Ong H.C., Chong W.T., Research progress on iron oxide-based magnetic materials: Synthesis techniques and photocatalytic applications, *Ceramics International* 42 (2016) 9–34.

Popa A., Stefan M., Toloman D., Pana O., Mesaros A., Leostean C., Macavei S., Marincas O., Suci R., Barbu-Tudoran L., Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub>: Gd nanoparticles with enhanced photocatalytic activity and magnetic recyclability, *Powder Technology*, 325 (2018) 441–451.

Soares P.I.P., Alves A.M.R., Pereira L.C.J., Coutinho J.T., Ferreira I.M.M., Novo C.M.M., Borges J.P.M.R., Effects of surfactants on the magnetic properties of iron oxide colloids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 419 (2014)46–51.

Tanaka K., Capule M.F.V., Hisanaga T., Effect of crystallinity of TiO<sub>2</sub> on its photocatalytic action, *Chemical Physics Letters*, 187 (1991) 73-76.

Thejaswini T.V.L., Prabhakaran D., AkhilaMaheswari M., Ultrasound assisted synthesis of nano-rod embedded petal designed  $\alpha$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO nanoparticles and their ultra-responsive

visible light induced photocatalytic properties, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 335 (2017) 217-229.

Wang C., Ao Y., Wang P., Hou J., Qian J., Facile method for the preparation of titania-coated magnetic porous silica and its photocatalytic activity under UV or visible light, *Colloids Surf. A*, 360 (2010) 184–189.

Wang D., Yang P., Zhu Y., Growth of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles with tunable sizes and morphologies using organic amine, *Mater. Res. Bull.* 49 (2014) 514–520.

Wu W., He Q., Jiang C., Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis and surface functionalization strategies, *Nanoscale Res. Lett.* 3 (2008) 397–415.

Zhang H., Chen G., Bahnemann D.W., Photoelectrocatalytic materials for environmental applications, *Journal of Materials Chemistry*, 19 (2009) 5089–5121.

Zhang G., Liao Y., Baker I., Surface engineering of core/Shell iron/iron oxide nanoparticles from microemulsions for hyperthermia, *Mater. Sci. Eng.: C* 30 (2010) 92–97.

# Problematyka zanieczyszczenia środowiska pochodnymi kwasu ftalowego

Daniel Wolecki <sup>(1)</sup>, Magda Caban <sup>(1)</sup>, Piotr Stepnowski <sup>(1)</sup>, Jolanta Kumirska <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> Katedra Analizy Środowiska, Wydział Chemii Uniwersytetu Gdańskiego, Wita Stwosza 63, 80-308 Gdańsk  
Daniel Wolecki: daniel.wolecki@phdstud.ug.edu.pl

## Streszczenie

Przemysł oraz rozwój cywilizacji implikuje przedostawanie się związków chemicznych do środowiska. Niemalżew całości są to obce chemikaliazaburzające homeostazę układów biotycznych. Do antropogenicznych zanieczyszczeń środowiska należą estry kwasu ftalowego będące podstawowymi związkami nadającymi plastyczność materiałom plastikowym. Ich obecność została potwierdzona zarówno w atmosferze, hydrosferze, jak i w glebie oraz osadach zbiorników wodnych. Z gleby mogą migrować do żywności, a tym samym bezpośrednio zagrażać ludziom i zwierzętom lądowym. Wiele ftalanów wykazuje aktywność estrogenną zaburzając prawidłowy rozwój płciowy organizmów wodnych, ich obecność może prowadzić także do zmian nowotworowych. W niniejszym artykule omówiono źródła oraz drogi rozprzestrzeniania się estrów kwasu ftalowego w środowisku. Zwrócono uwagę na możliwe mechanizmy rozkładu tych związków w warunkach laboratoryjnych oraz środowiskowych. Zaprezentowano także przykładowe wyniki analiz obecności ftalanów w różnych komponentach środowiska.

**Słowa kluczowe:** ftalany, obecność w środowisku, zanieczyszczenia pochodnymi kwasu ftalowego, oczyszczalnie hydroponiczne

## Problems of environmental pollution with derivatives of phthalic acid

### Summary

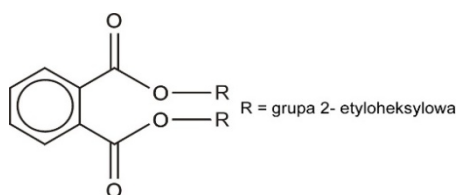
Industry and the development of civilization implies the penetration of chemical compounds into the environment. Almost all of them are foreign chemicals that disturb the homeostasis of biotic systems. Esters of phthalic acid being the basic compounds that give plasticity to plastic belong to anthropogenic pollution of the environment. Their presence was confirmed both in the atmosphere, hydrosphere as well as in the soil and sediments of water reservoirs. From the soil they can migrate to food, and thus can directly threaten people and terrestrial animals. Many of them belong to endocrine-disrupting chemicals which can negatively influence of on male or female reproductive systems, and even lead to cancer disease. This article summarizes the pathways of migration and the spread of phthalic acid esters in the environment. Attention has been paid to the possible mechanism of degradation of these compounds in laboratory and environmental conditions. The data concerning on the presence of phthalates in various environmental components was also presented.

**Keywords:** phthalates, presence in the environment, phthalic acid derivatives pollution, hydroponic cultivation

### 1. Wstęp

Ftalany to sole i estry kwasu ftalowego wprowadzone do użytku już w latach 30 ubiegłego wieku (Gao i in. 2016). Obecnie są wykorzystane w wielu gałęziach przemysłu, m.in. do produkcji laminatów, farb, lakierów, klejów oraz tworzyw sztucznych. Często pełnią rolę środka zmiękczającego nadającego elastyczność pierwotnie kruchym materiałom polimerowym (tzw. plastyfikatory ftalanowe). Ftalany łatwo wbudowują się w łańcuch polimerowy, dzięki czemu nadają tworzywom sztucznym pożądane cechy użytkowe. Należy podkreślić, że nie wchodzi z nimi w reakcje chemiczne, tylko tworzą wiązania fizyczne. Mogą być, zatem odparowane z tworzywa lub rozpuszczone (w kontakcie z płynami lub tłuszczami). Ftalan bis(2-etyloheksylu) (ang. *bis(2-ethylhexyl) phthalate*, DEHP) (Rys. 1) jest najczęściej stosowanym plastyfikatorem polichlorku winylu (PVC) (Planelló i in. 2011); jest

też powszechnie spotykaną substancją zanieczyszczającą środowisko, występującą w łańcuchu żywnościowym i diecie człowieka.



Rys. 1 Budowa chemiczna DEHP (ftalanu bis(2-etyloheksylu))

Globalna produkcja estrów ftalowych systematycznie rośnie, np. od 1975 do 2011 roku wzrosła z 1,8 mln ton do ponad 8 mln ton rocznie (Net i in. 2015). Zgodnie z raportem z roku 2011 źródłem pochodnych kwasu ftalowego w środowisku są nie tylko materiały opakowaniowe, ale też procesy przetwarzania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, urządzenia medyczne, płyty podłogowe, części samochodowe, opony, farby, powłoki farmaceutyczne oraz przewody elektryczne (University of Massachusetts 2011). Mnogość produktów zawierających ftalany, rozwijający się przemysł oraz globalizacja doprowadziły do wzrostu zanieczyszczenia środowiska tymi związkami. Obecnie zaliczane są do grupy nowopojawiających się zanieczyszczeń środowiska, istotnych z punktu widzenia ochrony środowiska i zdrowia człowieka. Z uwagi na ryzyko dla środowiska, 17 grudnia 2018 r. Komisja Europejska wprowadziła rozporządzenie w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH) w odniesieniu do DEHP, ftalanu dibutylo (DBP), ftalanu benzylu butylu (BBP) oraz ftalanu diizobutylo (DIBP) (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 322/15; 18.12.2018). Aktualizacja wiedzy na temat potencjalnych zagrożeń, jakie niesą ważnym zadaniem specjalistów z zakresu chemii i ochrony środowiska.

## 2. Rozprzestrzenienie się i degradacja ftalanów w środowisku naturalnym

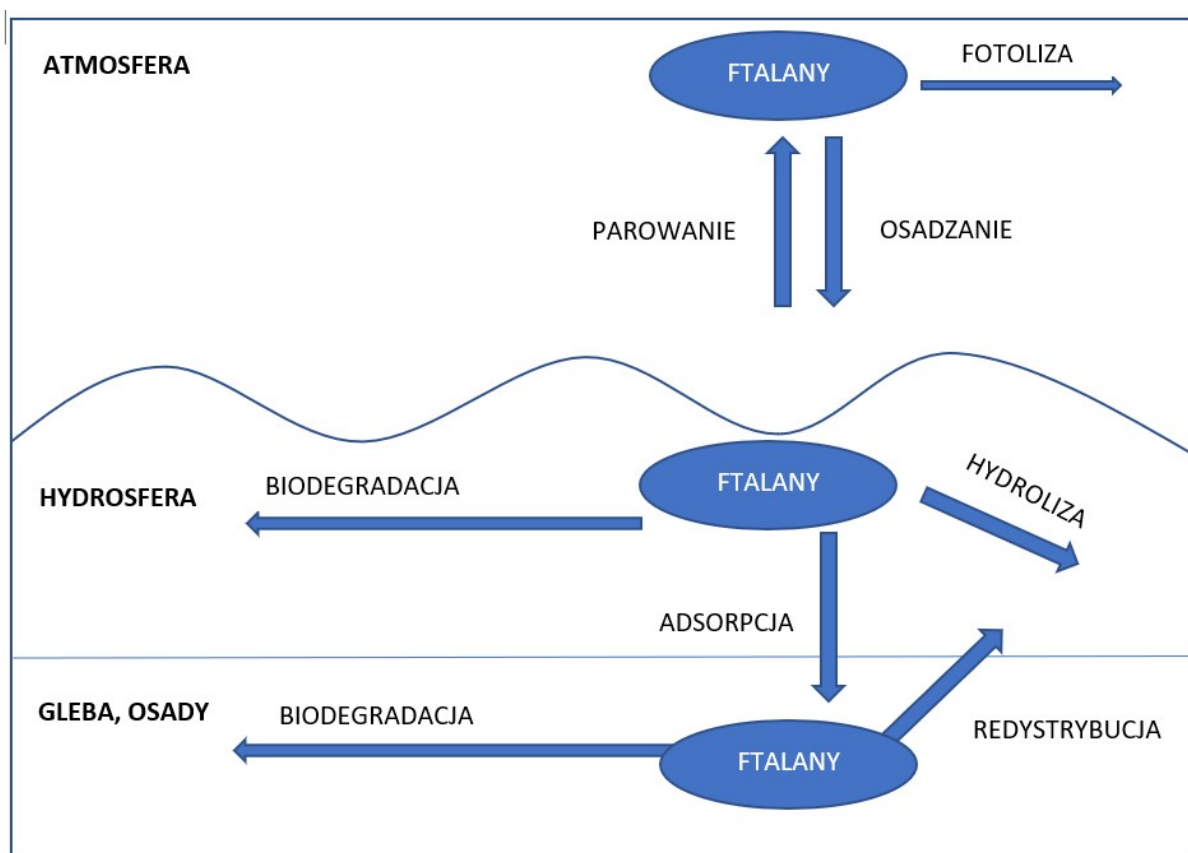
Sposób migracji związków chemicznych zależy od ich właściwości fizykochemicznych. W Tabeli 1 zestawiono najważniejsze właściwości wybranych estrów kwasu ftalowego, które warunkują ich zachowanie w środowisku naturalnym.

