

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**MARTIN
HAVLÍK**



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havlík** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **438293**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Spalování biomasy v bublinkující fluidní vrstvě v režimu oxyfuel spalování

Název diplomové práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Tématem této práce je zbilancovat spalování biomasy při fluidním spalování v režimu oxyfuel. Práce bude obsahovat tyto body:

- 1) Literární rešerše zaměřená na fluidní spalování v režimu oxyfuel.
- 2) Bilanční výpočet oxyfuel spalovacího režimu.
- 3) Experimentální ověření spalování biomasy v oxyfuel a vzduchovém režimu se zaměřením na bilanci uhlíku.
- 4) Porovnání chování tvorby nedopalu při vzduchovém a oxyfuel spalování.

Seznam doporučené literatury:

KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 0409902330
HRDLIČKA, J., M. VODIČKA, P. SKOPEC, F. HRDLIČKA and T. DLOUHÝ. CO₂ Capture by Oxyfuel Combustion. In: F. WINTER, R. A. AGARWAL, J. HRDLIČKA and S. VARJANI, ed. CO₂ Separation, Purification and Conversion to Chemicals and Fuels. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018, s. 55-78. ISBN 978-981-13-3295-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Skopec, Ph.D., ústav energetiky FS

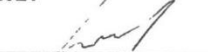
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **25.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.06.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**


Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

22.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 30. 5. 2020

.....

Martin Havlík

Anotační list

Jméno autora:	Martin Havlík
Název DP:	Spalování biomasy v bublinkující fluidní vrstvě v režimu Oxyfuel spalování
Anglický název:	Combustion of biomass in a bubbling fluidized bed in Oxyfuel combustion mode
Akademický rok:	2019/2020
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Energetika
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
Konzultant:	-
Bibliografické údaje:	Počet stran: 77 Počet obrázků: 16 Počet diagramů: 21 Počet tabulek: 12 Počet příloh: 11
Klíčová slova:	Fluidní spalování, Oxyfuel, CCS Technologie, Biomasa
Keyword:	Fluidized bed combustion, Oxy-Fuel, CCS technology, Biomass

Anotace

Tato práce pojednává o fluidním spalování biomasy se zaměřením na chod v režimu Oxyfuel. V úvodní části je uvedena podstata využití biomasy v energetice. Následně práce pojednává o fluidním spalování. Třetí částí rešerše obsahuje popis metod CCS se zaměřením na Oxyfuel spalování, přičemž rešerše je zakončena teoretickými předpoklady o Oxyfuel spalování biomasy v ohledu na množství tvořeného nedopalu, přičemž je následně uveden i experiment o intenzitě nedopalu vůči poměru okysličovadla a recirkulovaných spalin, který proběhl na pekingské univerzitě.

Práce se prakticky opírá o experimentální měření velikosti nedopalu při spalování biomasy konvenční metodou a metodou Oxyfuel pro různé hladiny koncentrace kyslíku ve spalinách.

Abstract

This work deals with fluidized bed biomass combustion with a focus on operation in the Oxyfuel mode. The introductory part presents the essence of the use of biomass in energy. Subsequently, the work deals with fluidized bed combustion. The third limits of the restriction include a description of the CCS method with a focus on Oxyfuel combustion, the threat ends with theoretical assumptions about Oxyfuel biomass combustion in terms of amount of non-combustion, search is an attempt and intense non-combustion impact on oxidants and recirculated flue gas at Beijing University.

Work with easy support on experimental measurement of non-burning size during biomass combustion by conventional method and Oxyfuel method for different concentrations of alcohol in flue gases.

Poděkování

Tímto sdělením bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Skopcovi, Ph.D. za vstřícný přístup, trpělivost, ochotu, zájem a čas, který mi věnoval jednak při konzultacích k mé činnosti, dále pak jako dobu strávenou v laboratorním zařízení ústavu při provádění experimentu k praktické části mé práce. Stejně tak děkuji panu Ing. Matěji Vodičkovi, že nám byl vždy nápomocen při experimentálních měřeních. Taktéž děkuji za poskytnutí veškerých cenných rad a materiálů, které mi dopomohly k dokončení této práce.

Seznam zkratek

		Jednotky
ϕ_s	- Sféricita	[-]
T_{np}	- Teplota nechlazeného plamene	[°C]
V_{fm}	- Objem fluidačního média	[Nm ³ /kg]
r	- Recirkulační koeficient	[-]
V_{FGR}	- Objem recirkulovaných spalin	[Nm ³ /kg]
V_{FG}	- Objem odchozích spalin	[Nm ³ /kg]
EF_{CO}	- Emisní faktor oxidu uhelnatého	[g/kg]
ρ_{CO}	- Objemová koncentrace oxidu uhelnatého	[mg/Nm ³]
φ_{CO}	- Hmotnostní koncentrace oxidu uhelnatého	[ppm]
M_m	- Molární hmotnost	[kg.mol ⁻¹]
p_n	- Atmosférický tlak	[kPa]
R	- Molární plynová konstanta	[J/kg . mol]
T	- Teplota	[°C]
Q_i	- Výhřevnost	[J/kg]
Q_s	- Spalné teplo	[J/kg]
V	- Objem	[mN ³]
X_{ss}	- Označení suchých spalin pro daný index	[-]
X_{sv}	Označení vlhkých spalin pro daný index	[-]
X_{vs}	- Označení suchého vzduchu pro daný index	[-]
X_{vv}	- Označení vlhkého vzduchu pro daný index	[-]
α	- Označení přebytku vzduchu	[-]
N	- Velikost nedopalu	[%][g]
W	- Obsah vody	[%]

Obsah

1	Biomasa	9
1.1	Definice a druhy biomasy	9
1.1.1	Zákon o biomase	10
1.1.2	Chemické složení biomasy	11
1.1.3	Rozdělení biomasy	12
1.2	Energetické využití biomasy	13
1.2.1	Mechanická úprava biomasy pro energetické účely	13
1.2.2	Důvody zvyšujícího se využívání biomasy	14
1.2.3	Výhřevnost biomasy.....	14
1.3	Spalování biomasy	14
1.3.1	Spalovací zařízení biomasy.....	15
2	Fluidní spalování	16
2.1	Teorie fluidního spalování	16
2.2	Fluidace a fluidní vrstva	17
2.2.1	Typy fluidních vrstev	18
2.2.2	Technologické vlastnosti fluidní vrstvy.....	21
2.3	Stacionární (bublinkující) fluidní vrstva	23
2.4	Cirkulující fluidní vrstva	23
2.5	Výhody a nevýhody fluidního spalování	24
2.5.1	Výhody fluidních kotlů oproti koncepci kotlů roštových.....	24
2.5.2	Nevýhody fluidních kotlů oproti koncepci kotlů roštových	25
2.6	Fluidní spalování biomasy	25
3	Oxyfuel technologie a spalování	26
3.1	CCS technologie pro snižování emisí CO₂	26
3.1.1	Rozdělení technologií CCS.....	27
3.2	Metoda Oxyfuel	28
3.2.1	Historie a současný stav	29
3.2.2	Separace kyslíku – ASU (Air Separation Unit)	31
3.2.3	Recirkulace spalin	33
3.2.4	Dočišťování spalin.....	36
3.2.5	Provozní parametry Oxyfuel spalování a fluidní vrstva	37
3.3	Cíle, výhody a nevýhody režimu Oxyfuel	38
3.4	Oxyfuel spalování biomasy	39
4	Spalovací ztráta v podobě nedopalu	40
4.1	Druhy ztrát při spalování	40
4.2	Ztráta nedopalem	41
4.3	Ztráta nedopalem ve fluidních ohništích	42

4.4	Ztráta nedopalem v režimu Oxyfuel	43
4.4.1	Proběhlá experimentální měření nedopalu Oxyfuel režimu	44
4.5	Emisní faktor CO	47
4.6	Teoretický předpoklad výsledků měření	48
5	Experimentální část	49
5.1	Popis zařízení	50
5.1.1	Schéma kotle	50
5.1.2	Schéma odběrového zařízení.....	51
5.2	Popis experimentu	52
5.3	Provedení experimentu	52
5.4	Materiál, palivo	53
5.5	Parametry spalování	54
5.6	Průběh spalování	54
5.6.1	Průběhy teploty fluidní vrstvy, recirkulace spalin, CO ₂ a O ₂	55
6	Bilance Oxyfuel spalování	60
6.1	Postup porovnání	60
6.1.1	Vstupy do bilance	61
6.1.2	Výstupy bilance	62
7	Provedené experimentální měření	63
7.1	Výsledky výpočtu emisního faktoru	63
7.2	Vyhodnocení nedopalu a diskuze výsledků	64
7.2.1	Chemický nedopal	64
7.2.2	Mechanický nedopal - Vrstva.....	66
7.2.3	Mechanický nedopal - Cyklon.....	67
8	Závěr	69
	Seznam tabulek.....	70
	Seznam obrázků.....	70
	Seznam grafů.....	71
	Seznam rovnic	72
	Seznam použitých zdrojů a literatury	73
	Seznam příloh.....	77

1 Biomasa

1.1 Definice a druhy biomasy

Do biomasy jako produktu využívaného napříč energetickým spektrem v rámci celého světa lze zahrnout produkty tvořené souhrnem látek z odumřelých těl veškerých organismů, rostlin, sinic, hub, baterií a živočichů, které obsahují uhlovodíky, což zasahuje oblast celé fytomasy a zoomasy. Nejvyužívanějšími jsou ovšem pouze někteří z těchto zástupců nesoucí potenciál energetického zdroje na základě svého látkového složení. Jsou to především právě rostliny a dřeviny, které jsou k těmto účelům mnohdy cíleně vysazovány a pěstovány. V jejich případě se jedná o zastoupení 450 gigatun využitelného uhlíku na zemi, což je zhruba 80 % veškerého uhlíku užitečného ze všech forem biomasy. Dalšími zástupci se již rozumí jejich odumřelé formy, nebo zbytky a produkty jejich existence. Do odumřelých organismů nemůžeme počítat fosilní fytomasu a zoomasu, které již nespádají do definice biomasy. Tuto hranici rozhoduje druhý stupeň prouhelnatění rašeliny, která je za biomasu považována taktéž. Za touto hranicí se již jedná o hnědé uhlí. Některé z evropských států ovšem i po této době stále daný materiál legislativně za biomasu považují. [1] [2] [3]

Původ energie z biomasy tedy ve všech formách pochází z působení fotosyntézy, ovšem ne veškerá biomasa je jejím primárním produktem. Z tohoto hlediska rozlišujeme biomasu **primární** a **sekundární**. V prvním případě se jedná převážně o produkty, které přímo vznikly působením fotosyntézy. Tedy veškeré dřeviny, rostliny a produkty lesnického a zemědělského hospodářství, stejně tak i jejich odpady. Jako sekundární biomasa se rozumí například veškerí zástupci zoomasy a jejich zbytky. Produkty, které do fáze využitelného energetického materiálu přešly bez působení slunečního záření. [1] [2] [3]

Primární biomasu následně lze dále rozdělit na **fytomasu**, **dendromasu** a další druhy zbytkové biomasy. Fytomasou se rozumí veškeré produkty zemědělského hospodářství, a jejich odpady. V případě dendromasy se jedná o hospodářství lesnické. V těchto dvou případech je obvykle biomasa využívána v procesech termochemické přeměny. Ostatní biomasou poté zůstávají zbytky dřevozpracujícího, papírenského, nebo potravinářského

průmyslu, papírenské kaly a další produkty obvykle užívané k aerobní a anaerobní fermentaci. [1] [2] [3]

1.1.1 Zákon o biomase

V minulosti byla biomasa do české legislativy zavedena formou definice v zákoně o ovzduší 146/2007 Sb.. Nyní je od roku 2012 obsažena v platné vyhlášce 415/2012 ve stejné formě, v jaké byla původně obsažena v novele zákona. Přesné znění zákona o definici biomasy je následovné.: [5]

Biomasa se rozumí produkt ke spalování ve stacionárních, který je tvořen z rostlinného materiálu pocházejícího ze zemědělství nebo lesnictví a který lze použít jako palivo za účelem získání jeho energetického obsahu, a dále následující odpad použitý jako palivo:

- 1. rostlinný odpad ze zemědělství nebo lesnictví*
- 2. rostlinný odpad z potravinářského průmyslu, pokud se využije vyrobené teplo*
- 3. rostlinný odpad z výroby čerstvé vlákniny a z výroby papíru z buničiny, pokud se spaluje v místě výroby a vzniklé teplo se využije*
- 4. korkový odpad*
- 5. dřevný odpad s výjimkou dřevného odpadu, který může obsahovat halogenované organické sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, zahrnující především takovéto dřevné odpady pocházející ze stavebnictví a z demolic. [5]*

Vyhláška 415/2012 není jedinou, která pojednává o definici biomasy a jejího možného využití. Pro účely zákona 165/2012 Sb. o obnovitelných zdrojích se biomasou rozumí:

Biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětvích, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu. [5]

Dále se taktéž pojmu biomasa a jejího využití nepřímou dotýká vyhláška 477/2012 Sb. (původní 482/2012 Sb.), která se týká stanovení druhů a určení parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů energie pro výrobu tepla, elektřiny a biometanu.