Tabela 1 Zestawienie najczęściej stosowanych pochodnych kwasu ftalowego, ich skróty nomenklaturowe oraz wybrane właściwości fizykochemiczne (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>, dostęp: 16.01.2019)

Wybrane pochodne kwasu ftalowego	Skrót	Wzór sumaryczny	M <sub>mol</sub>	Długość łańcucha alkilowego	Rozpuszczalność w wodzie [mg/L]	Log K <sub>ow</sub>	T. topnienia [°C]
Ftalan dimetylu	DMP	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	194,19	1	4000	1,47	5,5
Ftalandietylu	DEP	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	222,24	2	1000	2,38	-40
Ftalandibutylo	DBP	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278,34	4	11,20	3,74	-35
Ftalandiisobutylo	DiBP	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278,34	4	200	4,46	-58
Ftalanbutylubenzylu	BBP	C <sub>19</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub>	312,37	4 i 6	2,70	4,59	-35
Ftalandioctylo	DOP	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	390,57	8	0,0005	8,06	-25
Ftalan di-2-etyloheksylu	DEHP	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	390,57	8	0,003	7,50	-40



Spośród siedmiu wymienionych ftalanów, DMP i DEP wykazują właściwości hydrofilowe. Wskazują na to wysoka rozpuszczalność w wodzie oraz stosunkowo niska wartość współczynnika podziału n-oktanol-woda ( $\log K_{OW} < 2.5$ ) (Tab. 1). Pozostałe ftalany należą do związków hydrofobowych ( $\log K_{OW} \gg 3$ ; Tab. 1). Z materiałów plastikowych estry kwasu ftalowego uwalniają się wprost do atmosfery, gdzie pozostają jako cząsteczki gazowe lub sorbuje się na cząstkach zawieszonych w atmosferze (Rys. 2). Pozostając odpowiednio długo w atmosferze ulegają reakcji fotolizy rozpadając się na bezwodnik kwasu ftalowego oraz monoestry kwasu ftalowego (Barreca i in. 2014). Mogą też opadać wraz z opadami atmosferycznymi, co prowadzi do wtórnego zanieczyszczenia zbiorników wodnych.



Rys. 2 Występowanie oraz obieg i degradacja ftalanów w środowisku naturalnym

Do najważniejszych procesów abiotycznych zaliczamy hydrolizę, fotolizę oraz fotoutlenianie (ang. *photooxidation*) w fazie gazowej. Hydroliza ftalanów zachodzi z bardzo niską wydajnością. I tak na przykład, czas połowicznego rozpadu DEHP w warunkach wodnych wynosi 2000 lat (Schwarzenbach i in. 1993; Staples i in. 1997). Znacznie bardziej wydajnym szlakiem degradacyjnym ftalanów jest fotodegradacja. Czas połowicznego rozpadu ftalanów mieści się w zakresie od 320 minut do 93 dni (Staples i in. 1997). Mimo wysokiej wydajności procesów fotodegradacyjnych, współwystępowanie opadów atmosferycznych

przyczynia się do rozproszczenia ftalanów w środowisku naturalnym (Rys. 2). Ftalany ze względu na swoją niską rozpuszczalność w wodzie, ulegają adsorpcji do gleb i osadów (Gao i in. 2016). Tam częściowo podlegają immobilizacji oraz procesom biodegradacji.

Badania laboratoryjne przeprowadzone z wykorzystaniem szczepów bakterii *Gordonia sp.* oraz *Arthrobacter sp.* wykazały całkowitą mineralizację BBP (Chatterjee i in. 2008). Dodatkowo, wykazano, że zarówno w warunkach uwodnionych jak i na powierzchni to mikroorganizmy odpowiadają w głównej mierze za procesy rozkładu estrów kwasu ftalowego (Chatterjee i in. 2010). W szlaku metabolicznym mikroorganizmów, pierwszym etapem reakcji jest hydroksylacja, w wyniku której z dialkylowych estrów powstają monoestry kwasu ftalowego. Ulegają one następnie wtórnej reakcji z cząsteczką wody. Powstały w ten sposób kwas ftalowy w szlaku metabolizmu tlenowego przekształca się w hydroksypochodne, a w wyniku działania enzymów w kwas protokatechowy. Końcowa mineralizacja jest procesem wybiórczym i silnie zależnym od rodzaju szczepów bakterii (Staples i in. 1997). Udowodniono, że całkowita mineralizacja ftalanów zachodzi pod wpływem wielu mikroorganizmów. Kolonie złożone z gatunków *Gordonia sp.* i *Arthrobacter sp.* po 48 godzinach całkowicie rozłożyły ftalan di-n-octylu (Wu i in. 2010). Anaerobowy szlak metaboliczny sprzyja powstawaniu karboksylowych pochodnych kwasu ftalowego. Przejściowe produkty biodegradacji charakteryzują się występowaniem cząsteczki koenzymu A przyłączonej do atomu węgla w pozycji *-orto*. Produkty mineralizacji wzbogacają się tym samym o powstający gazowy wodór (Staples i in. 1997). Wśród bakterii beztlenowych zdolnych do rozkładu ftalanów należy wyróżnić *Clostridium sp.*, *Bacillus sp.*, *Pelotomaculum sp.*, *Pseudomonas sp.* (Gao i in. 2016). Generalnie proces anaerobowej degradacji ftalanów jest wolniejszy niż aerobowej, ze względu na brak odpowiednich warunków syntezy (Chang i in. 2005). Dodatkowo, niektóre gatunki grzybów istotnie wspomagają proces rozpadu ftalanów. Gatunki takie jak: *Aspergillus parasiticus*, *Fusarium subglutinans* oraz *Penicillium funiculosum* wykazują zdolność całkowitego wykorzystania DEHP w procesie metabolicznym (Pradeep i in. 2012). Zdolność większości grzybów do rozkładu związków organicznych związana jest z występowaniem w ich grzybniach enzymów ligninolitycznych jak peroksydaza ligninowa (Hwang 2012). Należy jednak pamiętać o złożoności procesów zachodzących w warunkach środowiskowych. Jednoczesne współwystępowanie wielu procesów w znacznej mierze przyczynia się do wzrostu efektywności samooczyszczania się środowiska (Gao i in. 2016).

### 3. Zanieczyszczenie środowiska pochodnymi kwasu ftalowego

Rozprzestrzenienie estrów kwasu ftalowego w środowisku (Rys. 2) jest tym większe, im bardziej rozwinięty jest przemysłowy na danym terenie. Dlatego też obszary przemysłowe, miejskie, podmiejskie oraz strefy składowania odpadów to główne rezerwuary ftalanów w środowisku (Gao i in. 2016). Przykładowe zawartości ftalanów w różnych komponentach środowisk przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2 Występowanie ftalanów w różnych komponentach środowiska [ $\mu\text{g}/\text{kg}$  s.m. lub  $\mu\text{g}/\text{l}$ ]; nd: nie wykryto, - : nie analizowano

Próbki gleby	DMP	DEP	DBP	BBP	DEHP	DOP	Lit.
<b>GLEBY</b>							
Gleby rolnicze, Hiszpania	-	-	-	-	1000-63000	-	(Plaza-Bolaños i in. 2012)
Gleby podmiejskie, Chiny	2-101	2-114	7-285	0-1790	26-4170	0-9780	(Kong i in. 2012)
Gleby powierzchniowe, Chiny	630-680	320-630	2530-3960	0-1750	7320-11700	0-3460	(Lin i in. 2010)
Gleby uprawne, Holandia	-	-	6	-	31,8	-	(Peijnenburg i in. 2006)
Gleba gliniasta, Wielka Brytania	0,1	0,2-0,9	7,9-8	0,2-0,8	22,2-75,8	11,5-13,7	(Gibson i in. 2005)
Gleby odpadowe, Chiny	$\sum$ 5 estrów ftalanów = 12566-46669						(W. L. Liu i in. 2009)
Grunty orne	$\sum$ 4 estrów ftalanów = 890-13030						(Hui in. 2003)
<b>HYDROSFERA</b>							
Rzeka Kaweri, Indie	0,02	0,24	0,04	0,03	0,51	0,25	(Selvaraj i in. 2015)
Rzeka Jaram i Manzaneras, Hiszpania	nd	nd	nd	-	nd	0,25-1,76	(Domínguez-Morueco i in. 2014)
Rzeka Somma, Francja	0,02-0,25	0,26-6,98	nd	nd	5,16-20,8	0,22-3,86	(D. W. Gao i in. 2016)
Jezioro Pontchartrain, USA	$\sum$ DEHP+DBP+DiBP = 0,4-34,8						(Y. Liui in. 2013)
Jezioro miejskie, Chiny	$\sum$ 16 estrów ftalanów = 0,47-6,19						(Zeng i in. 2009)

<b>Rzeka Jangcy, Chiny</b>	$\Sigma$ DMP+DEP+DBP+DEHP+DOP = 152-450						(F. Wang i in. 2008)
<b>O S A D Y</b>							
<b>RzekaKaweri, Indie</b>	1,6	16,5	2,6	2,5	278	35,5	(Selvaraj i in. 2015)
<b>JezioroShichahai, Chiny</b>	21,5- 133	2,4-20	nd-287	14,5- 2622	83,5-5755	10,2- 1114	(D. Gao, i in. 2014)
<b>Jezioro Shallow, Chiny</b>	-	-	-	-	320-760	66-175	(A. Wang i in. 2012)
<b>15 ciekówwodnych, Francja/Belgia</b>	$\Sigma$ DMP+DEP+DBP+BBP+DEHP+DOP=1090–11,890						(Net i in. 2015)
<b>MorzeŻółte, Chiny</b>	$\Sigma$ DEHP+DiBP+DBP=nd –1950						(W. Liu i in. 2008)
<b>Rzeka Sungari, Chiny</b>	25,2- 87,8	26,7- 38,2	nd-96,3	nd-378	227-567	58,1- 881	(D. Gao i in. 2014)

Dużym niebezpieczeństwem jest fakt, że w wielu przypadkach estry kwasu ftalowego zidentyfikowano w glebach rolniczych (Hu i in. 2003; Ma i in. 2013). Implikuje to możliwość przenikania tych związków do roślin i warzyw jadalnych. Niestety dla Polski brakuje doniesień literaturowych, odnoszących się do pozostałości estrów kwasu ftalowego w różnych komponentach środowiska. Udokumentowana obecność ftalanów w wielu komponentach środowiska wskazuje na potencjalne ryzyko dla organizmów wodnych i lądowych, w tym dla zdrowia człowieka.

#### 4. Podsumowanie

Toksyczność ftalanów względem organizmów wodnych i lądowych nie została w pełni potwierdzona, jednakże wykazano niską toksyczność ostrą, która mieści się w przedziale 1 – 30 g/kg masy ciała (badania na szczurach)(Abdel daiemi in. 2012). U gryzoni w krótko- i długoterminowych badaniach wykazano zmiany komórkowe w obszarach nerek, wątroby i tarczycy. Długołańcuchowe pochodne kwasu ftalowego zaliczane są do związków zaburzających gospodarkę hormonalną, prowadząc w konsekwencji do upośledzenia narządów rozrodczych. U ludzi chroniczne narażenie na ekspozycję względem ftalanów prowadzi do uszkodzenia sekwencji DNA w komórkach nabłonka gardła oraz śluzówki; pośrednio wpływa na rozwój zmian nowotworowych w obrębie gonad męskich (Struciński i in. 2006).

Stopień rozprzestrzenienia ftalanów w środowisku, wzrastająca produkcja i wykorzystanie plastikowych opakowań sprowadza obowiązek racjonalizacji wykorzystania

tych związków w przemyśle (ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2018/2005, 2018). Jednakże ftalany wprowadzone już do środowiska należy skutecznie usuwać, obniżając jednocześnie koszty i energochłonność układów w oczyszczalniach ścieków. Jedną z możliwości wspomagania procesu usuwania antropogenicznych zanieczyszczeń środowiska w ściekach jest wykorzystanie upraw hydroponicznych (ang. *constructedwetland*). W Katedrze Analizy Środowiska Wydziału Chemii Uniwersytetu Gdańskiego prowadzone są badania efektywności takiego rozwiązania. Potwierdzono już znaczną skuteczność roślin w procesie sorbowania farmaceutyków do wnętrza tkanek (Woleckii in. 2018). Efektywność usuwania ftalanów ze strumienia ścieków nie została jeszcze potwierdzona.

## 5. Bibliografia

- Abdel daiem, M. M., Rivera-Utrilla, J., Ocampo-Pérez, R., Méndez-Díaz, J. D., & Sánchez-Polo, M. (2012). Environmental impact of phthalic acid esters and their removal from water and sediments by different technologies - A review. *Journal of Environmental Management*, 109, 164–178.
- Barreca, S., Indelicato, R., Orecchio, S., & Pace, A. (2014). Photodegradation of selected phthalates on mural painting surfaces under UV light irradiation. *Microchemical Journal*, 114, 192–196.
- Chang, B. V., Liao, G. S., & Yuan, S. Y. (2005). Anaerobic Degradation of Di-n-butyl Phthalate and Di-(2-ethylhexyl) Phthalate in Sludge. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(4), 775–782.
- Chatterjee, S., & Dutta, T. K. (2008). Metabolic cooperation of *Gordonia* sp. strain MTCC 4818 and *Arthrobacter* sp. strain WY in the utilization of butyl benzyl phthalate: effect of a novel co-culture in the degradation of a mixture of phthalates. *Microbiology*, 154(11), 3338–3346.
- Chatterjee, S., & Karlovsky, P. (2010). Removal of the endocrine disrupter butyl benzyl phthalate from the environment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(1), 61–73.
- Domínguez-Morueco, N., González-Alonso, S., & Valcárcel, Y. (2014). Phthalate occurrence in rivers and tap water from central Spain. *Science of The Total Environment*, 500–501, 139–146.
- Gao, D., Li, Z., Wen, Z., & Ren, N. (2014). Occurrence and fate of phthalate esters in full-scale domestic wastewater treatment plants and their impact on receiving waters along the Songhua River in China. *Chemosphere*, 95, 24–32.
- Gao, D. W., & Wen, Z. D. (2016, January 15). Phthalate esters in the environment: A critical review of their occurrence, biodegradation, and removal during wastewater treatment

processes. *Science of the Total Environment*. Elsevier.

Gibson, R., Wang, M. J., Padgett, E., & Beck, A. J. (2005). Analysis of 4-nonylphenols, phthalates, and polychlorinated biphenyls in soils and biosolids. *Chemosphere*, 61(9), 1336–1344.

Hu, X. Y., Wen, B., & Shan, X. Q. (2003). Survey of phthalate pollution in arable soils in China. *Journal of Environmental Monitoring*, 5(4), 649–653.

Hwang, S.-S. (2012). Changes in the Activities of Enzymes Involved in the Degradation of Butylbenzyl Phthalate by *Pleurotus ostreatus*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 22(2), 239–243.

Kong, S., Ji, Y., Liu, L., Chen, L., Zhao, X., Wang, J., ... Sun, Z. (2012). Diversities of phthalate esters in suburban agricultural soils and wasteland soil appeared with urbanization in China. *Environmental Pollution*, 170, 161–168.

Lin, Z., Zhang, J., Cui, H., Zhang, L., & Chen, G. (2010). Determination of phthalate esters in soil by microemulsion electrokinetic chromatography coupled with accelerated solvent extraction. *Journal of Separation Science*, 33(23–24), 3717–3725.

Liu, W., Chen, J., Hu, J., Ling, X., & Tao, S. (2008). Multi-residues of organic pollutants in surface sediments from littoral areas of the Yellow Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, 56(6), 1091–1103.

Liu, W. L., Shen, C. F., Zhang, Z., & Zhang, C. B. (2009). Distribution of phthalate esters in soil of E-waste recycling sites from taizhou city in China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(6), 665–667.

Liu, Y., Chen, Z., & Shen, J. (2013). Occurrence and Removal Characteristics of Phthalate Esters from Typical Water Sources in Northeast China. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2013, 1–8.

Ma, T. T., Christie, P., Luo, Y. M., & Teng, Y. (2013). Phthalate esters contamination in soil and plants on agricultural land near an electronic waste recycling site. *Environmental Geochemistry and Health*, 35(4), 465–476.

Net, S., Rabodonirina, S., Sghaier, R. Ben, Dumoulin, D., Chbib, C., Tlili, I., & Ouddane, B. (2015). Distribution of phthalates, pesticides and drug residues in the dissolved, particulate and sedimentary phases from transboundary rivers (France–Belgium). *Science of The Total Environment*, 521–522, 152–159.

Net, S., Sempéré, R., Delmont, A., Paluselli, A., & Ouddane, B. (2015). Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices. *Environmental Science and Technology*, 49(7), 4019–4035.

- Peijnenburg, W. J. G. M., & Struijs, J. (2006). Occurrence of phthalate esters in the environment of the Netherlands. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 63(2), 204–215.
- Planelló, R., Herrero, O., Martínez-Guitarte, J. L., & Morcillo, G. (2011). Comparative effects of butyl benzyl phthalate (BBP) and di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) on the aquatic larvae of *Chironomus riparius* based on gene expression assays related to the endocrine system, the stress response and ribosomes. *Aquatic Toxicology*, 105(1–2), 62–70.
- Plaza-Bolaños, P., Padilla-Sánchez, J. A., Garrido-Frenich, A., Romero-González, R., & Martínez-Vidal, J. L. (2012). Evaluation of soil contamination in intensive agricultural areas by pesticides and organic pollutants: south-eastern Spain as a case study. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(4), 1182.
- Pradeep, S., & Benjamin, S. (2012). Mycelial fungi completely remediate di(2-ethylhexyl)phthalate, the hazardous plasticizer in PVC blood storage bag. *Journal of Hazardous Materials*, 235–236, 69–77.
- ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2018/2005 z dnia 17 grudnia 2018 r. zmieniające załącznik XVII do rozporządzenia (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (2018).
- Schwarzenbach, R., Gschwend, P., & Imboden, D. (1993). *Environmental Organic Chemistry.pdf*. New York: Wiley-Interscience Publication.
- Selvaraj, K. K., Sundaramoorthy, G., Ravichandran, P. K., Girijan, G. K., Sampath, S., & Ramaswamy, B. R. (2015). Phthalate esters in water and sediments of the Kaveri River, India: environmental levels and ecotoxicological evaluations. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(1), 83–96.
- Staples, C. A., Peterson, D. R., Parkerton, T. F., & Adams, W. J. (1997). The environmental fate of phthalate esters: A literature review. *Chemosphere*, 35(4), 667–749.
- Struciński, P., Góralczyk, K., Ludwicki, J., Czaja, K., Hernik, A., & Korcz, W. (2006). Poziomy wybranych insektycydów chloroorganicznych, polichlorowanych bifenyli, ftalanów i perfluorowanych związków alifatycznych we krwi. *Rocznik PZH*, 57(2), 99–112.
- University of Massachusetts. (2011). *Phthalates and their alternatives: health and environmental concerns*.
- Wang, A., & Chi, J. (2012). Phthalic acid esters in the rhizosphere sediments of emergent plants from two shallow lakes. *Journal of Soils and Sediments*, 12(7), 1189–1196.
- Wang, F., Xia, X., & Sha, Y. (2008). Distribution of Phthalic Acid Esters in Wuhan section of the Yangtze River, China. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 317–324.

Wolecki, D., Caban, M., Tabara, J., Stepnowski, P., & Kumirska, J. (2018). Determination of selected  $\beta$ -blockers and  $\beta$ -agonists in macrophytes plants used in constructed wetland. In Special Issue Conference Abstract Book CNS 2018 (pp. 45–45). Institute of Biotechnology and Molecular Medicine Foundation.

Wu, X., Liang, R., Dai, Q., Jin, D., Wang, Y., & Chao, W. (2010). Complete degradation of di-n-octyl phthalate by biochemical cooperation between *Gordonia* sp. strain JDC-2 and *Arthrobacter* sp. strain JDC-32 isolated from activated sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1), 262–268.

Zeng, F., Wen, J., Cui, K., Wu, L., Liu, M., Li, Y., ... Zeng, Z. (2009). Seasonal distribution of phthalate esters in surface water of the urban lakes in the subtropical city, Guangzhou, China. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 719–725.



# **Analiza zbieżności i skuteczności algorytmów filtracji adaptacyjnej w zastosowaniu do redukcji hałasu silników spalinowych stosowanych w samochodach osobowych**

**Tomasz Zema <sup>(1)</sup>, Maciej Walczyński <sup>(1)</sup>**

<sup>1</sup>Katedra Akustyki i Multimediów, Politechnika Wrocławska

<sup>2</sup>Katedra Akustyki i Multimediów, Politechnika Wrocławska

e-mail: maciej.walczynski@pwr.edu.pl

## **Streszczenie**

Filtry adaptacyjne są szeroko wykorzystywane w wielu zagadnieniach z obszaru m.in. telekomunikacji i akustyki. Są one wykorzystywane w rozwiązaniach związanych z eliminacją echa - tak hybrydowego, jak i akustycznego - w systemach telekomunikacyjnych. Są też stosowane przy aktywnej redukcji hałasów. W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie zbieżności i skuteczności wybranych algorytmów adaptacyjnych (*NLMS*, *PNLSM* i *APA*) w zastosowaniu do rzeczywistych sygnałów zawierających odgłosy pracy silników spalinowych. W pracy zbadano zachowanie algorytmów zarówno dla sygnałów odwzorowujących odgłosy silnika pracującego ze stałą prędkością obrotową, jak i podczas zwiększania liczby obrotów w jednostce czasu. Jako przedmiot badań nad wydajnością algorytmów wyróżniono dwa rodzaje silników o zapłonie: iskrowym i samoczynnym. Implementacji algorytmów dokonano w interpretowanym, skryptowym języku programowania wysokiego poziomu Python.