Často skloňovanou problematikou české legislativy z pohledu obnovitelných zdrojů je fakt, že ani jeden ze zákonů či vyhlášek nijak přesně nedefinuje termín biomasa, resp. jeho materiálovou, či fyzickou podstatu složení. Stejně tak je tomu u biologicky rozložitelného odpadu. [5]

Dalším odvětvím, které je regulováno zákonem je cíleně pěstovaná biomasa. Ta je definována několika podmínkami. Nepochází z definovaných plodin a energetických dřevin, které jsou uvedené v příloze vyhlášky, kde jsou vyjmenovány nepodporované druhy, převážně dřeviny. Nejsou mezi nimi obilniny. Další podmínkou je, že daná plodina musí být vypěstována pouze na vymezených území České republiky, kdy je výrobce povinen deklarovat rozlohu půdy, umístění, druhy pěstované biomasy, zemědělskou kulturu půd, roční výnosy a způsob úpravy pro přepravu ke spotřebiteli. [2] [5]

Dle zákona jsou definovány i biomasové zdroje, na které se nevztahuje státní podpora, kterými jsou například rašelina, nebo materiály ze dřeva ošetřené konzervačními a ochrannými prostředky. [2] [4] [5]

1.1.2 Chemické složení biomasy

Chemické složení biomasy se mění s druhem produktu, který je zrovna využíván. V podstatě se ovšem jakákoli biomasa vždy skládá ze stejných aktivních a pasivních prvků hořlaviny, společně s dalšími prvky, kdy druh biomasy následně určuje jejich koncentraci. [1] [2]

Mezi aktivní složky hořlaviny uvažujeme uhlík a vodík, mezi pasivní kyslík a dusíky. Dalšími prvky vyskytujícími se v biomase může být například draslík, zapříčiňující vysokoteplotní korozi, měknutí popelovin a zvýšení emisí tuhých znečišťujících látek (TZL). Dále hořčík, zapříčiňující měknutí popeloviny a vázání škodlivin do popela, síra způsobující tvorbu emisí oxidu siřičitého, vysokoteplotní i nízkoteplotní korozi, chlor a různé druhy těžkých kovů. Další složkou je obsah vody, což je balastní složka ovlivňující výhřevnost, teplotu spalování, skladování a náročnost na přepravu. Poslední je množství popelovin, které taktéž jako balastní složka ovlivňuje především množství TZL, a taktéž možnost využití zbytků po spalování. [2] [3]

1.1.3 Rozdělení biomasy

Jak již bylo naznačeno v předchozí pasáži, rozdělení biomasy jde především dvěma směry. Tím prvním je biomasa odpadní, tedy odpady z lesního, či celulózo-papírenského, dřevařského a nábytkářského průmyslu, taktéž zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny, komunální bioodpad a odpady z potravinářského průmyslu. Oproti tomu tím druhým odvětvím je cíleně pěstovaná biomasa, nikoli odpadní, čili od samého počátku sázené rostliny a dřeviny s účelem budoucího energetického využití. Samostatným odvětvím jsou potom nadále odpady zemědělské výroby (hnůj, hnojívka, sláma, atd.). [1] [2]

Účelně pěstovaná biomasa pro energetické účely

Hlavními produkty tohoto odvětví jsou především rychle rostoucí dřeviny a rostliny bylinného charakteru, jejichž přednostmi jsou poměrně rychlý výsev, možnost využití i na neenergetické účely a krátké vegetační období. [2]

- **rostliny bylinného charakteru** – konopí, amaranthus, šťovík, ostřík, kostřava...
- **rychle rostoucí dřeviny** – topol, vrba, olše, akát, líska, platan...
- **travní porosty** – sloní tráva, chrastice, trvalé travní porosty
- **olejnaté rostliny** – pro výrobu surových olejů a metylesterů – řepka olejná, slunečnice, len
- **škrobo-cukernaté rostliny** – cukrová řepa, cukrová třtina, brambory
- obiloviny

[2]

Odpadní biomasa pro energetické účely

- zbytky ze zemědělské prvovýroby, sadů a vinic, sláma, a veškeré další odpady a zbytky z likvidace křovin, atd.
- exkrementy hospodářských zvířat, zbytky krmiv, hnůj, močůvka, atd.
- z těžby a zpracování dřeva a lesního průmyslu, větve, kůra, pařezy, kořeny, odřezky, piliny, hobliny, atd.
- biologicky rozložitelný komunální odpad (**BRKO**)
- biologicky rozložitelný průmyslový odpad (**BRPO**)

[2]

Pokud již uvažujeme biomasu jako zpracovaný produkt, který je připraven pro termochemické, nebo fermentační energetické zpracování, můžeme dále dělit např. na suchou, vlhkou a speciální biomasu. Suchou biomasu lze přímo spalovat. Vlhká biomasa musí být buďto vysušena na požadovanou hodnotu spalitelnosti na základě obsahu vody, nebo je častěji využita na fermentační procesy. Mezi speciální skupinu patří olejniny, cukernaté plodiny a škrobovité rostliny a plody, ze kterých se dá následně vyrábět bionafta, nebo líh. [2]

Dalším způsobem může být biomasa již kategorizována dle její výhřevnosti, využití, spalitelnosti a rozřazena na základě dalšího použití. [2]

1.2 Energetické využití biomasy

Biomasa je velmi významným zdrojem obnovitelné energie nejen pro Českou republiku, ale i v celosvětovém měřítku již dlouhou řadu let. Samozřejmě by se z historického hlediska dalo tvrdit, že spalování biomasy započalo dříve než využívání uhlí na prahu průmyslové revoluce. Ovšem cílené spalování z důvodů zefektivnění energetického využití potenciálu naší planety, ekologizace a definice biomasy přišli až mnohem později.

Na základě závazků EU v ohledu na podporu a zvyšování využitelnosti obnovitelných zdrojů se dá očekávat, že využití a spotřeba biomasy bude nadále stoupat. V současné situaci je například v České republice z podstatné části dřevní a lesnická biomasa již plně využívána, a proto je třeba se čím dál více zaměřovat na zvýšení podílu užití zbytkových, odpadních a alternativních druhů biomasy. S využíváním těchto druhů odpadů ovšem nastávají mnohé odlišné technologické problémy, oproti spalování dřevní biomasy. [2] [3] [4] [6] [7]

1.2.1 Mechanická úprava biomasy pro energetické účely

Dle kategorizace biomasy se jedná o zcela odlišné struktury jednotlivých organických materiálů, kterým je třeba technologicky upravit jejich vlastnosti, aby byly vhodně využitelné ve spalovacích zařízeních. Z hlediska zmiňované technologické úpravy se jedná o drcení, sekání, mletí, kterážto jsou využívány především k úpravě štěpky a zemědělských, a s následným lisováním i pro výrobu pelet. V případě slámy lze za tyto

úpravy považovat i svazování do balíků, nebo vysoušení, které je jednou z mála úprav využívající se u všech druhů biomas. [2] [7]

1.2.2 Důvody zvyšujícího se využívání biomasy

V závislosti na zpřísnování pravidel směrnic Evropské unie týkajících se emisních limitů vztažených na energetické zdroje, a také zvyšující se podporu tzv. obnovitelných zdrojů energie je biomasa vhodným palivem, jehož využití je z obou těchto důvodů vítáno. Z pohledu obnovitelných zdrojů je biomasa nejvyužívanější. Především pro její snadnou dostupnost je možné vystavovat zdroje velkých výkonů, které potřebují ke svému provozu velké množství paliva. Proto je biomasa ze zástupců využitelných obnovitelných zdrojů energie nejužívanějším. [2] [4]

1.2.3 Výhřevnost biomasy

Výhřevnost hořlaviny biomasy se liší dle jejího typu, přičemž tato hodnota je ovlivňována vlastnostmi jednotlivých druhů, jako je například jejich olejnatost, nebo obsahy pryskyřice a podobně. V neposlední řadě je klíčovým ukazatelem obsah vody, kterýž to má hlavní vliv na výhřevnost jakéhokoli paliva, kde se jeho výhřevnost snižuje. Při hodnotě 50 % obsahu vody v palivu se již pohybujeme na hranici zápalnosti, a přímka závislosti výhřevnosti na obsahu vody u prvně zmíněného klesá na nulovou hodnotu. [2] [4]

1.3 Spalování biomasy

Spalování je nejvyužívanější termochemický proces při zpracování biomasy k energetickým účelům. Je známo mnoho forem užití daného materiálu, ovšem dle množství zastoupení jednotlivých kategorií je přímé spálení oproti zplyňování, pyrolýze a dalším technologiím nejvyužívanější. Nejen jednoduchost, ovšem i účinnost, kterou vykazují zařízení pro produkci tepla využívající biomasu vede k těmto užitím, společně i s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. [1] [2] [4] [6] [7]

Dalším aspektem spalování jsou velmi nízké, resp. prakticky nulové hodnoty vypouštění CO₂ do ovzduší. *Množství uvolněného plynu do ovzduší je přibližně stejné jako množství, které rostliny během svého života absorbují při fotosyntéze.*¹

Svým způsobem oproti uhlí je biomasa palivo co do složení poměrně složitější. Především z pohledu problematiky odlišnosti ideálních teplot, ve kterých jsou spalovány jednotlivé složky biomasových paliv. Dalším problémem je vysoký podíl těkavých látek. Spalování biomasy tedy vždy musí probíhat za vyšších teplot a za dokonalého smíchání se vzduchem, aby nenastával problém vyhoření pouze části paliva a tedy zvýšení ztráty právě zmiňovaným nedopalem. [1] [2] [3] [6] [7]

1.3.1 Spalovací zařízení biomasy

Mísení paliva a vhodný přívod vzduchu jsou hlavní aspekty, které určují biomasu užívat například ve fluidních kotlích. Technologii tohoto spalování je následně věnována jedna z následujících kapitol.