**Słowa kluczowe:** filtracja adaptacyjna, cyfrowe przetwarzanie sygnału, redukcja hałasu

## **Analysis of the convergence and effectiveness of adaptive filtration algorithms in the application to reduce the noise of internal combustion engines used in passenger cars**

### **Summary**

Adaptive filters are widely used in many issues related to, among others, telecommunications and acoustics. They are used in solutions related to the elimination of echoes - both hybrid and acoustic - in telecommunications systems. They are also used in active noise reduction systems. The article presents the results of research aimed at determining the convergence and effectiveness of selected adaptive algorithms (*NLMS*, *PNLSM* and *APA*) in application to real signals containing the sounds of combustion engines. The work examines the behavior of algorithms for both the signals representing the noise of an engine operating at a constant speed, as well as during the increase in the number of revolutions per unit of time. As the object of research on the efficiency of algorithms, two types of spark-ignition and self-ignition engines were distinguished. The implementation of the algorithms was done in the interpreted Python programming high-level scripting language.

**Keywords:** adaptive filtration, digital signal processing, noise reduction

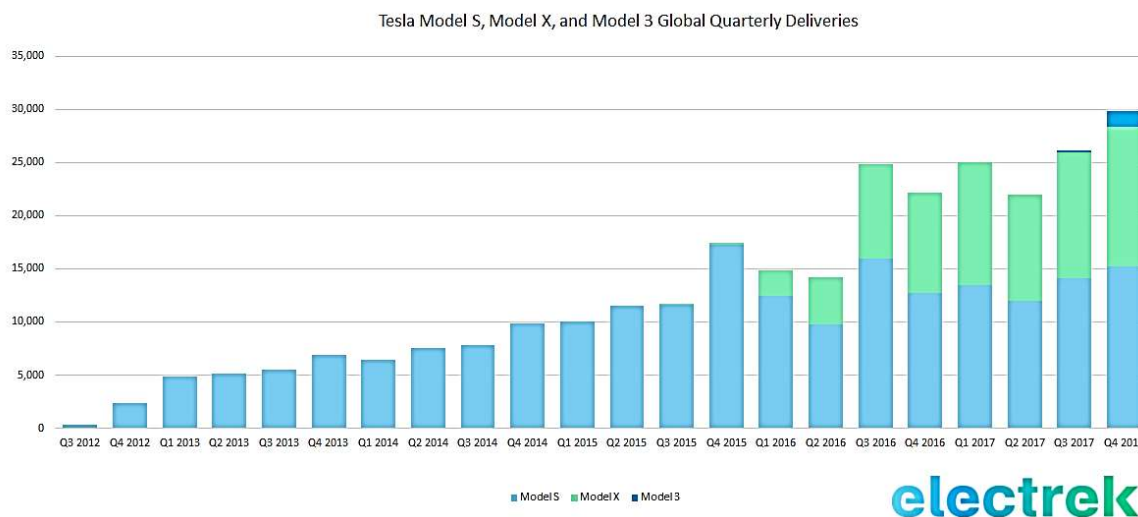
### **1. Wstęp**

Liczba aut rejestrowanych na świecie rośnie z roku na rok. W 2015 roku po drogach na całym świecie poruszało się 1,1 miliarda samochodów. Tak duża liczba pojazdów wywiera znaczącą antropopresję, która przejawia się emisją spalin, hałasu i odpadów (Sulich i Zema, 2017a, s. 580). Co więcej, liczba samochodów stale rośnie. Według szacunków *European Automobile Manufacturers' Association* w 2025 będzie 1,5 mld aut, natomiast w 2040 ich liczba sięgnie ok. 2 mld. Producenci samochodów stale ulepszają swoje

konstrukcje dbając tak o środowisko, jak i komfort podróżnych. Coraz większy nacisk kładziony jest na obniżenie poziomu hałasu docierającego do kierowcy i pasażerów. Tak podczas krótkich podróży, jak i – zwłaszcza – pokonywania długich tras hałas w kabinie może być uciążliwy dla podróżnych.

Aspekt środowiskowy transportu nie jest jedynym, w którym zagadnienie hałasu jest istotne. Równie ważnymi są warunki pracy zawodowych kierowców i komfort jazdy pasażerów (Engel, 2001, s.119-128). Hałas w kabinie kierowcy może stać się uciążliwym i niekorzystnym zjawiskiem wpływającym na zdrowie (Puzyna. 1979, s. 12-14). Jednak wraz z rozwojem techniki rośnie liczba zagrożeń na jakie narażone jest społeczeństwo. Dlatego tak ważnym jest poszukiwanie metod redukcji hałasu wewnątrz pracujących pojazdów (Sulich i Zema, 2017b, s. 9; Engel, 2001, s. 119-128).

Z uwagi na czynniki ekologiczne i ergonomiczne, w ostatnich latach obserwuje się coraz większe zainteresowanie autami o napędzie elektrycznym, czego potwierdzeniem są m.in. kwartalne wolumeny produkcji aut elektrycznych marki Tesla pokazane na Rys.1. Co więcej, samochody elektryczne mogą przyczynić się do zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko. Badania i rozwój technologii, które redukują antropopresję są częścią wielu narodowych strategii na rzecz budowy tzw. „zielonej gospodarki” (Grudziński i Sulich, 2018, s. 365). Dlatego badania nad redukcją hałasu wpisują się również w trend proekologiczny.



Rys. 1. Liczba produkowanych samochodów elektrycznych marki Tesla™ (Electrec, 2018).

Pomimo ukazanego wzrostu popularności samochodów elektrycznych, wciąż jednak dominują pojazdy napędzane silnikami spalinowymi. Niezależnie czy poruszające się auto jest napędzane silnikiem o zapłonie iskrowym, czy o zapłonie samoczynnym pracy jednostki napędowej towarzyszy hałas. Występujące podczas pracy silników benzynowych

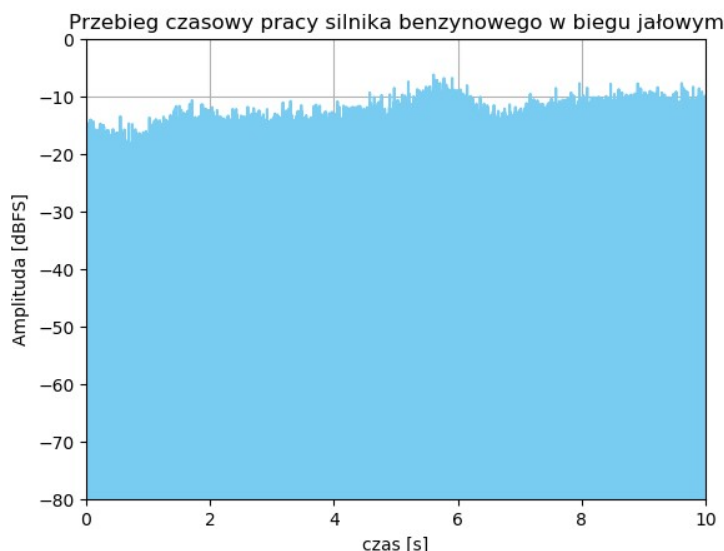
i wysokoprężnych zjawiska aerodynamiczne są źródłem fal dźwiękowych i drgań. Hałas ten jest związany z ruchem części mechanicznych silnika i zależy m.in. od cykli pracy układu korbowo-tłokowego, pracy pompy paliwowej, mechanizmu rozrządu i innych podzespołów.

Zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych w komorze silnika i kabinie pasażerskiej ogranicza hałas docierający do kierowcy i pasażerów, jednak pomimo zastosowania materiałów dźwiękochłonnych jest on wciąż obecny i nierzadko dokuczliwy. Oprócz pasywnych metod eliminacji hałasów dostępne są rozwiązania aktywne. Najczęściej wykorzystują one mechanizm filtracji adaptacyjnej z wykorzystaniem algorytmów cyfrowych. Algorytmy te analizują przebieg sygnału hałasu silnika i dostosowują swoje parametry w czasie tak, aby wygenerować estymatę sygnału silnika przesuniętą w fazie. Ten wygenerowany cyfrowo sygnał jest wykorzystany do redukcji hałasu w kabinie pasażerskiej.

W niniejszej pracy skupiono się na analizie skuteczności działania adaptacyjnych algorytmów filtracyjnych. Algorytmy te są podstawą działania cyfrowych systemów aktywnej redukcji hałasu. Klasycznym algorytmem stosowanym w problematyce aktywnej redukcji hałasu jest algorytm *LMS* (ang. *LeastMeanSquares*). Jest on algorytmem nierekursywnym. Algorytmy tego typu nadają się znakomicie do zrównoleglenia (Dobrucki i inni, 2015; Bożejko i inni, 2011, Bożejko i inni 2010). Z tego powodu w niniejszej pracy poddawano analizie jedynie algorytmy nierekursywne. Szczegółowy opis algorytmu znajduje się w rozdziale trzecim.

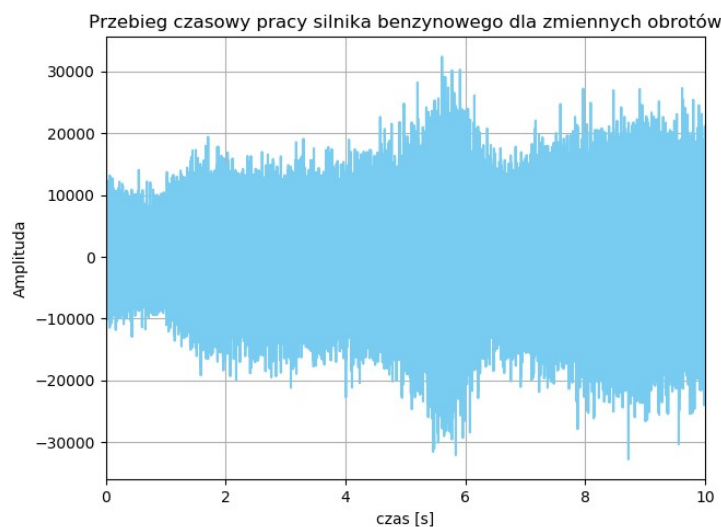
## **2. Analiza akustyczna pracy silnika spalinowego**

W niniejszym rozdziale przedstawiona została analiza akustyczna pracy dwóch silników spalinowych. Pierwszym z badanych obiektów jest silnik benzynowy (o zapłonie iskrowym) o pojemności skokowej 3301 cm<sup>3</sup> zamontowany w samochodzie klasy K. Na Rys. 2 ukazany został przebieg zmian ciśnienia akustycznego silnika benzynowego. Widoczne są wahania poziomu ciśnienia akustycznego, odwzorowujące nieciągły charakter pracy silnika. Ponadto widoczne są fluktuacje związane z niewielkimi zafalowaniami prędkości obrotowej podczas pracy silnika na biegu jałowym.



Rys. 2. Przebieg zmian ciśnienia akustycznego odgłosów pracy silnika benzynowego na biegu jałowym.

Z kolei na rysunku nr 3 przedstawiono przebieg czasowy sygnału akustycznego pracy silnika o zapłonie iskrowym pracującego ze zmiennymi w czasie obrotami. Widoczny jest wzrost poziomu sygnału akustycznego wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.



Rys. 3. Przebieg sygnału pracy silnika benzynowego – zmienne obroty.

Silniki o zapłonie iskrowym generują charakterystyczny dźwięk na skutek zjawisk aerodynamicznych występujących podczas procesów ssania, spalania paliwa i odprowadzanie spalin. Zmiana ciśnienia wewnątrz układu ssania wywoływane przesunięciem tłoka w cylindrze prowadzą do powstawania drgań słupa gazu. W momencie otwarcia lub zamknięcia zaworów ssących częstotliwość drgań słupa sprężonej mieszaniny powietrza i benzyny jest niska. Rośnie ona jednak podczas przejścia z procesu sprężania do spalania. W wyniku gwałtownego spalania mieszanki powietrza z paliwem powstają wybuchy będące źródłem fal dźwiękowych o charakterze nieciągłym. Kolejnym czynnikiem generującym

hałas jest układ wydechowy, wewnątrz którego spaliny wypychane są z dużą energią. „Poziom tego hałasu dochodzi niejednokrotnie do 130 dB” (Puzyna, 1972, s. 12). Częstotliwość wybuchów spalania w silniku benzynowym wyraża się wzorem (Engel, 2001, s.113):

$$f = k \frac{ni}{60\tau} [Hz], \quad (1)$$

gdzie:

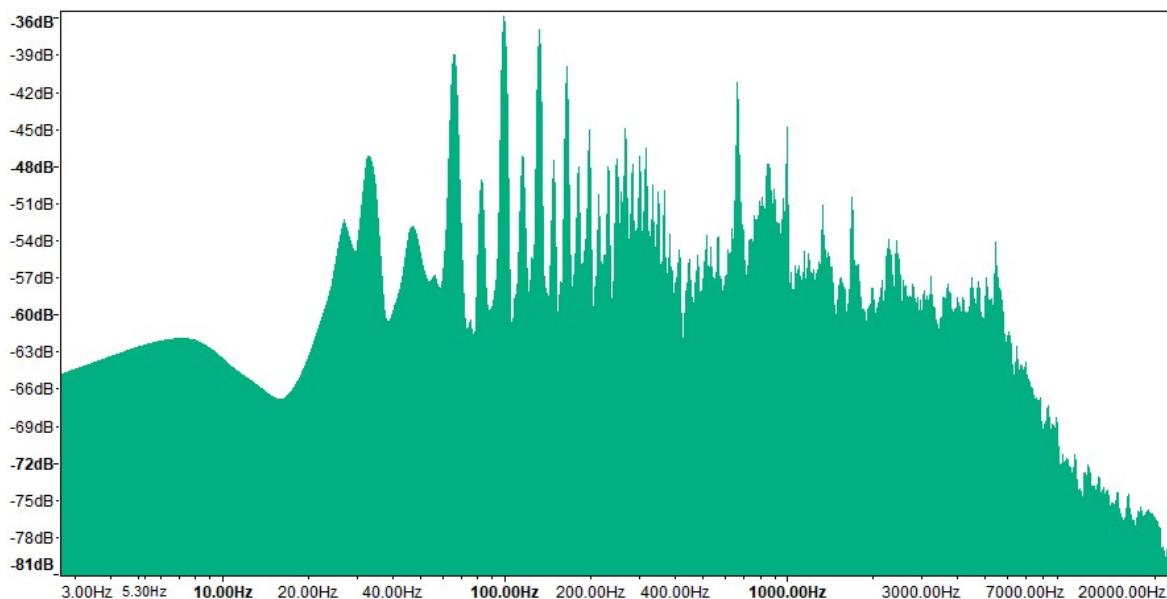
$k = 1, 2, 3, \dots$ ,

$n$  - liczba obrotów wału na minutę,

$i$  = liczba cylindrów,

$\tau$  = współczynnik ( $\tau=1$  dla silników dwusuwowych,  $\tau=2$  dla silników czterosuwowych).

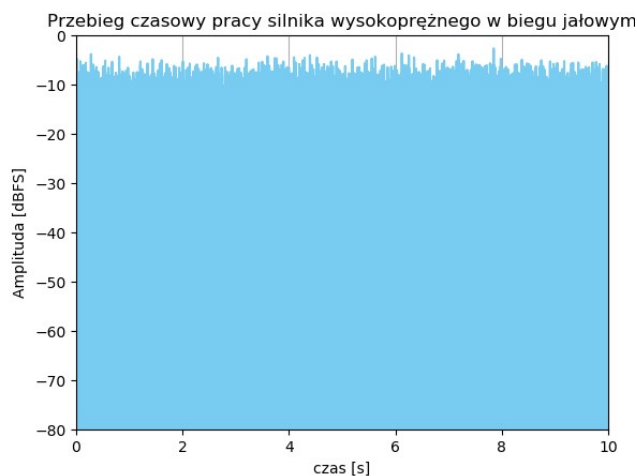
Na rysunku 4 przedstawiona została charakterystyka widmowa pracy silnika spalinowego pierwszego z badanych obiektów podczas pracy na biegu jałowym ze stałą prędkością obrotową. Widać wyraźne składowe harmoniczne, przy czym największy poziom wykazuje składowa o częstotliwości około 100 Hz.



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa silnika benzynowego w biegu jałowym.

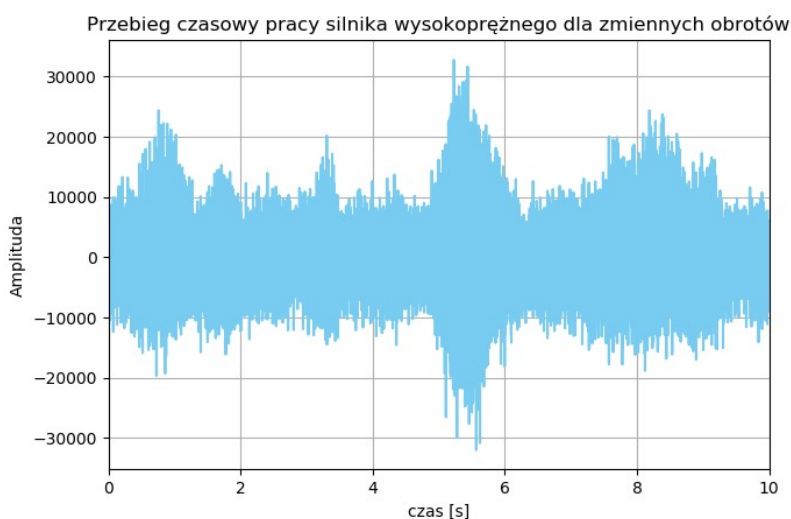
Drugim z badanych obiektów jest silnik wysokoprężny zamontowany w samochodzie klasy B. Silnik ten ma pojemność skokową 1896 cm<sup>3</sup> i maksymalny moment obrotowy 202 Nm przy 1900 obrotach na minutę. Poziom hałasu generowanego przez taki typ silnika jest zależny m.in. od: gęstości powietrza, grubości i rodzaju materiału, z jakiego wykonane są ścianki cylindra, średnicy cylindra, ciśnienia początkowego i końcowego sprężania, wykładnika politropy sprężania, amplitudy pulsacji ciśnienia gazów w cylindrze (Engel, 2001, s. 113). Badania empiryczne potwierdziły również przewagę efektywności silnika Diesla niż

silnika benzynowego, choć silnik wysokoprężnie jest dużo głośniejszy od benzynowego przez co charakteryzuje się „niską kulturą pracy” (Rybicki, 2008).



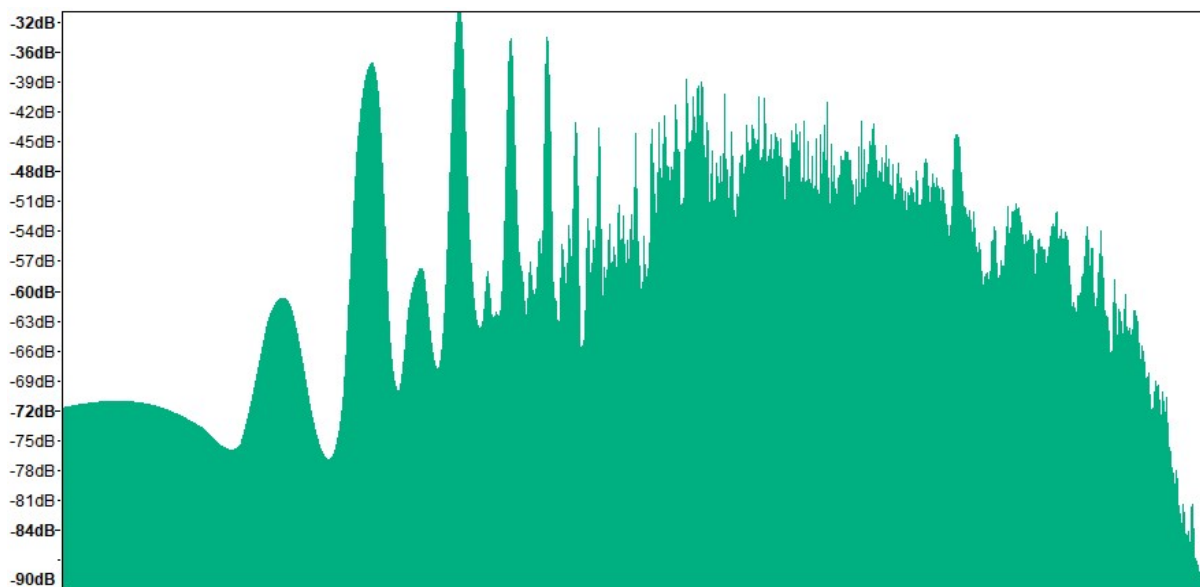
Rys. 5. Przebieg zmian ciśnienia akustycznego odgłosów pracy silnika wysokoprężnego podczas pracy na biegu jałowym.

Na Rys.5. przedstawiony został przebieg zmian ciśnienia akustycznego silnika benzynowego w czasie. Poziom ciśnienia akustycznego podczas pracy silnika o zapłonie samoczynnym jest zauważalnie wyższy niż poziom ciśnienia akustycznego charakteryzującego pracę silnika o zapłonie iskrowym. Także tutaj zauważalne są wahania poziomu ciśnienia akustycznego, odwzorowujące nieciągły charakter pracy silnika.



Rys.6. Przebieg sygnału pracy silnika o zapłonie samoczynnym – zmienne obroty.

Na rysunku 6 przedstawiony został przebieg sygnału odwzorowującego przebieg pracy silnika wysokoprężnego podczas pracy ze zmienną prędkością obrotową. Także w tym przypadku widoczny jest przyrost wartości sygnału wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.