Dalšími druhy jsou stejně jako u uhlí kotle roštové, či práškové. Užití roštových kotlů nejen pro velké biomasové zdroje je nejčastějším řešením. Ač je v tomto případě mísení s okysličovadlem a vyhoření paliva poměrně problematické. Oproti fluidnímu spalování struktura a granulovitost mnoha materiálů nedovoluje užití v žádné jiné formě spalovací technologie, než je právě roštové ohniště. Štěpku, různé druhy trav, odpadů, či slámy nelze užít ve fluidních kotlích z důvodu nejednotnosti granulometrie. V práškových kotlích je podobný problém se strukturou materiálu, kde je nutnost použít pouze jemně drcené piliny a materiály o velikostech v řádech desítek či jednotek μm, které jsou mechanickou úpravou u biomasy jen velmi těžko dosažitelné. Převážně z důvodu jejího složení. Z tohoto důvodu se práškové kotle téměř nepoužívají. Pelety jsou jednou z mála možností ideálního biomasového paliva, které lze užít ve fluidních kotlích. Proto jsou roštové kotle užívány nejvíce jak ve velkokapacitních zdrojích, tak i v oblastech decentralizované energetiky, nebo vyloženě u zařízení pro domácí použití. Převážně tedy z důvodu rozsahu možnosti užití různých druhů biomasy. [2] [3] [4] [6] [7]

¹ VOBOŘIL, David. Biomasa: Využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. OEnergetice.cz [online]. Praha, 6. 2. 2017 [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>

2 Fluidní spalování

2.1 Teorie fluidního spalování

Společně s technologií roštových a práškových kotlů je dnes již standartně využívána technologie stacionární či cirkulující fluidní vrstvy ve spalovacích zařízeních. Tento technologický trend se začal rozvíjet již v polovině minulého století, převážně z důvodu lepšího vyhoření paliva na základě vhodného promíchávání a přístupu vzduchu. Dalším aspektem, který často rozhoduje o výběru spalovací technologie je míra vypuštěných emisí, jejichž míra není dána pouze využívaným palivem, ale i druhem spalovací technologie, jejíž funkce má na množství složek spalin vliv. Právě v tomto ohledu je fluidní spalování hojně využíváno, jakož i jako levnější forma opatření proti vypouštění a tvorbě emisních složek spalin. [8] [10]

Dalším problémem práškových a roštových kotlů je především nižší účinnosti a nízká míra možné automatizace, která u fluidních reaktorů není problémem. Počátky prvních experimentů s fluidní technologií lze počítat do 20. let minulého století (Winklerův plynový generátor), ovšem skutečný počátek výzkumu fluidní vrstvy započal až v 50. letech. S prvotní reálnou podobou metodiky rychlé fluidní vrstvy přišli v roce 1938 zakladatelé chemického inženýrství Lewis a Gilliland, tehdy působící na MIT. [8]

„Ve snaze překonat nedostatek benzínu během II. světové války, byla v r. 1942 úspěšně spuštěna firmou Standard Oil (nyní Exxon) první průmyslová jednotka na katalytické krakování výševroucích ropných frakcí v rychlé (řídce) fluidní vrstvě.“²

S následnou ojedinělou aplikací této technologie přišli v 50. a 60. letech firmy Lurgi a BASF, které z důvodu potřeby syntézy fluoridu hlinitého a kalcinace hydroxidu hlinitého vyvinuly zařízení s technologií tzv. cirkulující fluidní vrstvy. Vedle těchto mnoha různých podob katalytických procesů začala cirkulující fluidní vrstva od 70. let být využívána i k formě ekologičtějšího spalování uhlí. Což již byly podoby fluidních reaktorů, jak je známe dnes. [8] [9]

² HARTMAN, M. SVFOBODA, K. TRNKA, O. BERAN, Z. *Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou*. Chemické listy 93 - Referáty. Praha: Ústav chemických procesů, Akademie věd České republiky. 1999. str. 789

V kotlích s fluidní vrstvou lze dnes spalovat uhlí, biomasové pelety, čistírenské kaly, různé druhy odpadů s vhodnou granulací atd. Technologie fluidní vrstvy užitá ve spalovacím procesu ovšem není jedinou možností, kde lze tento proces nelézt. Ve fluidní vrstvě může v různých podobách chemických procesů docházet k sušení, barvení materiálů, nebo ke granulaci. Popis principu funkce fluidní vrstvy a fluidace je rozebrán v následující kapitole. [8] [9]

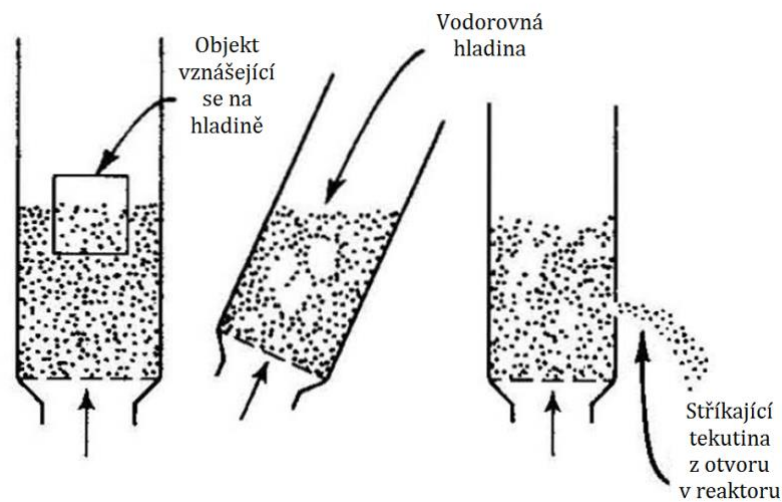
Jsou známy dvě formy spalování fluidní technologií. Tou první je stacionární bublinkující fluidní vrstva, druhou je cirkulující fluidní vrstva. Každý z těchto druhů užití vykazuje různé kvalitativní hodnoty co do ideálnosti spálení hořlaviny, množství vypuštěných emisí, množství zbytkových popelovin, nebo ztrátu nedopalem v podobě chemického nedopalu a nespálených tuhých zbytků paliva. [8] [9]

2.2 Fluidace a fluidní vrstva

K užívání fluidní vrstvy ve spalovacích zařízeních je potřeba prvně vhodná volba vsázky, kterou lze využít. V případě spalování musí být uhlí jemně nadrceno na podobné části malých rozměrů v řádu milimetrů, nebo maximálně několika centimetrů. Ostatní materiály musejí být upraveny do vhodných jednotných forem, tvarů a velikostí, jako například biomasa v podobě lisovaných pelet. Parametrem měřící jednotnost částic vsázky do fluidních kotlů je například granulovitost, nebo sféricita. Tento materiál je následně vložen do kotle na tzv. fluidní lože. Jedná se o rošt se spodními otvory (často řešenými i trubkami s kloboučky). Z těchto otvorů je ventilátorem primárního vzduchu do reaktoru hnán vzduch, který se při zvyšující se rychlosti průtoku fluidačního média snaží překonat tlakovou ztrátu, aby se materiál jednotně dostal do vznosu a dosáhl tzv. prvního mezního stavu fluidace. Je tedy nalezena aerodynamická rovnováha mezi dynamickým tlakem přiváděného fluidačního média a tíhou částic fluidní vrstvy. Za stálého nahřívání se materiál po dané době v případě užití fluidní technologie u spalovacích procesů zapálí. V tomto bodě již vsázka paliva vře, probublává a mísí se mezi sebou a vytváří tzv. fluidní vrstvu. V jiných typech fluidace, například u koncepce cirkulující fluidní vrstvy, není vůbec parná, a částice se pohybují po celém prostoru fluidační komory. Tím vytvářejí nehomogenní fluidní vrstvu, kde se koncentrace částic mění s časem v každém místě vrstvy. Pokud ovšem fluidní vrstvu tvoří hustý souvislý

zřetelný celek, její hlavní vlastností je nápadná podoba vlastnostem kapaliny. [8] [9] [10] [15]

Likvidní chování z hydromechanického hlediska lze pozorovat především ve dvou stavech. Při naklonění reaktoru se hladina vrstvy vyrovnává jako vodní hladina, a při narušení reaktoru začne vrstva stejně jako kapalina vytékat z reaktoru ven. Pokud bychom do fluidační vrstvy daného materiálu vhodili typ objemnějšího předmětu podobné hustoty, nepadne hned díky nepevnému lůžku k zemi, ani se nezastaví o vrchní část vsázky, na kterou by bez fluidace dopadl. Naopak se bude po fluidní vrstvě pohybovat, jako by plaval po vroucí míšící se kapalině. [8] [9] [15]

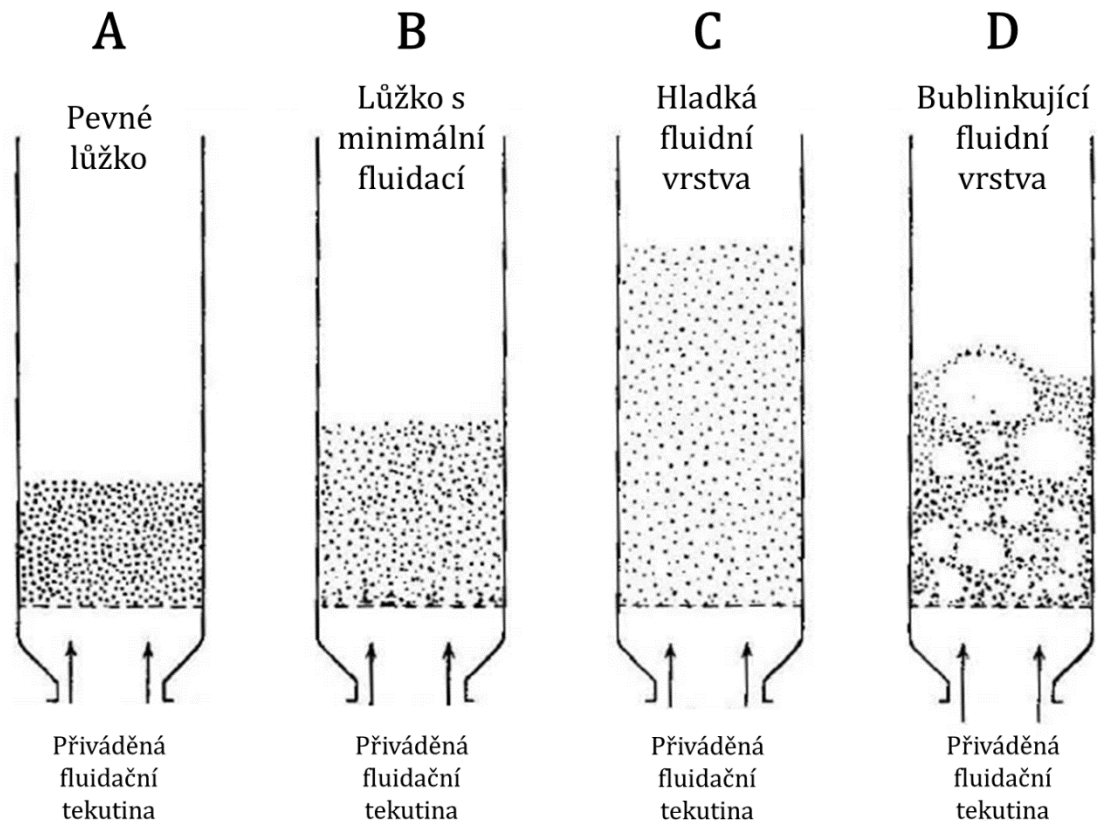


Obrázek 1: Vlastnosti fluidní vrstvy podobné kapalinám [8]

2.2.1 Typy fluidních vrstev

Provoz spalovacího zařízení s fluidní vrstvou je nejen úkol vyžadující správné nastavení a znalost nutných opatření k jejímu chodu, ovšem i rozpoznávání jednotlivých stavů, ve kterých se stacionární fluidní vrstva může nacházet a lze ji dlouhodobě provozovat. Dle zvyšujícího se množství přiváděného vzduchu pro dosažení fluidace je známo několik možných stavů vrstvy, ve kterých zrovna reaktor pracuje. Mnohé z těchto stavů jsou ovšem pouze demonstrací možného chování média a vnosu částic, nikoli však výčet všech druhů použitelných variant fluidace. Určité části fluidačního chování totiž nelze jakkoli využít pro spalování. [8] [10]

Stavy můžeme následně dělit do 8 kategorií.:



Obrázek 2: Rozdělení fluidních vrstev (Část A - D) [8]

A) Pevné lože

Velmi malý průtok fluidačního média pronikající mezi prostory stacionární vrstvy. Vsázka zatím téměř bez vznosu. [8]

B) Lože s minimální fluidací

Jednotlivé částice se začínají hromadně nadnášet. V tomto okamžiku se třecí síla mezi tekutinou a částicí vyrovnává její hmotnosti, vertikální tlakové síly mezi sousedními částicemi začínají mizet. Nastává pokles tlaku v libovolných místech lože. [8]

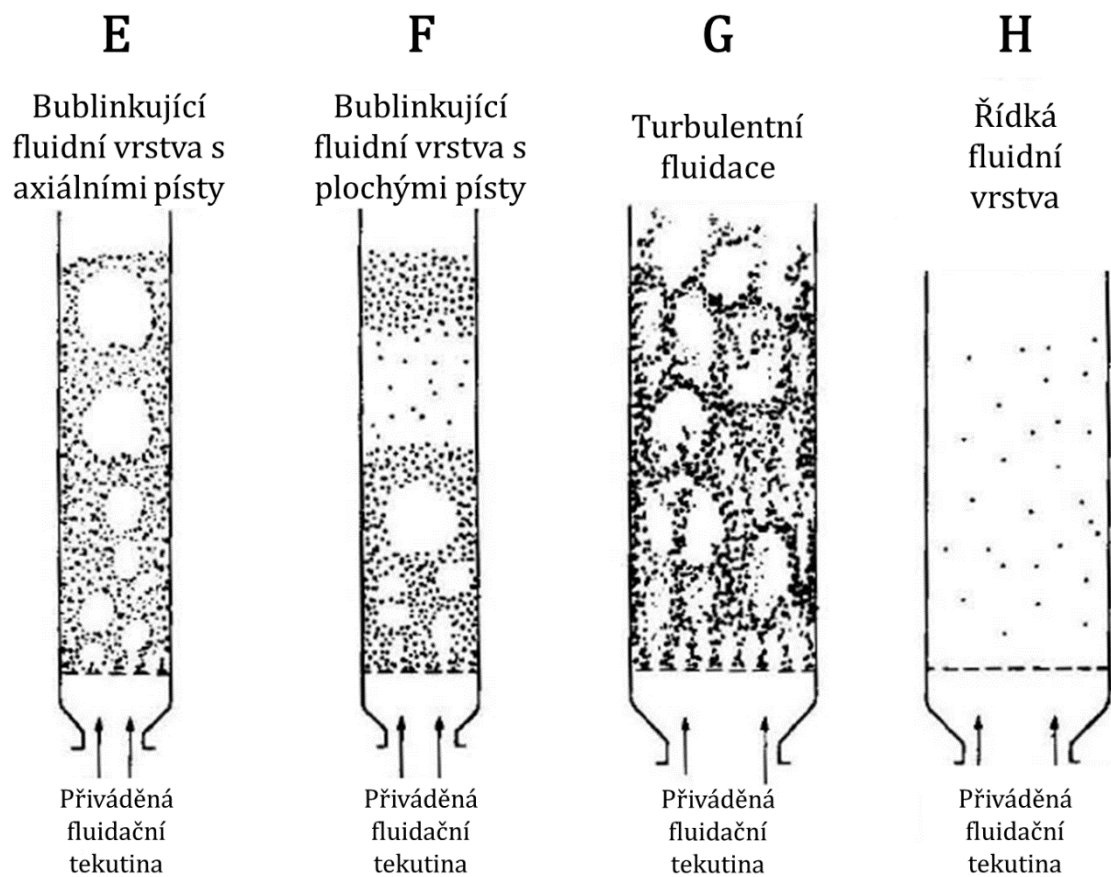
C) Hladká fluidní vrstva

Hladká, neboli progresivní fluidní vrstva nastane při následném zvýšení průtoku fluidačního média. Lze tedy již tento stav nazvat homogenním, pro použití naprosto ideálním. Z hlediska udržitelnosti je ovšem velmi obtížné tento stav konstantně

provozovat delší dobu, především z důvodu rozdílnosti velikostí částic a nerovnoměrného průtoku média mezi nimi. [8]

D) Bublinskující fluidní vrstva

Nežádanější reálně udržitelný stav, který je prvním, u kterého není zřetelná jasná hladina fluidní vrstvy. Nastává počátek vytváření malých a velkých plynových bublin, které rostou a zvětšují svůj objem s průtokem vrstvou. Z důvodu nerovnoměrnosti vrstvy jsou částice ideálně promíchávány a mají ideální dostupnost okysličovadla. [8]



Obrázek 3: Rozdělení fluidních vrstev (Část E - H) [8]

E) Bublinskující fluidní vrstva s axiálními písty

Jeden ze dvou mezních stavů bublinskující fluidní vrstvy. V tomto případě se jedná o nežádoucí tvorbu velkých shluků částic, kolem kterých po stěnách reaktoru prchá velké množství fluidačního média. Shluky jsou vytvářeny především částicemi malých průměrů. [8]

F) Bublínkující fluidní vrstva s plochými píсты

Při užití hrubšího zrna materiálu se může objevit druhý stav, který se vyznačuje tvorbou plochých pístů. Velké shluky mohou být tvořeny i jako jeden celek po celém obvodu reaktoru a mohou být nadnášeny vzhůru, kde postupně ztratí svou kontinuitu a padají zpět. Tento stav je poměrně nebezpečný, převážně z důvodu možného poškození zařízení. [8]

G) Turbulentní fluidace

V tomto případě již některé z částic překračují hranici fluidace do prahu úletové rychlosti. Z tohoto důvodu opouštějí vrstvu a letí reaktorem vzhůru směrem k cyklonům. Vytvářejí se nekonzistentní bubliny společně se vzduchovými kanálky, kterými fluidační médium uniká mezi materiálem nad vrstvu a nepodílí se na fluidaci. [8]

H) Řídká fluidní vrstva

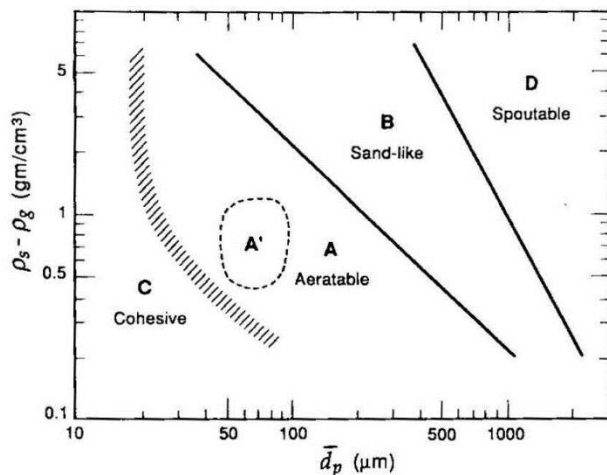
Překročení míry fluidace na základě dalšího zvýšení průtoku média může zapříčinit dosažení prahu úletové rychlosti již u téměř celé vrstvy. Tento stav zapříčiní řídkou fluidní vrstvu, kterou lze využít u šetrného sušení, pro spalování je tento stav ovšem nežádoucí. [8]

2.2.2 Technologické vlastnosti fluidní vrstvy

Stejně jako jiná spalovací zařízení i fluidní spalování disponuje několika vlastnostmi a provozními stavy, které je třeba dodržovat pro správný provoz fluidní vrstvy. Jedna z nich je udržovat provozní teploty uprostřed vrstvy mezi hodnotami 800 – 950°C. Tento interval je užíván z důvodu vhodného vyhoření paliva, oxidu uhelnatého, a následně i možnosti užití suché aditivní metody odsíření. Při překročení teplot nad 950 °C sice taktéž dochází k téměř plnému vyhoření paliva, ovšem technologického hlediska suchou metodu odsíření již nelze použít, a taktéž se může začít zapékat i celá fluidní vrstva. Do teplot 800 °C naopak nedochází k ideálnímu vyhořívání. Nejvhodnějším upřesněním intervalu je provoz od 850 - 900 °C, kde tedy lze nalézt ideální kompromis vyhoření CO na úkor možných zvýšení emisí NO_x. [8] [9]

Dalším specifickým odvětví je samotná mechanická úprava vsázkového materiálu, který následně tvoří fluidní vrstvu. Pro vhodnost užití v rámci velikosti jednotlivých částic se

užívá tzv. **Geldartova klasifikace částic**. Dle těchto rozdělení můžeme zařazovat jednotlivé druhy částic či materiálů fluidní vrstvy do čtyř skupin podle jejich vlastností.



Obrázek 4: Geldartovo rozdělení částic
(Pro vzduch za standartních podmínek)

[8]

Skupina C: Velmi jemné prášky se silnou soudržností. Struktura mouky, či škrobu. Pro fluidaci velmi nevhodné.

Skupina A: Malé a střední velikosti materiálu s hustotou obvykle nižší než 1,4 g/cm³. Materiály v této formě jsou snadno provzdušnitelné a fluidující i při nízkých rychlostech přiváděného média.

[8] [10] [16]

Skupina B: Vhodné částice pro fluidaci. Velikost částice je od 40 – 500 μm, hustota

potom od 1,4 do 40 g/cm³. [8]

Skupina D: Velké částice tvořící problémy převážně u hlubokých vrstev. Tvoření velkých bublin, kanálků a špatná fluidace. [8]

V neposlední řadě je jedním z dalších hlavních ukazatelů užitečnosti daného materiálu pro fluidaci tzv. **sféricita**. Pojem sféricita u fluidních kotlů udává koeficient rozdílnosti nadrcené částice od částice sférické, tedy koule stejného objemu. Pokud bychom definovali tento poměr ve vzorci, lze jej vyjádřit takto.:

$$\text{Sféricita } \phi_s = \left(\frac{\text{plocha koule}}{\text{plocha částic stejného objemu}} \right) \quad (1)$$

[8] [16]

2.3 Stacionární (bublinkující) fluidní vrstva

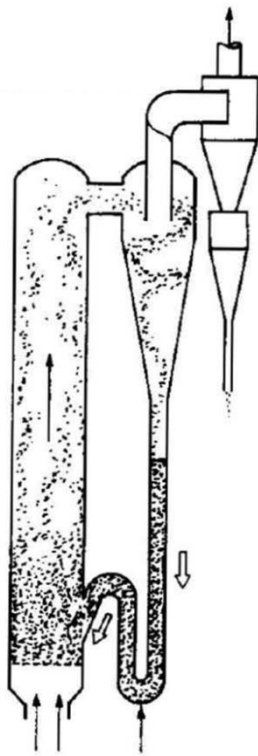


Obrázek 5: Stacionární
bublinkující fluidní
vrstva [8]

Spalovací vzduch je vháněn tryskami do fluidní vrstvy, kde dochází ke spalování paliva. Bublinkující fluidní vrstva nastává v okamžiku, kdy rychlost proudícího média udržuje částice oproti jejich tlaku v rovnováze fluidující vrstvy. Proto se vrstva jakýmkoliv způsobem v rámci spalovacího prostoru nepřesouvá ani necirkuluje. Pouze vře a ne jejím vršku se tvoří jemně zřetelná hladina složená z hořících částic. Díky průtoku fluidačního média jsou následně vyhořelé částice vháněny do cyklonových odlučovačů spalin, a dalších separačních zařízení popela. Tímto se tedy zásadně odlišuje od koncepce vrstvy cirkulující, u které hladina fluidního ohniště není vůbec zřetelná. Kotle se stacionární bublinkující fluidní vrstvou se používají pro spalování různých typů paliv, a jsou obvykle koncipovány s parním výkonem v řádu 10 MW. Největší kotle s bublinkující fluidní vrstvou dosahují výkonu kolem 100 MW. [8] [9]

2.4 Cirkulující fluidní vrstva

V tomto případě jsou ve fluidním kotli za velké rychlosti průtoku fluidačního média unášeny částice materiálu a paliva směrem vzhůru, a následně postranním otvorem vystupují kolmo z reaktoru. V cyklonu dochází k separaci produktů spalování, nevyhořelých částic paliva a materiálu fluidní vrstvy. Částice se stále plně nevyužitým energetickým potenciálem padají na základě rozdílnosti hmotností trychtýřem a



Rychle přiváděná
fluidační tekutina

Obrázek 6: Stacionární
bublující fluidní vrstva [8]

odvodným systémem zpět dolů, na spodek fluidního roštu. Zde jsou do reaktoru opět vehnány jiným otvorem, než kterým probíhá přívod vsázky. Následně se mechanický a termický proces opakuje, a to i mnohokrát za sebou, než částice dostatečně nevyhoří a není odloučena ze spalovacího procesu. Tento způsob fluidní technologie je vysoce efektivní právě díky opakovatelnému setrvání částice ve spalovací komoře.

Kotle s cirkulující fluidní vrstvou se v praxi vyskytují od 50 MW až po nejvyšší výkony současných parních elektráren. [8] [9] [14]

2.5 Výhody a nevýhody fluidního spalování

2.5.1 Výhody fluidních kotlů oproti koncepci kotlů roštových

- 1) Možnost užití suché aditivní metody odsíření dávkováním drceného vápence přímo do spalovacího procesu.
- 2) Možnost spalovat vysokosirnatá paliva při dodržení emisních limitů bez nutnosti instalace a aplikace zvláštních odsiřovacích zařízení.
- 3) Možnost spalování méně hodnotných levnějších paliv, tedy např. odpadů, či kalů z čističek.
- 4) Možnosti dosažení nižších emisních limitů i v případě CO, či NO_x.

[9] [10] [11] [12] [14]

2.5.2 Nevýhody fluidních kotlů oproti koncepci kotlů roštových

- 1) Vyšší investiční náklady na pořízení zařízení.
- 2) Složitější konstrukce zařízení, funkce a chod systému.
- 3) Vyšší nároky na provoz, údržbu a obsluhu.
- 4) Vyšší nároky na odprašování spalin (resp. zachycování a odvod tuhých látek).
- 5) Abraze vnitřních stran fluidního reaktoru (Převážně u cirkulující fluidní vrstvy).