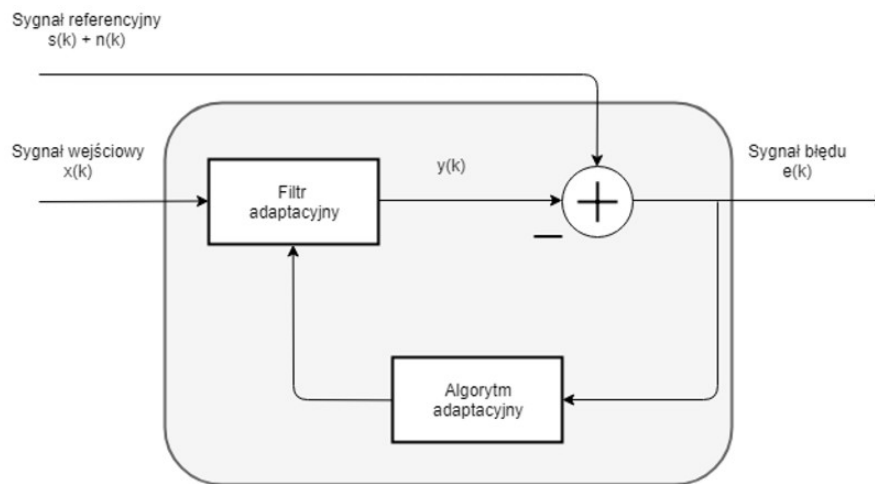
Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa silnikawysokoprężnegow biegu jałowym.

Na rysunku 7 zaprezentowana została charakterystyka widmowa pracy silnika o zapłonie samoczynnym podczas pracy na biegu jałowym. Widoczne są wyraźne składowe harmoniczne, przy czym największy poziom wykazuje składowa o częstotliwości około 60 Hz. Dla wyznaczenia charakterystyki widmowej odgłosów pracy obu silników wykorzystano program Audacity, przy czym zastosowano okno Hanna o długości 16384 próbek.

### 3. Filtracja adaptacyjna

Filtr adaptacyjny jest przykładem filtra o zmiennych w czasie parametrach. Układ adaptacyjny wykorzystywany m.in. w problemie aktywnej redukcji hałasu składa się z dwóch części. Pierwszą z nich stanowi filtr, którego rolą jest ekstrakcja zbędnych danych z sygnału. Drugą część stanowi algorytm adaptacyjny. Jego rolą jest regulacja współczynników filtra tak, aby układ reagował na zmiany sygnału wejściowego. Zadaniem filtra adaptacyjnego jest korekcja lub identyfikacja nieznanego systemu, jakim może być np. odpowiedź impulsową badanego pomieszczenia. Ze względu na stabilność w takich sytuacjach stosuje się filtry o skończonej odpowiedzi impulsowej (Siemens, 2018). W przeciwieństwie do klasycznego, niezmiennego w czasie filtra liniowego, filtr adaptacyjny charakteryzuje nieliniowość. Wynika to z faktu, że filtr tego typu koryguje swoje parametry na podstawie sygnału wejściowego o zmieniającej się w czasie charakterystyce. W przypadku, gdy charakterystyka sygnału pozostaje niezmienna w czasie filtr adaptacyjny stanowi realizację filtra liniowego. Jednakże najczęściej współczynniki filtra adaptacyjnego zmieniają się w czasie, przez co filtr dostosowuje się do swoich wymaganych parametrów filtracji. Realizacja filtra adaptacyjnego wymaga obecności sygnału referencyjnego. Sygnał ten stanowi rodzaj wzorca, względem, którego algorytm realizujący funkcję filtra adaptacyjnego automatycznie dobiera

współczynniki (Paulo i Diniz, 2013). Na rysunku 8 przedstawiony został model układu realizującego funkcję filtracji adaptacyjnej. Sygnał referencyjny – opisany, jako  $s(k)$  wraz z addytywną składową  $n(k)$  stanowiącą rodzaj zanieczyszczenia - jest skorelowany z sygnałem wejściowym  $x(k)$ , gdzie  $k$  jest indeksem kolejnej próbki dźwiękowej. Sygnał  $e(k)$ , nazywany sygnałem błędu, jest różnicą pomiędzy sygnałem wychodzącym z filtra adaptacyjnego  $y(k)$  i sygnałem referencyjnym.



Rys. 8. Schemat działania procesu filtracji adaptacyjnej.

Istnieje wiele praktycznych realizacji układów filtracji adaptacyjnej. Podstawę jednej z pierwszych stanowi algorytm *LMS* (ang. *Least Mean Squares*) zaproponowany w 1959 roku przez Bernarda Widrowa i Teda Hoffa. Jest to rodzaj algorytmu, który minimalizuje funkcję celu, którą w tym przypadku stanowi różnica pomiędzy sygnałem referencyjnym a wyjściem filtra. Klasyczny algorytm *LMS* (ang. *Least Mean Squares*), który stanowi podstawę całej rodziny nierekursywnych algorytmów realizujących proces filtracji adaptacyjnej wykorzystuje metodę najszybszego spadku. Założeniem tej metody jest iteracyjnie wyznaczanie optymalnego przybliżenie wektora  $\mathbf{h}$  zawierającego wartości wag filtra adaptacyjnego. Wektor współczynników  $\mathbf{h}$  jest jednak nieznany. Wyznacza się, więc jego estymatę zadaną następującym równaniem:

$$\hat{y}(k) = \hat{\mathbf{h}}^T \mathbf{x}(k) \quad (1)$$

Na rysunku 9 przedstawiony został schemat układu aktywnej redukcji hałasu. Jedną z części układu stanowi filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR) z korygowanymi wagami  $h_1(k), \dots, h_M(k)$ . Oznaczenie na wejściu filtra  $u(k)$  to bieżąca wartość wejściowego sygnału, a wartości  $u(k-1), \dots, u(k-M+1)$  przedstawiają poprzednie wartości sygnału wejściowego.  $M$  oznacza rząd filtra. Dane wejścia są mnożone przez zmieniające się wagi filtra  $h_1(k), \dots, h_M(k)$ . Sygnał na wyjściu filtra dany jest równaniem:



$$\hat{y}(k|U_n) = \sum_{n=1}^N \hat{h}_n u(k - n + 1) = h^T u(k), \quad (2)$$

gdzie:

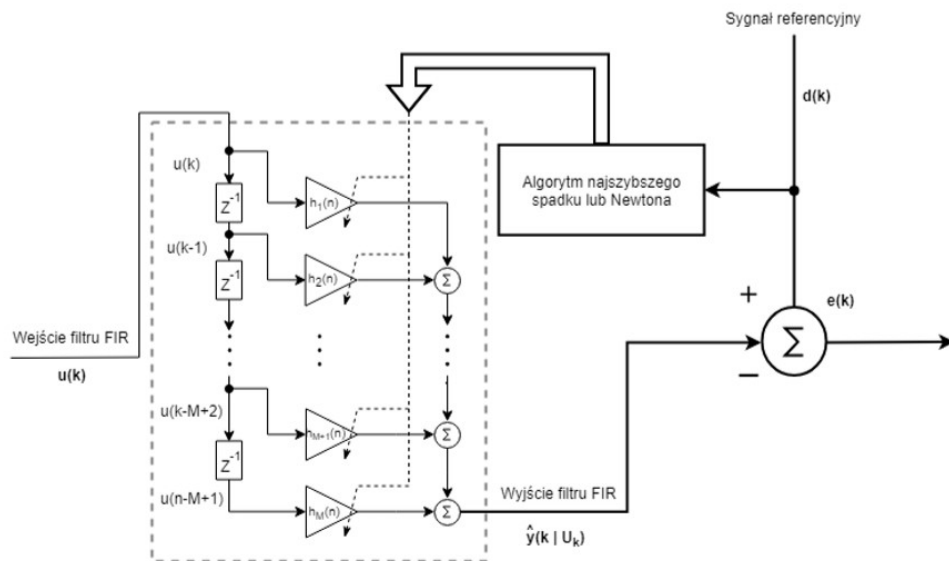
$U_n$ - przestrzeń wektorowa  $u(k - 1), \dots, u(k - M + 1)$  wygenerowaną przez próbki wejściowe sygnału (Rutkowski, 1994, s. 14).

Różnicę sygnału referencyjnego z estymatą sygnału  $\hat{y}(k|U_n)$  definiuje się, jako błąd estymacji  $e(k)$  dany równaniem:

$$e(k) = d(k) - \hat{y}(k|U_n). \quad (3)$$

Błąd estymacji spełnia rolę miary adaptacji wektora wag filtru  $h_1(k), \dots, h_M(k)$ . Aby zwiększyć szybkość adaptacji algorytmu stosuje modyfikację w postaci multiplikatywnej składowej nazywanej krokiem korekcji  $\mu$  (ang. *step size*) (Rutkowski, 1994, s. 124). Korekcja wektora wag wyraża się wzorem:

$$\hat{\mathbf{h}}(k + 1) = \hat{\mathbf{h}}(nk) + \mu \mathbf{x}(k) e(k). \quad (4)$$



Rys. 9. Schemat układu aktywnej redukcji hałasu z filtrem adaptacyjnym o skończonej odpowiedzi impulsowej. Algorytm *NLMS* (ang. *NormalisedLeastMeanSquare*) stanowi modyfikację pierwotnego algorytmu *LMS*. W przypadku algorytmu *NLMS* współczynnik korekcji jest dany równaniem:

$$\mu(n) = \frac{\mu_0}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)}. \quad (4)$$

Dla algorytmu *NLMS* wartość współczynników wagowych filtra może być przedstawiona następującą zależnością:

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \frac{\mu_0}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)} \mathbf{x}(n)e(n). \quad (5)$$

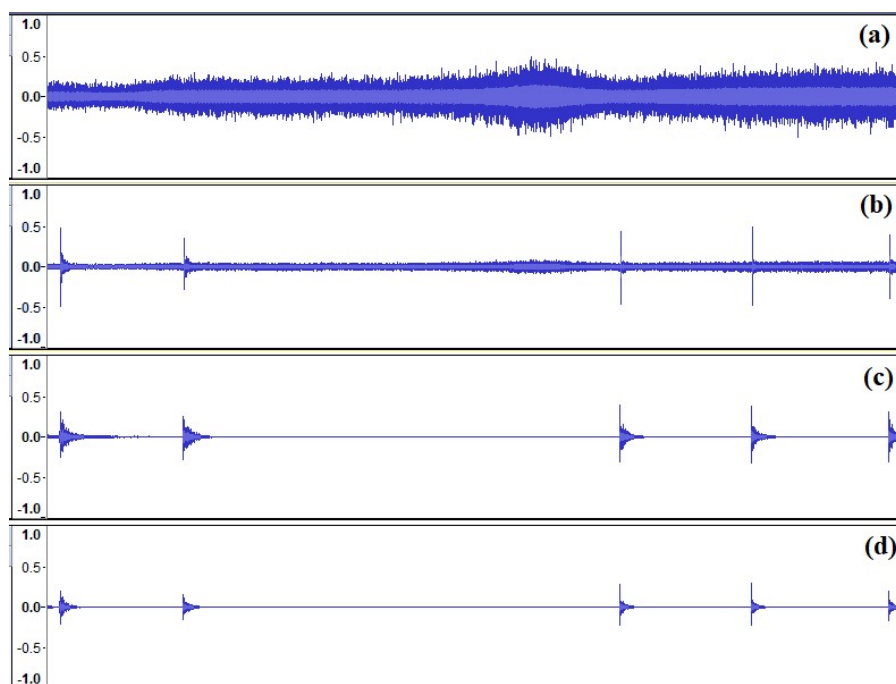
#### 4. Badania empiryczne i omówienie otrzymanych wyników

W części empirycznej zastosowano autorski program napisany w języku skryptowym, interpretowanym języku programowania *Python*. Sygnałem testowym hałasu były odgłosy pracy silnika:

a) silnik benzynowy (o zapłonie iskrowym) o pojemności skokowej 3301 cm<sup>3</sup> zamontowany w samochodzie klasy K.