[9] [10] [11] [12]

2.6 Fluidní spalování biomasy

V případě spalování biomasy vyžaduje celkový provoz zařízení využívajících fluidní technologii v některých aspektech odlišná opatření, například oproti uhlí, kalům a dalším materiálům. Hlavním problémem je nutnost přidávání inertních materiálů. Při spalování uhlí je tento inertní materiál tvořen samotným popelem, který následně společně se vsázkou čerstvého paliva tvoří fluidní vrstvu. U uhelnatých paliv tedy problém potřeby většího množství materiálu, než je hmota paliva, nevzniká. U biomasy je tomu naopak. Její popelovina nevyniká vlastnostmi, které by přispívaly k tvorbě fluidní vrstvy, také proto, že její množství je oproti vsázce výrazně nižší, než u uhlí (množství popeloviny u biomasy se pohybuje maximálně v jednotkách procent). Z tohoto důvodu je společně s biomasou nutno do fluidního kotle sypat ještě další materiál, například keramzit, nebo různé druhy písků a keramických materiálů, které následně s palivem vytvářejí fungující bublinkující fluidní vrstvu. Stejně je tomu u cirkofluidních ohnišť. [13] [17] [18] [19] [20]

Díky těmto nízkým koncentracím paliva vůči přidané vrstvě v řádech jednotek procent lze u biomasy provozovat fluidní ohniště i za teplot kolem 750 °C. To je výhodou především u biopaliv, které mají v oblasti vysokých teplot velmi často problémy s měknutím popelovin, a tím způsobují zanášení kotle. [17] [18] [19]

3 Oxyfuel technologie a spalování

3.1 CCS technologie pro snižování emisí CO₂

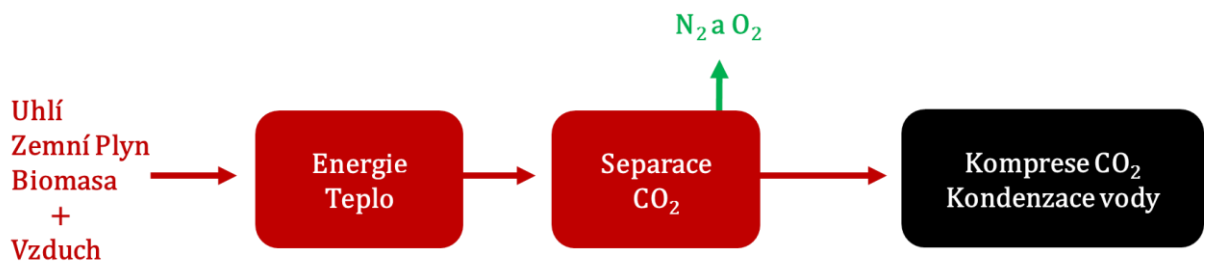
Snižování vypouštěných emisí oxidu uhličitého, který dle některých studií pravděpodobně přispívá jako skleníkový plyn k efektu klimatického oteplování naší planety, je dnes celosvětovým fenoménem, který v mnoha státech určuje legislativní chod a renovaci celého energetického systému. Od roku 1987 do roku 2016 se koncentrace CO₂ zvedla celosvětově v průměru z 350 ppm na 400 ppm, dle *NOAA Analysis Centre* v roce 1908 odchylka od průměru globální teploty pohybovala okolo -0,44 °C, v roce 2016 byla hodnota odchýlení na +0,94 °C. Jelikož je oxid uhličitý jako produkt spalování jedna ze sloučenin zastupující nejvyšší procentuální podíl, co se do vyprodukovaných emisí spalování týče, je třeba se stále snažit přicházet s technologiemi, které by jako vypouštění do ovzduší co nejvíce eliminovaly, ideálně stále zdokonalovat systémy, které jej za účelem výroby elektrické energie a tepla vůbec neprodukují. Konkrétně je z jednoho kilogramu uhlíku obsaženého v palivu vyprodukováno přibližně 3,8 kg oxidu uhličitého.

Jedna z hlavních a nejvyužívanějších metod ve všech svých podobách je technologie '*Carbon capture and storage processes system*', nebo-li: „*Zachycování a ukládání oxidu uhličitého*“. Tento, v určitých podobách již zavedený systém, se skládá ze třech způsobů finálního snížení koncentrace CO₂ ve vypuštěných emisích, nebo úpravě složení spalin. Jak již vyplývá z názvu, ani v jednom případě se ovšem nejedná o technologii samotnou. Ta je pouze dílčí částí celkového procesu nakládání s CO₂, od jeho vzniku, zachytu a transportu, až k případnému uložení. Každá z těchto metod ovšem v části produkce pracuje na odlišném principu. Jsou to metody Post-Combustion, Pre-Combustion a Oxyfuel-Combustion. Ovšem téměř žádná z těchto uváděných technologií nikde ve světě momentálně nedosahuje komerčně využitelné úrovně, protože všechny jsou ještě ve fázi technologického vývoje. Současně se taktéž vedou debaty, zda-li jsou tyto technologie v jejich konečném důsledku skutečně natolik technologicky, ekonomicky, a i ekologicky výhodné, aby byly komerčně nasazovány. [21] [22] [23] [24] [25]

3.1.1 Rozdělení technologií CCS

Post-Combustion

V tomto případě, jak již sám název napovídá, probíhá separace CO₂ až po spalování paliva. Jednou z výhod je možné užití i na již existujících elektrárnách. Separace probíhá za pomoci chemické vypírky, díky které je následně CO₂ zachycen a stlačen. Metodika využití chemické vypírky není pouze jedna, a proto lze tento proces ještě rozdělit do čtyř dalších způsobů užití této technologie. [21] [23] [24] [26] [27]



Obrázek 7: Princip metody Post-Combustion

Absorpční

Metoda využívající zastupující prvky na bázi aminů a jiných látek. Absorpce může být buďto fyzikální, chemická či hybridní. [21] [23]

Adsorpční

Využití chemické, nebo fyzikální přitažlivosti mezi plynem a aktivními body na pevné látce. [21] [23]

Kryogenní

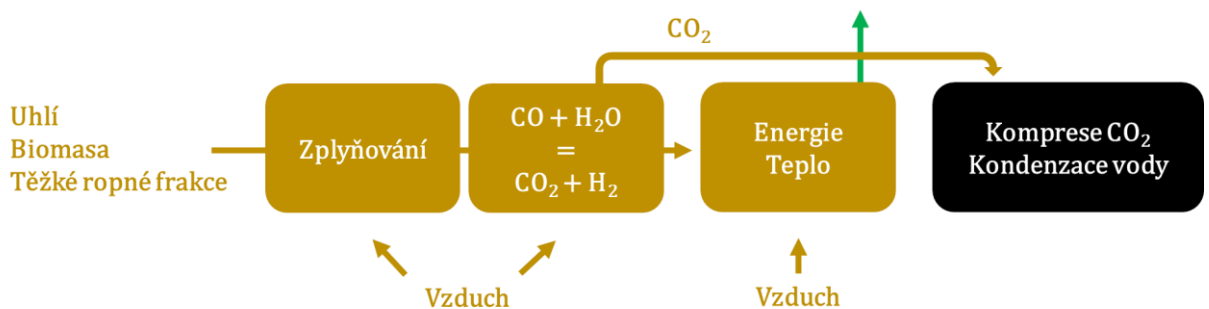
Zkapalnění a fyzickému odstranění CO₂ od okolních plynů. Využívá rozdílnost bodů varu ostatních plynů od CO₂. Nejefektivnější. [21] [23]

Membránová

Záchyt plynu na membráně, nebo použití separační membrány. Obě metody fungují na principu rozdílného chemického i fyzikálního působení složek mezi sebou v dané plynné směsi. [21] [23]

Pre-Combustion

Druhou metodou CCS technologií je metoda separace CO₂ ještě před využitím energetického potenciálu paliva. V tomto případě je CO₂ separováno ještě před započítáním spalovacího procesu. Za pomoci proudu kyslíku proudícího do zplyňovače, ve kterém je následně přimíseno palivo vzniká tzv. Syngas, nebo-li syntetický plyn. Za pomoci konverzního reaktoru je do syngasu přimísena pára, a z důvodu chemického přeskupení za nastolených podmínek z oxidu uhelnatého a vodní páry začne vznikat vodík a oxid uhličitý. Stejnou chemickou vypírku a další cestou, jako u metody Post-Combustion, je následně s CO₂ nakládáno. Vodík je užit ke spalování a přímému pohonu spalovacích turbín, a následně může být ještě potenciál spalin využit k výrobě další užitné páry, což může opět zvýšit celkovou účinnost celého procesu. [21] [23]

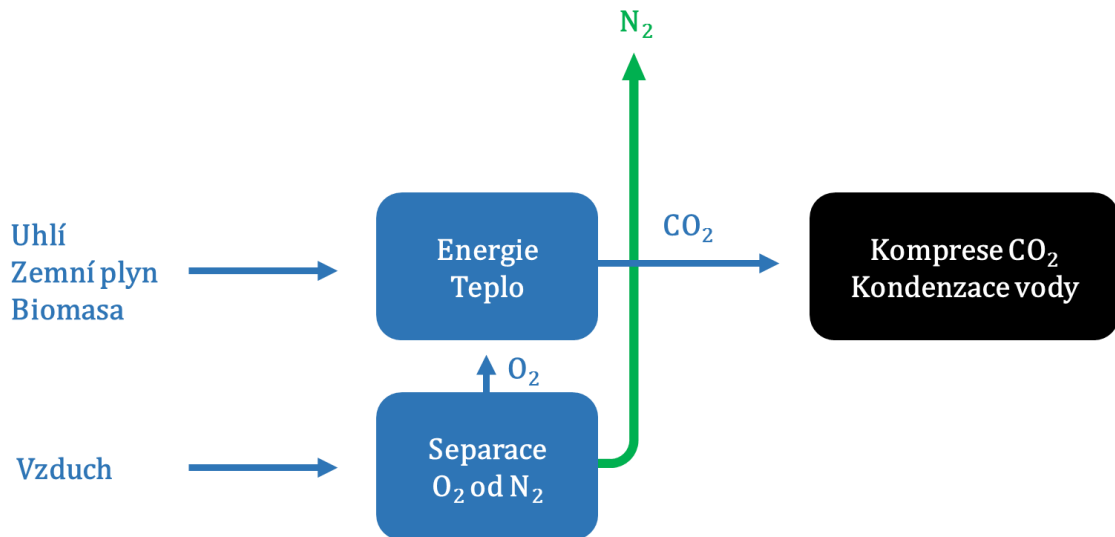


Obrázek 8: Princip metody Pre-Combustion

3.2 Metoda Oxyfuel

Tato metoda nepracuje na principu úpravy paliva před spalováním, ani finální separaci spalin. Podstatou je přímé ovlivnění funkce spalování a termochemických procesů probíhajících ve spalovacích zařízeních. Základním principem metody Oxyfuel je, že na ventilátory vhánějí okysličovadlo, resp. vzduch, do ohniště je namísto vzduchu oproti konvenčním technologiím napojen zdroj téměř čistého kyslíku a recirkulovaných spalin. Z podstaty spalovacího procesu jsou následně spaliny tvořeny de facto pouze oxidem uhličitým a vodní parou, kdy po následném z kondenzování jsou spaliny tvořeny téměř čistým CO₂. Ten je pro svou úplnou čistotu ještě třeba dočistit v separačních zařízeních od minoritních zbytků plynů nízkých koncentrací. Až vyčištěné CO₂ může být zachyceno, stlačeno, a může s ním být nakládáno, jako u ostatních CCS metod. U této metody spalování dochází k odlišným poměrům daným změnou objemu spalin a jejich složením.

Spaliny mají v tomto případě jiné látkové vlastnosti, které se projevují především u sdílení tepla a spalovací teploty. Konečnou podstatou a cílem zvládnutého procesu této technologie je koncentrovaný proud spalin, který obsahuje nízkou koncentraci přebytečného O_2 , velmi nízké koncentrace NO_x a pouze dvě významné složky spalin. Oxid uhličitý s vodní párou. [21] [23] [26] [27] [28]



Obrázek 9: Princip metody Oxyfuel

Vysoký obsah dusíku v atmosférickém vzduchu používaného jako okysličovadlo u konvenčních metod spalování uhlí, biomasy a dalších druhů paliv ve stacionárních a cirkulujících fluidních vrstvách, který se pohybuje kolem 78 %, má při užití vzduchu jako okysličovadla za následek poměrově nízké koncentrace CO_2 ve spalinách. Ty se pohybují od 3 do 14 %, v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu. Následně je proces jejich separace velmi obtížný. Jelikož je obsah dusíku v okysličovadle u režimu Oxyfuel snížen na jednotky procent, objemové zastoupení CO_2 ve spalinách je tudíž naprosto opačné. V absolutních číslech se jeho hmotnostní koncentrace ve spalinách zvýší od použití vzduchu zhruba 4x. V případě technologie Oxyfuel ovšem již zde lze mluvit o jedné z jejich výhod. Vyseparovaný dusík ze vzduchu, jehož zbylé části jsou následně v tomto režimu užity, zapříčiňuje taktéž nižší emise NO_x , než jak je tomu u konvenčních druhů spalovacích procesů využívající vzduch. [21] [23] [26] [27] [28]

3.2.1 Historie a současný stav

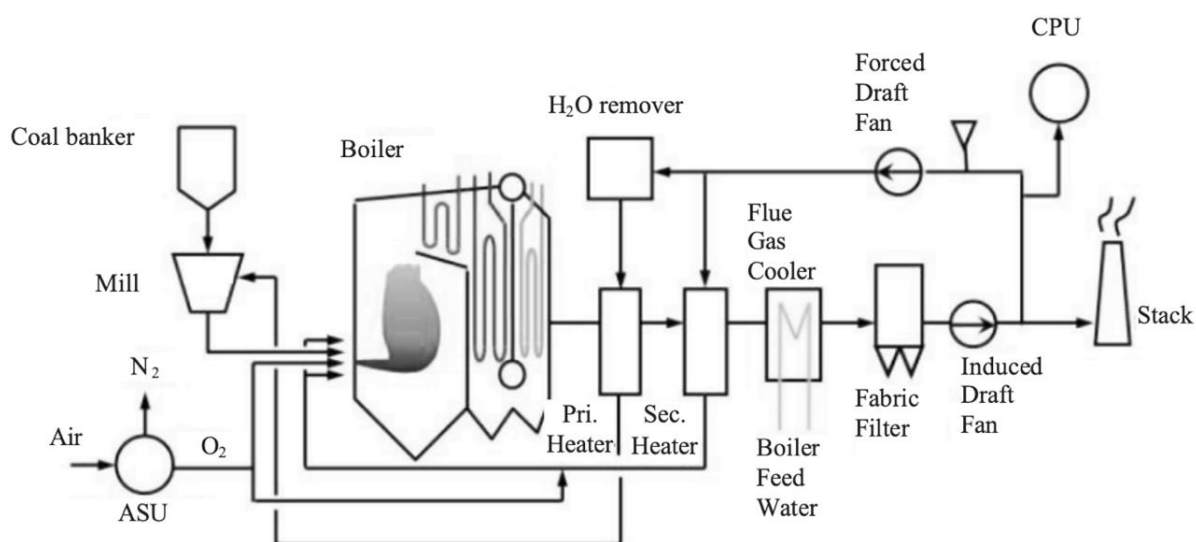
Historie prvotních užití metod fluidních vrstev sahají, jak již bylo zmíněno, do počátků 50. let. V případě metody Oxyfuel a jejího aplikovaného užití byly původní záměry

poněkud odlišné od použití této spalovací technologie na dnešních zařízeních z důvodu snižování množství vypouštěného oxidu uhličitého. V kontextu prvotních experimentů, a především jejich motivace, je paradoxní, že první užití podstaty této technologie se datuje do roku 1982, kdy byly v Americe snahy o užívání téměř čistého kyslíku jako okysličovadla spalování v uhelných elektrárnách, z důvodu potřeby množství CO₂ na těžbu ropy. Oxid uhličitý byl užíván jako inertní plyn pro vytlačování ropy. Vzduch nebyl z důvodu možné reakce s ropou vhodný k využití k tomuto procesu. Z dnešního pohledu se účelná výroba CO₂ zdá poněkud zvláštní. Podstata využití této technologie se tedy o několik desítek let otočila do potřeby co nejvíce optimalizovat spalovací procesy užívaných paliv vůči požadavkům a emisním směrnicím jednotlivých státních celků, jakožto i přispění ke snížení vypouštění CO₂. Problematika Oxyfuel je tématem pro velmi velké množství světových laboratoří, které se tomuto téma tu již řadu let věnují. Dá se říci, že v dnešní době se experimenty a celkové užití této metody zahrnuje označením Oxyfuel druhé generace. U tzv. generace první se jednalo o pilotní jednotky využívající velmi nízké koncentrace obohacení procentuálního O₂ ve vzduchu, používaného jako okysličovadlo. [21] [23] [26] [28]

Praktické využití této metody je stále problematické. Většina zařízení funguje prozatím pouze v experimentálním a testovacím režimu, kdy ke komerčnímu nasazení dochází jen zřídka kdy. Důvody, které vedou ke stálé rozvaze o užití metody Oxyfuel v běžných provozech jsou zmíněny v dalších kapitolách. Ovšem příkladem, kde se již o komerční nasazení metody Oxyfuel pokoušejí je elektrárna v australském Queenslandu. Ilustrační foto elektrárny, i její schéma fungování je zobrazeno níže. [23] [28][29]3



Obrázek 10: Ilustrační fotografie elektrárny Callide využívající komerční nasazení systému Oxyfuel [26]

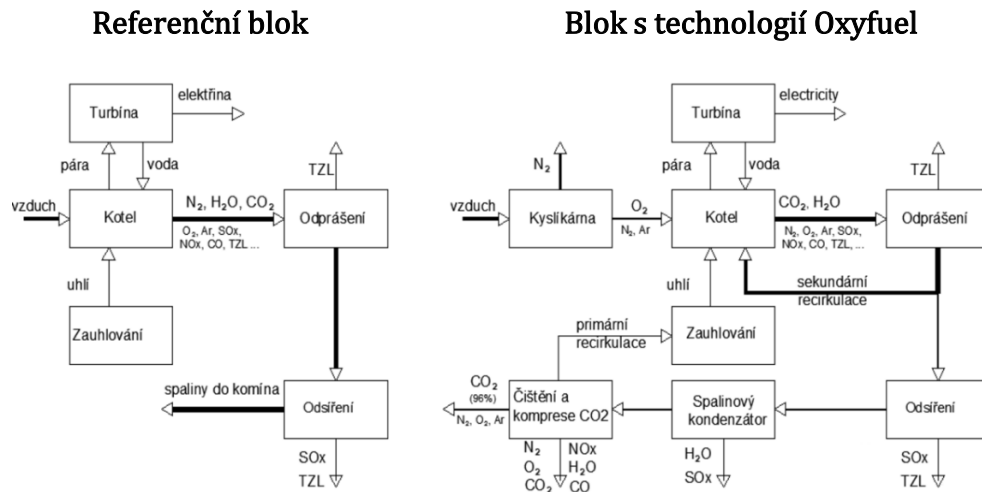


Obrázek 11: Principiální schéma fungování elektrárny Callide [26]

3.2.2 Separace kyslíku – ASU (Air Separation Unit)

Dle podstaty technologie Oxyfuel je zřejmé, že jedním z hlavních zařízení, které je nutné provozovat společně se zavedením této metody do komerčního provozu jsou separační jednotky na výrobu kyslíku ze vzduchu. Pro úplnost, výrobu vysoce koncentrovaného kyslíku, aby byly splněny podmínky pro plné využití podstaty této metody v dnešním měřítku. V malých laboratořích se kyslík vyrábí několika způsoby, primárně však termickým rozkladem některých oxidů a kyslíkatých solí. V průmyslové oblasti by ovšem pro potřebné množství tato metoda byla vysoce neefektivní, využívá se proto frakční

destilace zkapalněného vzduchu, či vyloženým frakčním zkapalňováním vzduchu. [28][29][30]



Obrázek 12: Porovnání referenčního bloku se začleněním technologie Oxyfuel [20]

Kyslík vyseparovaný touto metodou obsahuje průměrně nízká procenta zbylého dusíku a asi 3 % argonu, jehož teplota varu je blízká teplotě varu kyslíku (Kyslík: -183 °C, Argon: -185,8 °C). Z tohoto důvodu je velmi obtížně vyseparovatelný, ovšem podstatu spalovacích procesů z důvodu svých inertních vlastností narušuje pouze svou obsahovou složkou v čistotě kyslíku. [28]

K efektivní výrobě kyslíku je nutno použít takových jednotek, které budou energeticky nenáročné a, s tím spojeno, taktéž ekonomicky výhodné. To je ovšem primárním problémem metody Oxyfuel. Množství energie vydané na separaci kyslíku, které je spotřebována z primární energie, které je schopno následně dané množství vyseparovaného kyslíku vyrobit, se pohybuje od 29 do 32 %. Téměř tedy třetina energie, kterou za pomoci metody Oxyfuel vyrobíme je užita k opětovné separaci kyslíku. [28][29]

Z tohoto důvodu je jeden z hlavních cílů zefektivnit stávající metody a užívat lepších a energeticky úspornějších technologií, které by procento spotřeby snížili. V tomto ohledu se v současné chvíli pravděpodobně nejvíce očekává od tzv. membránových metod, které ve finále snižují celkové náklady na tento krok až o 30 %. [28][29][30]

Energie vyrobená za pomoci užití režimu Oxyfuel je použita nejen k separaci N₂ z okysličovačla, ale taktéž musí být uvažováno, že část z ní bude užita na kompresi odpadního CO₂. Ač by se to nemuselo zdát, množství této energie není zanedbatelné. V poměru vůči vzduchovému spalování je tato hodnota ovšem stále menší, než je

množství energie užitá k separaci jednotlivých složek spalin a chemické vypírce. Tato úspora taktéž přidává technologii Oxyfuel na její celkové účinnosti v reálné aplikaci. [28] [29][30]

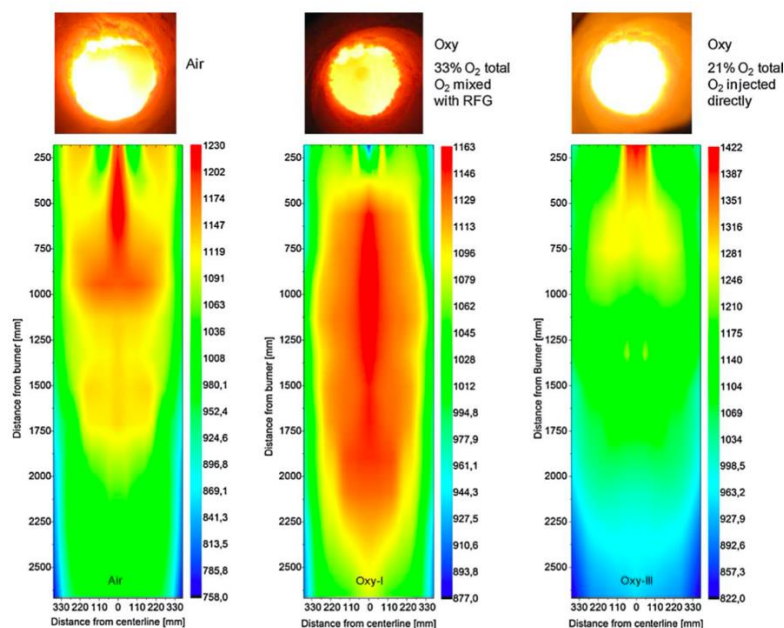
3.2.3 Recirkulace spalin

Další technologicky obměněnou vůči konvenčnímu spalování je u metody Oxyfuel zavedení recirkulace. Ta je pravděpodobně společně s nutností separací kyslíku druhým nejzásadnějším zásahem do celého procesu spalování. Protože jsou u technologie Oxyfuel objemy užívaného oxidačního média vháněné do spalovacího procesu bez uvažování recirkulace asi 5x menší, je nutné zvýšit objemy recirkulovaných spalin, protože za těchto podmínek by množství nestačilo k dostatečné fluidaci materiálu. Společně se zavedením poměrově velmi velkého množství recirkulace je zaručena správná funkce fluidní vrstvy. Tím se přibližujeme podmínkám spalování se vzduchem. Oxid uhličitý společně s vodní parou v tomto případě nahrazuje majoritní složku dusíku ve vzduchu za konvenčního spalování. Zvýšení objemu spalin ve spalovací komoře za pomoci recirkulace taktéž ovlivňuje přestup tepla do výhřevných ploch. U zařízení fungujících za vzduchového spalování jsou výhřevné plochy dimenzovány na množství spalin za daného složení vzduchu. Protože je ovšem množství spalin v režimu Oxyfuel menší, výhřevné plochy by nebyly dostatečně prohřívány a zařízení by ztrácelo svou účinnost. A to i přes to, že CO₂ i H₂O mají ve srovnání s dusíkem vyšší tepelné kapacity. [29][31][32]