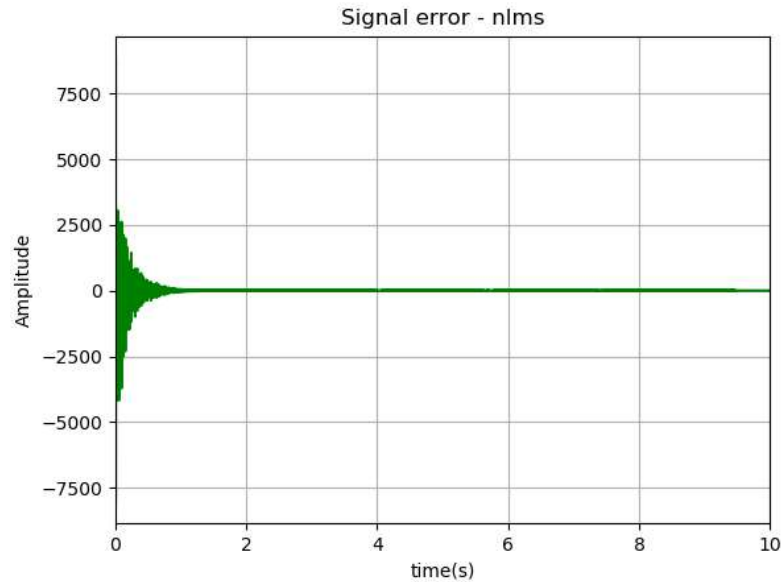
b) Wysokoprężnego w samochodzie klasy B, z pojemnością skokową 1896 cm<sup>3</sup> i maksymalnym momencie obrotowym 202 Nm przy 1900 obrotach na minutę.

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki filtracji adaptacyjnej z wykorzystaniem algorytmów *NLMS* i *AP* dla sygnałów pracy silników tak o zapłonie iskrowym, jak i zapłonie samoczynnym. Na rysunku 10 przedstawiono symulację procesu aktywnej redukcji hałasu silnika o zapłonie iskrowym. Sygnał (a) zawiera odgłosy pracy silnika rejestrowany w komorze silnika, sygnał (b) jest rejestracją odgłosów pracy silnika w kabinie pasażerskiej, przy czym sygnał ten zawiera też składową addytywną będącą zapisem odgłosu klaskania. Sygnał (c) jest wynikiem symulacji procesu aktywnej redukcji odgłosów pracy silnika z wykorzystaniem algorytmu *NLMS*, a sygnał (d) jest wynikiem procesu aktywnej redukcji hałasu silnika z wykorzystaniem algorytmu *AP*.

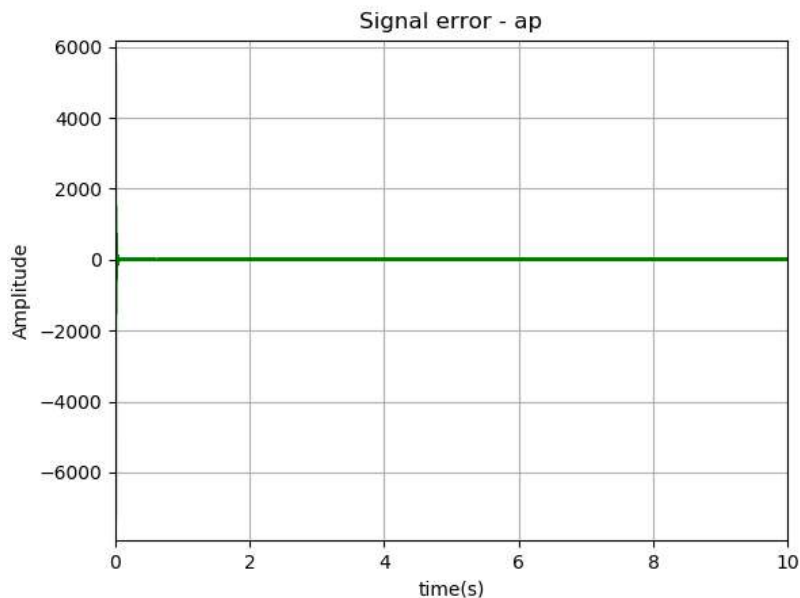


Rys. 410. Symulacja redukcji hałasu silnika benzynowego, gdzie :hałas z komory silnika benzynowego(a), sygnał referencyjny zanieczyszczony hałasem z komory silnika (b), zastosowanie algorytmu *NLMS* (c) i *AP* (d).

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono przebieg sygnału błędu w czasie. Sygnał ten odzwierciedla zbieżność algorytmów adaptacyjnych dla sygnału akustycznego silnika o zapłonie iskrowym pracującego na biegu jałowym. Parametry algorytmów adaptacyjnych wynoszą odpowiedni:  $M=200$ , krok korekcji  $0,8$ . Można zauważyć, że sygnał błędu zbiega do zera znacznie szybciej w przypadku algorytmu AP niż NLMS.

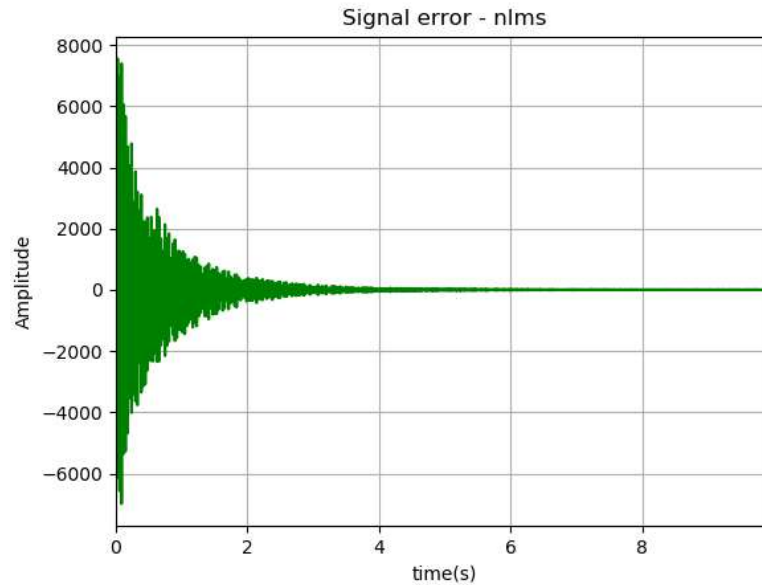


Rys. 41. Przebieg sygnału błędu przy zastosowaniu algorytmu NLMS. Źródło hałasu to silnik o zapłonie iskrowym pracujący nabiegu jałowym Parametry algorytmu:  $M=200$ ,  $\mu=0,8$ .

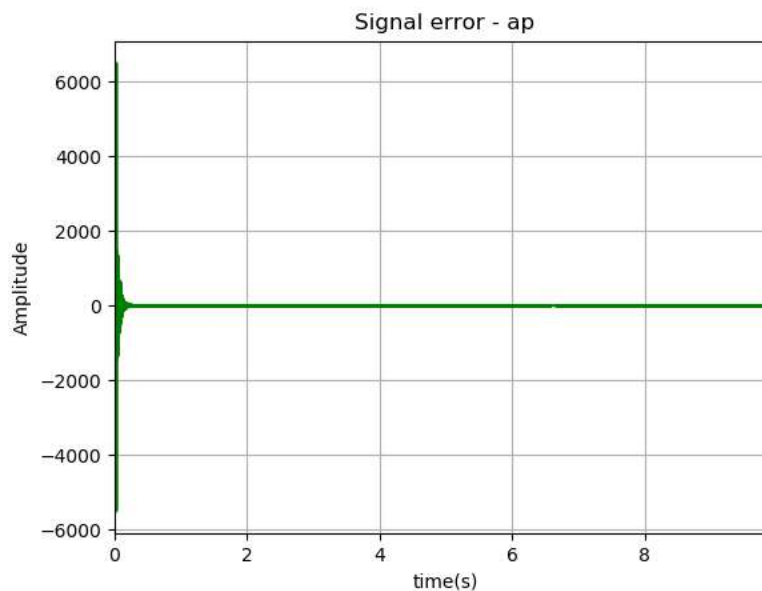


Rys. 12. Przebieg sygnału błędu przy zastosowaniu algorytmu AP. Źródło hałasu to silnik o zapłonie iskrowym pracujący nabiegu jałowym Parametry algorytmu:  $M=200$ ,  $\mu=0,8$ .

Z kolei na rysunkach 13 i 14 przedstawiono przebieg sygnału błędu w czasie dla algorytmów NLMS i AP w przypadku zastosowania filtra o 1000-cu współczynników i takim samym jak poprzednio kroku korekcji, wynoszącym 0,8.



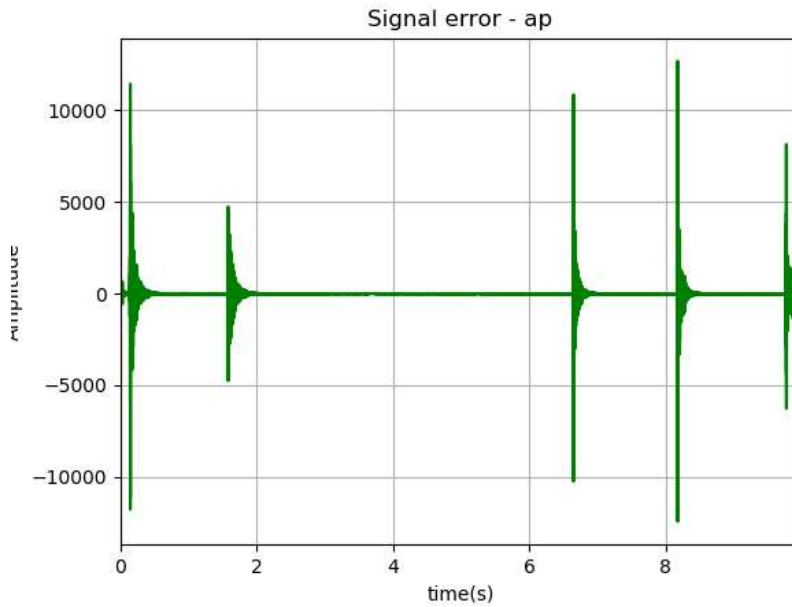
Rys. 13. Przebieg sygnału błędu przy zastosowaniu algorytmu NLMS. Źródło hałasu to silnik o zapłonie iskrowym pracujący nabiegu jałowym Parametry algorytmu:  $M=1000$ ,  $\mu=0,8$ .