V tomto případě se tedy jedná o recirkulaci vnitřní, resp. mokrou. Nedochozí ke kondenzaci vodních par z recirkulovaných spalin jako u recirkulace vnější. Spaliny tedy nejsou ochlazené o množství tepla, které sebou nese vodní pára, stejně tak se mění i jejich látkové vlastnosti. Horká recirkulace může mít za následek taktéž snížení emisí NO_x. [29][31][32]

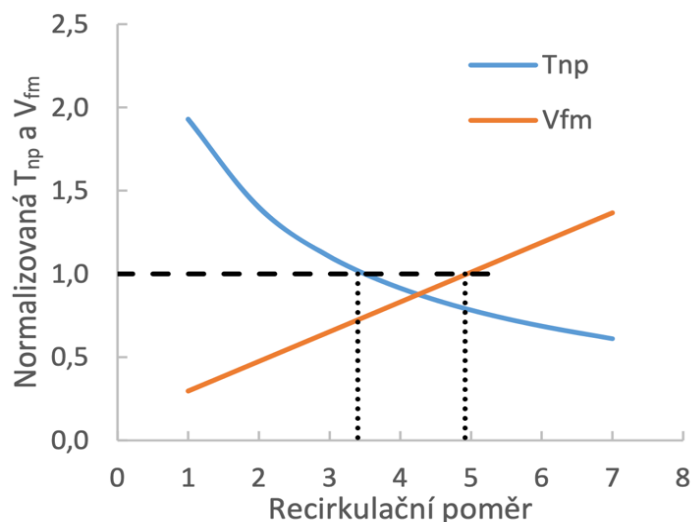
V případě metody Oxyfuel je dalším odůvodněním zavedení recirkulace tzv. teplota nechlazeného plamene. Z důvodu užití čistého kyslíku jako spalovacího média může teplota nechlazeného plamene dosahovat až více než 3000 °C. Což je teplota pro tento druh spalovacího procesu samozřejmě zcela nevhodná. [29][31][32]

Pro znázornění na následujícím obrázku lze vidět rozložení intenzity teploty v délce spalovacího zařízení za různých spalovacích režimů obsahující režim Oxyfuel za nízké koncentrace O₂ v okysličovadle. [29][31][32]



Obrázek 13: Rozložení intenzity teploty v délce spalovacího zařízení za různých spalovacích režimů [29]

Teplota nechlazeného plamene a dodržení dostatečného průtoku fluidačního média ovšem nejdou ruku v ruce. Při reálném zacházení se zařízením pracující touto metodou je důležité vždy nalézt mezi průtoky vhodný kompromis. Vhodný průtok recirkulace pro dostatečnou fluidaci obvykle bývá nevyhovující z hlediska teploty spalovacího procesu, který může být dost nízký. Naopak při nastavení recirkulace tak aby byly srovnatelné teploty spalování se vzduchem, dochází k výraznému snížení průtoku fluidačního média a tím až k nedostatečné fluidaci. Tento fakt lze taktéž pozorovat z následujícího grafu vyplývajícího z předchozích měření Ústavu Energetiky ČVUT v Praze, kde byla snaha o normalizování teploty nechlazeného plamene a objemu fluidačního média. [31][32]



Graf 1: Vliv recirkulačního koeficientu na T_{np} a V_{fm} [18]

T_{np} = teplota nechlazeného plamene

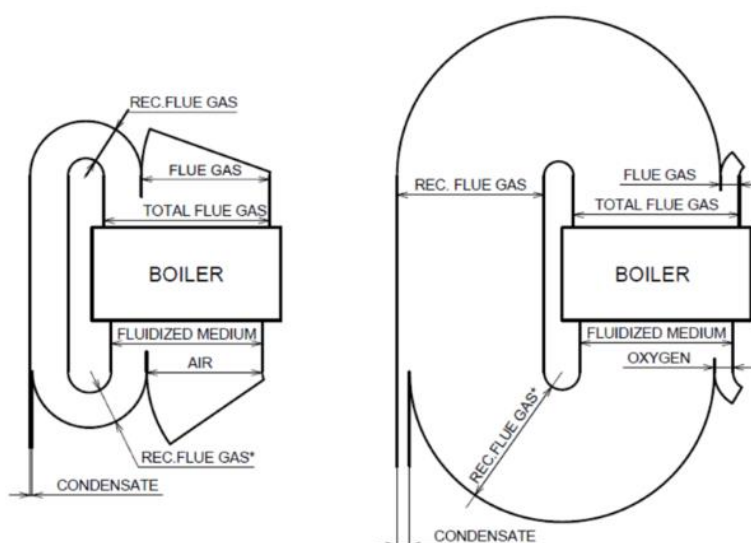
V_{fm} = objem fluidačního média

$$r = \frac{V_{FGR}}{V_{FG}} [-] \quad (2)$$

Recirkulační koeficient je údaj, ze kterého lze poměrově vyčíst objemové množství spalin, které je třeba tzv. recirkulovat. Obvyklý recirkulační koeficient se u klasického spalování vzduchem pohybuje kolem hodnoty 0,3. Jelikož je vzorec pro jeho výpočet poměrem spalin recirkulovaných vůči spalinám odvedených ze spalovacího procesu, lze u této hodnoty říci, že množství recirkulovaných spalin odpovídá třetině objemu spalin odvedených. U Oxyfuel režimu se hodnota recirkulačního koeficientu pohybuje mezi 3 až 5. Množství spalin, které je opětovně do procesu vráceno je tedy 3x až 5x větší než množství, které je odvedeno spalinovodem. [17][18][31][32]

Vzduchové spalování

Oxyfuel spalování



Obrázek 14: Porovnání průtoků recirkulace při vzduchovém a Oxyfuel spalování [17]

3.2.4 Dočišťování spalin

Jak již bylo zmiňováno v předchozí kapitole, jednou z hlavních výhod metody Oxyfuel je celkově menší množství spalin, co do objemu, oproti zařízení stejného výkonu užívající vzduchu jako okysličovadlo. Díky následné kondenzaci vodní páry se při objemu spalin, které již nejsou recirkulovány a opouští zařízení, generuje proud plynu s převážnou koncentrací CO_2 , nízkým obsahem kyslíku, dusíku a taktéž s nízkými obsahy SO_x , NO_x , N_2O , perzistentních organických polutantů a těžkých kovů. [30][31][34][35]

Dopady daných podmínek na emise jsou ovšem navzdory existenci mnoha demonstračních jednotek v oblasti výkonů desítek MW stále studovány pro různé druhy paliv. Hlavním zájmem technologie dočištění spalin je především odprášení, odsíření a denitrifikace, stejně jako vliv této technologie na selektivní nekatalytickou redukci. Jak již bylo zmíněno, vysoké koncentrace O_2 ve vstupním plynu a následná vysoká koncentrace CO_2 ve spalinách mají dopady na spalovací teploty. S těmi samozřejmě taktéž souvisí mechanismus tvorby NO_x , rozklad vápence, těkavost sloučenin, či formování aerosolů. Především v oblastech odsíření je problém s dodržáním teplot vhodných pro suchou metodu odsíření, aby mohla vhodně probíhat reakce mezi vápence a obsaženými sloučeninami síry. [30][31][34][35]

Následné dočištění spalin je další poměrně nákladnou položkou v procesu již tak nákladného provozu, taktéž převážně pro malé koncentrace těchto složek. Ačkoliv nejsou ještě plně známy limity ostatních látek pro kompresy a následné nakládání s CO₂, lze předpokládat jejich maximální koncentrace na úrovni desítek ppm. [30][31][34][35]

3.2.5 Provozní parametry Oxyfuel spalování a fluidní vrstva

Je již mnoho laboratorních jednotek, které se zabírají problematikou provozu této technologie. Pro představu, jsou to například instituce jako CanmetEnergy v Kanadě, Centrum technického výzkumu VTT ve Finsku, univerzita v Utahu ve Spojených státech, Univerzita Czestochowa v Polsku, Chalmers University of Technology ve Švédsku a Jihovýchodní univerzita v Číně. Napříč veškerými institucemi se jedná o výzkumy Oxyfuel jak v bublinkující, tak v cirkulující fluidní vrstvě. [30][31][33]

Jak již bylo zmiňováno, Oxyfuel režim je v mnoha ohledech odlišný od spalování za pomoci vzduchu. Je třeba modifikovat celé spalovací zařízení, od přívodů okysličovadla, recirkulace spalin, po optimalizaci výměňkového traktu, dále funkci odsíření, odprášení spalin, nebo hodnoty přebytků spalovacího média. Například ty jsou oproti konvenčnímu spalování výrazně menší. Některé ze systémů je ke stávajícím spalovacím zařízením třeba i nově instalovat, jako například tzv. kyslíkárnu, neboli separační jednotku pro výrobu kyslíku, sušku paliva, spalinový kondenzátor, nebo zařízení pro čištění a kompresi CO₂. [30][31][33]

Provozní parametry metody Oxyfuel se ovšem v mnoha ohledech taktéž neliší. V případě nutnosti úpravy paliva, stejně tak přidávání aditiva jsou dodržovány normy klasického spalování dle užití technologie, pouze se v tomto případě může jednat o vyšší předsoušení. Poměry teplot přehřevu okysličovadla se pohybují taktéž na stejných hladinách, ovšem jeho rozdělování v kotli je velmi problematické. To je třeba optimalizovat taktéž z důvodu možných slepování částí popela, zanášení výhřevných ploch, nebo změnou korozních charakteristik kovových materiálů. [30][31][33]

3.3 Cíle, výhody a nevýhody režimu Oxyfuel

Cíle

- 1) Generování proudu spalin s vysokou koncentrací CO₂ snadnější pro dočištění a celkovou separaci
- 2) Potenciál návrhu dané technologie na základě konceptu Zero emission technologies

Výhody

- Složení spalin
- Snazší separace jednotlivých složek spalin
- Menší množství spalin
- Úspora energie na separaci a chemickou vypírku spalin
- Lze tuto technologii přizpůsobit jak novým, tak stávajícím fluidním, práškovým, i roštovým spalovacím technologiím
- Z důvodu tepelných kapacit plynů možná nižší teplota spalin na výstupu z kotle

Nevýhody

- Nákladná výroba a velká spotřeba energie na okysličovací médium
- Náročnější automatizace procesu
Rozdílné průtoky okysličovadla, recirkulovaných spalin a spalin opouštějící proces
- Rozdílné fyzikální vlastnosti složení spalin
- Problematika rozmístění recirkulovaných spalin do reaktoru vůči přiváděnému okysličovadlu
- Problémy se stabilitou plamene a zapálením (dle několika proběhlých studií)

[28][29][30][31][32][33]

3.4 Oxyfuel spalování biomasy

Spalování biomasy bylo již zmíněno v části o technologii fluidního spalování. Z provozních parametrů režimu Oxyfuel bylo uvedeno, že se v tomto případě nijak neliší. Různé druhy biomasových materiálů vhodně upravených k využití ve fluidní technologii, musejí být ve spalovací komoře doplněny o předem vpravený materiál, který v závislosti na nízkou popelovinu biomasy vytváří společně s palivem fluidní vrstvu. Protože ovšem tuto vrstvu není nijak nutno odlišovat od vrstvy, kterou chceme spalovat za pomoci režimu Oxyfuel, jsou tyto parametry naprosto stejné. Odlišné parametry spalovacího procesu přicházejí až právě s odlišností okysličovadla, nikterak ovšem nezáleží na nutnosti úpravy paliva oproti konvenčnímu vzduchovému spalování. Ty jsou ovšem také ve většině shodné se vzduchovým spalováním. Stále je třeba ovšem řešit problematiku roz distribuování okysličovadla po ploše reaktoru, z důvodu možného spékání materiálů tvořících fluidní vrstvu. To je především problém u aplikací Oxyfuel na kotle stavěné na konvenční fluidní spalování. Taktéž u některých druhů biomasy, jako je například sláma, se často musejí provozovatelé potýkat s problematikou měknutí popelovin, způsobených právě vysokými teplotami a následným spékáním vrstvy. Z tohoto důvodu je v tomto režimu velmi důležité dodržovat předem stanovené teploty spalování, společně s dostatečným průtokem recirkulovaných spalin, ač vyložená spojitost režimu Oxyfuel se spékáním vrstvy a tavením popeloviny doposud nebyla laboratorně prokázána.