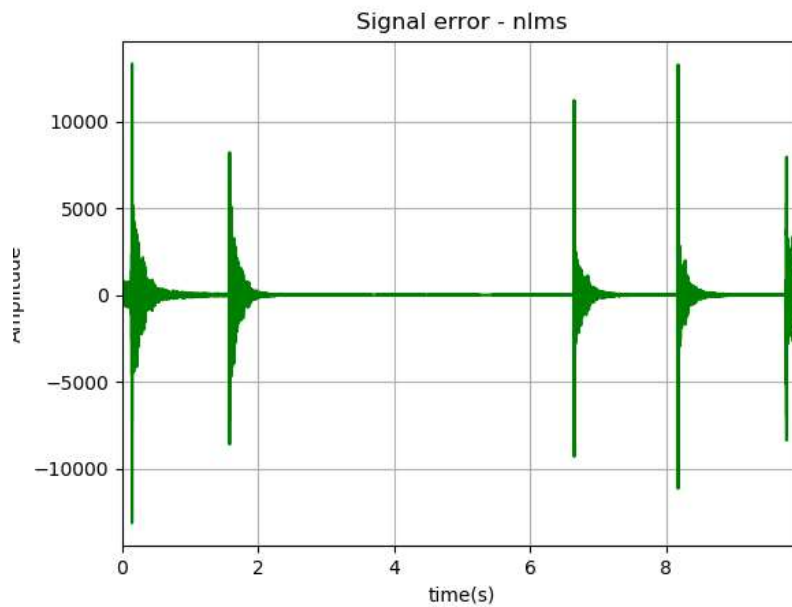
Rys. 14. Przebieg sygnału błędu przy zastosowaniu algorytmu AP. Źródło hałasu to silnik o zapłonie iskrowym pracujący nabiegu jałowym Parametry algorytmu:  $M=1000$ ,  $\mu=0,8$ .

Na kolejnych rysunkach przedstawiono przebieg sygnału błędu dla obu testowanych algorytmów, przy czym do sygnału z kabiny dodano addytywny sygnał będący rezultatem rejestracji procesu klaskania. W momencie wystąpienia oklasków korelacja pomiędzy sygnałem pracy silnika rejestrowanym w komorze silnika, a sygnałem z kabiny pasażerskiej

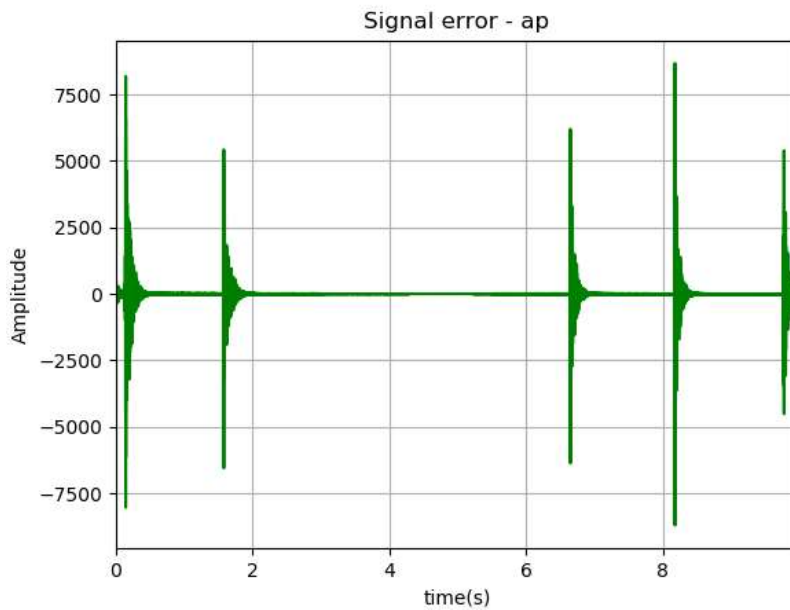
spadała. Powodowało to powstawanie na wykresie sygnału błędu lokalnych maksimum w okolicach 2, 7 i 8 i 10 sekundy.



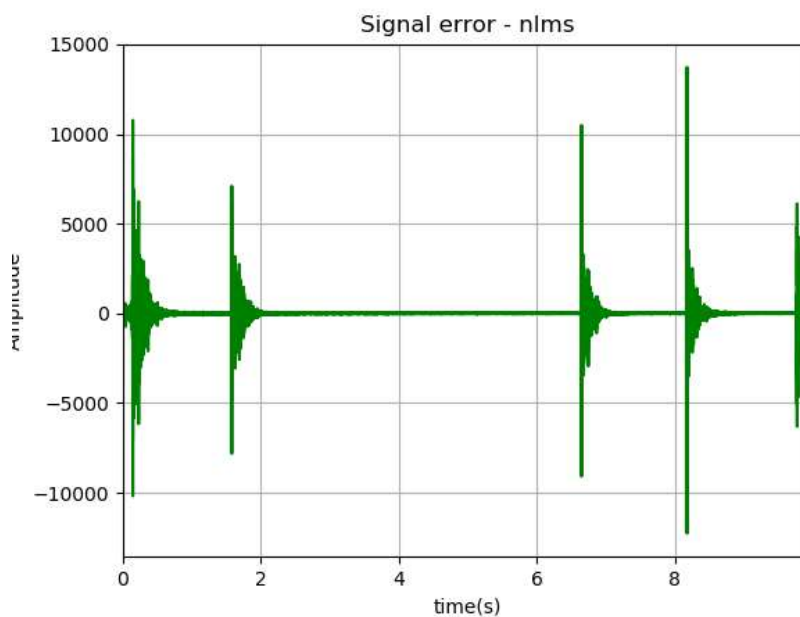
Rys. 15.Przebieg sygnału błędu z widocznym odgłosem klaskania przy zastosowaniu algorytmu AP. Silnik o zapłonie iskrowym pracujący nabiegu jałowym Parametry algorytmu:  $M=200$ ,  $\mu=0,8$ .



Rys.16.Przebieg sygnału błędu z widocznym odgłosem klaskania przy zastosowaniu algorytmu NLMS. Silnik o zapłonie iskrowym pracujący nabiegu jałowym Parametry algorytmu:  $M=200$ ,  $\mu=0,8$ .



Rys.17.Przebieg sygnału błędu z widocznym odgłosem klaskania przy zastosowaniu algorytmu AP. Silnik o zapłonie iskrowym pracujący ze zmiennymi obrotami. Parametry algorytmu:  $M=1000$ ,  $\mu=0,8$ .

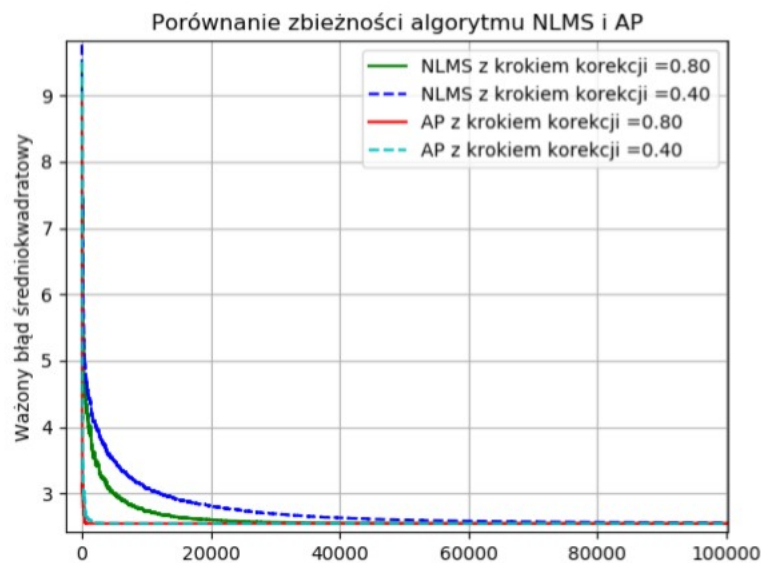


Rys.18.Przebieg sygnału błędu z widocznym odgłosem klaskania przy zastosowaniu algorytmu NLMS.Silnik o zapłonie iskrowym pracujący ze zmiennymi obrotami. Parametry algorytmu:  $M=1000$ ,  $\mu=0,8$ .

## 5. Podsumowanie

W pracy zbadano skuteczność filtracji hałasu generowanego przez silniki spalinowe o zapłonie iskrowym i samoczynnym z wykorzystaniem filtrów adaptacyjnych wykorzystujących algorytmy NLMS i AP. Każdy z algorytmów wykazał się stabilnością. Niezależnie od charakteru sygnału (czy był to silnik pracujący ze stałą czy zmienną w czasie

prędkością obrotową) zauważyć należy znacząco szybszą zbieżność algorytmu *AP* od algorytmu *NLMS*(Rysunek 19).



Rys.19. Porównanie zbieżności testowanych algorytmów adaptacyjnych w problemie aktywnej redukcji hałasu. W każdym z przypadków zwiększenie kroku korekcji zwiększało szybkość procesu adaptacji. Zwiększanie rzędu filtra powodowało spadek szybkości adaptacji, jednak zwiększało jej skuteczność. Algorytmy realizujące proces filtracji adaptacyjnej mogą być – a coraz częściej już są – wykorzystywane w procesie aktywnej redukcji hałasu.

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0045/18.

## 6. Literatura

Bożejko W., Dobrucki A., Walczyński M. (2011), LMS algorithms parallelization in GPGPU environment, *Elektronika*, 2011, R. 52, nr 5, 49-53.

Bożejko W., Dobrucki A., Walczyński M. (2010), Parallelizing of digital signal processing with using GPU, *Signal Processing - Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications SPA 2010*, IEEE Conference Records #17892.

Dobrucki A., Walczyński M., Bożejko W. (2015), Family of Parallel LMS-based Adaptive Algorithms of Echo Cancellation, *Computational Methods in Science and Technology* 21(4) (2015), 191-200.

Engel Z. (2001), *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 2001,

Grudziński A., Sulich A. (2018), *Green European Integration*. W: Staníčková M. et. al. (eds),

Lambert F., Tesla confirms having produced its 300,000th electric car  
<https://electrek.co/2018/02/14/tesla-delivered-300000th-vehicle/?pushup=1> [dostęp:  
20.12.2018r.].

Number of passenger cars ..., <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/> [dostęp: 05.01.2019]

Puzyna Cz. (1979), Hałas w przemyśle, Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa, s.12-14

Rutkowski L. (1994), Filtry adaptacyjne i adaptacyjne przetwarzanie sygnałów, wydanie pierwsze, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa.

Rybicki R. (2008), Diesel czy benzyna? - Oto jest pytanie, Auto Świat,  
<https://www.autoswiat.pl/testy/testy-nowych-samochodow/diesel-czy-benzyna-oto-jest-pytanie/yml852k> [dostęp 06.12.2018].

Sulich A., Zema T. (2017a), Społeczna odpowiedzialność biznesu a zielone miejsca pracy. Marketing i Rynek, nr 11, vol 24, s. 579-591.

Sulich A., Zema T. (2017b), Problem zarządzania ryzykiem we współczesnej filozofii techniki. W: Olkiewicz M., Woźniak M., Drewniak M., Chmura J. (red.), Nauka i biznes - wyzwania XXI wieku. Cz. 2, Wydawnictwo Naukowe Intellect, Wałęńczów, s. 8-21.



# NAUKA, BADANIA I DONIESIENIA NAUKOWE 2019

NAUKI TECHNICZNE  
I ŚCISŁE

Część I

ISBN 978-83-951445-7-8