[17][18][28][30]

4 Spalovací ztráta v podobě nedopalu

4.1 Druhy ztrát při spalování

Nejdůležitějším aspektem a hodnotícím měřítkem pro každé zařízení vydávající energii, či konající práci je samozřejmě množství práce, které je schopno zařízení dodat v poměru ku přivedené energii. Tedy jeho účinnost. Ta se buďto za pomoci tohoto poměru stanovuje přímo, nepřímo potom po odečtení veškerých ztrát při procesu přeměny energie z množství energie do procesu vložené. U spalovacích zařízení tomu není jinak. V případě kotlů se bavíme o pěti základních ztrátách tepla, resp. energie, které při provozu zařízení musíme uvažovat. [16][40]

Jsou to:

1) Ztráta hořlavinou ve spalinách

- ztráta chemickým nedopalem oxidu uhelnatého

2) Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

- ztráta vycházející z množství nespálené hořlaviny v popelu a popílku.

3) Fyzickým teplem spalin (tzv. ztráta komínová)

- ztráta vycházející z množství tepla, které sebou nesou spaliny opouštějící spalovací proces a jsou vypouštěny do ovzduší

4) Fyzickým teplem tuhých zbytků

- ztráta vycházející z množství tepla, které akumulují tuhé zbytky propadávající roštem, čili například popel, popílek, nespálené tuhé zbytky atd.

5) Sdílením tepla do okolí

- ztráta vycházející z množství tepla, které sálá do okolí ze samotného zařízení (zřetelné například na teplotě povrchu kotle)

První dvě z uvedených ztrát jsou ztráty, o kterých přímo pojednává experimentální část této práce. Ztráta hořlavinou ve spalinách a hořlavinou v tuhých zbytcích se dá komplexně nazvat jako ztráta nedopalem. Jedná se tedy o část paliva, u kterého nebyl využit jeho energetický potenciál. [16]

4.2 Ztráta nedopalem

Při podrobnějším rozboru této ztráty je zřejmé, že u každého ze spalovacích zařízení se tato ztráta jeví v jiných poměrech. V některých případech je ztráta převážně ve složce unášené spalinami, jindy se větší množství nespáleného uhlíku objevuje v popelu a strusce, což je problém především u roštových ohnišť s většími kusy podávaného paliva. Tento fakt není nikterak omezen na druh pevných paliv. Vzhledem k tomu, že nedopal je spalitelný uhlík obsažený v popelu je problematika a fyzikální podstata špatného dohořívání uhlíku obsaženého v palivu jak u biomasy, tak např. u uhlí stejná. [36][37][38][39]

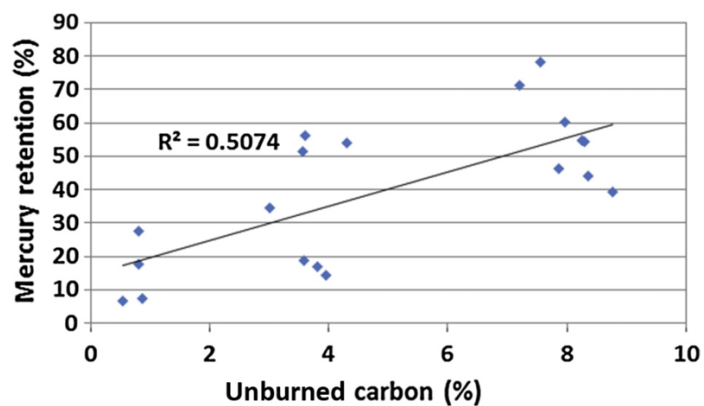
Častým důvodem ztráty v tuhých zbytcích je především krátké setrvání paliva ve spalovacím procesu, a taktéž špatný přístup kyslíku z oksyličovadla ke všem místům ve vrstvě paliva. To je zřetelné především u spodních a vnitřních míst vrstvy paliva stacionárního spalování. Důvody ke zbytkům nevyhořelého paliva unášeného spalinami jsou obdobné. V tomto případě ovšem dominuje především krátké setrvání ve spalovacím procesu, z důvodu unášivé rychlosti spalin. [36][37][38][39]

Z chemické podstaty spalovacího procesu se uhlík obsažený v palivu za pomoci kyslíku nejprve transformuje dle rovnice $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ na oxid uhelnatý, následně pak dle reakce $CO + O_2 \rightarrow CO_2$ na oxid uhličitý. Jelikož je ovšem jednou z procentuálních složek spalin i oxid uhelnatý, jeho nevyhoření je taktéž ztrátou pro celý spalovací proces. K jeho ideálnímu vyhoření je dle rovnice zapotřebí kyslíku, jehož nedostatek, či jeho problém s rozložením v zařízení může vést právě k této ztrátě, a především pak vhodných teplot pro jeho ideální vyhoření. Problém s teplotami může být zapříčiněn například nevhodným roz distribuováním přívodu oksyličovadla. Dalším aspektem může být taktéž problematika chemické rovnováhy, která se již přímo dotýká Oxyfuel technologie.

[34][35][38][39]

Zajímavostí je, že pokud pomineme účinnost spalovacích zařízení a celkovou problematiku ztráty nedopalem v energetice, některé americké studie popisují taktéž problém s množstvím nespáleného uhlíku v produktech spalování z hlediska jejich následných využití, jako je například přidávání do betonu, nebo tvorba cementu. S nespáleným uhlíkem v popelu souvisí např. i množství rtuti v popelu a ve spalinách.

S rostoucím nespáleným uhlíkem stoupá množství rtuti v popelu a klesá množství rtuti ve spalinách. [34][35][38][39]



Graf 2: Množství obsahu rtuti v popelu vůči množství nespáleného uhlíku v palivu [37]

4.3 Ztráta nedopalem ve fluidních ohništích

Co se týče charakteristik tvorby popela a výzkumu množství nedopalu, většina vědců se doposud zaměřila na výzkum spalování roštových ohnišť, zatímco existuje jen málo studií o nespálených zbytcích ve fluidních kotlích. Jak již bylo zmíněno, každá ze spalovacích technologií disponuje jinými spalovacími režimy, při kterých se množství nedopalu více, či méně projevuje v různých zastoupeních. V případě fluidního ohniště, potažmo při fluidním spalování biomasy, je jednou z hlavních složek nedopalu množství nespáleného uhlíku zachyceného v cyklonu. Z důvodu množství a tlaku přiváděného okysličovadla, které je zároveň fluidačním médiem je úletovost nedopalu ve spalinách vyšší, převážně u cirkulující fluidní vrstvy, než je tomu u klasických roštových ohnišť. Fluidní vrstva s dobrým promícháváním paliva a okysličovadla je taktéž důvodem, proč je ztráta nedopalem v tuhých zbytcích u fluidních ohnišť poněkud menší. V případě biomasy je produkce popela celkově minimální, jak už bylo zmíněno v části o fluidním spalování. Veškeré tyto aspekty platí jak pro stacionární, tak pro cirkulující fluidní vrstvu, u které je ztráta nedopalem v tuhých zbytcích ještě minimalizována opětovným vrácením částice do spalovacího procesu, dokud není její struktura taková, aby na základě technologického nastavení mohla opustit proces spalování. Z těchto důvodů jsou fluidní technologie velmi výhodným zařízením, co se do energetického využití potenciálu paliva týče. [8][9][36][37]

4.4 Ztráta nedopalem v režimu Oxyfuel

Ač by se mohlo zdát, že z podstaty funkce procesu a popisu celé technologie by měla metoda Oxyfuel nahrávat lepšímu vyhoření paliva, než je tomu u klasického spalování vzduchem, tato technologie sebou nese odlišné problémy. Problematiku špatného přístupu okysličovacího média ke kusům paliva lze téměř v tomto případě vypustit, jednak z důvodu míšení paliva ve vrstvě, nadále pak z důvodu koncentrace okysličovadla v případě technologie Oxyfuel. Toto složení ovšem stále neřeší možný problém délky setrvání částic paliva ve spalovacím procesu, který, jak již bylo zmíněno, vede taktéž ke ztrátě nedopalem. [28][33][36][37]

Problém, který Oxyfuel technologie přináší v ohledu na ztráty nespálených zbytků je již zmíněná chemická rovnováha a bod nasycení. Samotná podstata využívání této technologie staví na velmi velké koncentraci CO_2 ve spalinách, což je hlavním důvodem problematiky chemického nedopalu této technologie. Okysličovadlo je mícháno s recirkulací za obvyklých koncentrací 90 – 95 % O_2 (v případě následného experimentu 99 %) a je třeba, aby fungovaly již zmiňované chemické rovnice hoření pro reakci uhlíku s kyslíkem. Tedy aby $\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} \dots + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$. Problém ovšem nastane, pokud je v systému dosaženo v případě oxidu uhličitého „bodu nasycení“. Stav, kdy je ve spalovacím reaktoru koncentrace CO_2 , které následně putuje se spalinami ven již taková, že z chemické podstaty nemůže proběhnout reakce mezi oxidem uhelnatým a přivedeným kyslíkem. Poté následně v procesu vyvstává nejen problém nespáleného CO , který opouští spalovací prostor jako ztráta hořlavinou ve spalinách, ale taktéž je zvýšena koncentrace O_2 ve spalinách. [36][37][40][41]

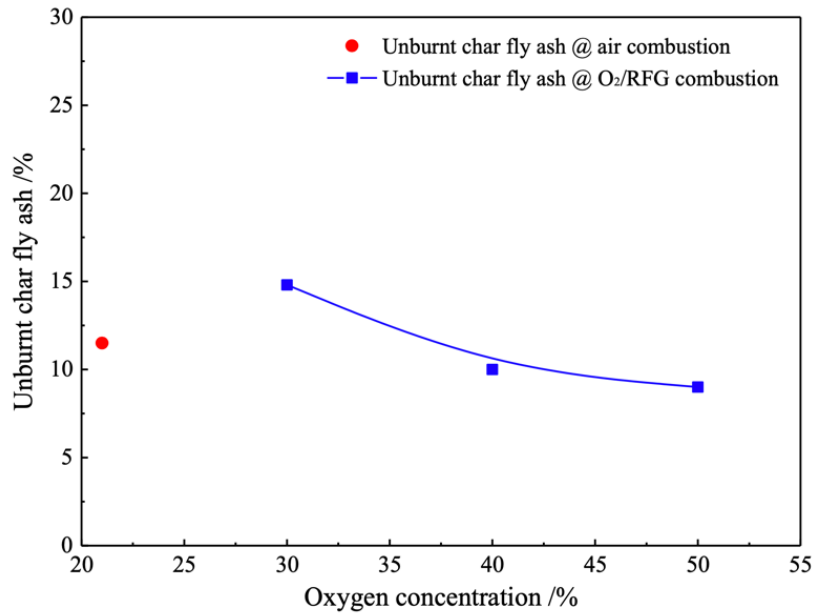
Pokud se snažíme urychlit tvorbu produktu C v rovnici $A + B \leftrightarrow C$, musíme urychlit odběr produktu C . Z této podstaty bude proces tvorby produktu C urychlen pro dorovnání rovnovážného stavu. V technologickém procesu Oxyfuel by tedy bylo třeba urychleně odebírat ze spalovacího reaktoru CO_2 , aby znovu mohla reakce oxidu uhelnatého a kyslíku dosáhnout 100 %. Nicméně proud spalin vycházející ze spalovacího procesu má své limity tvořené samotným spalováním, společně s podstatou termické přeměny. Proto je třeba celé zařízení a jeho funkci technologicky navrhnout tak, aby průtok okysličovadla, přidávání paliva a další aspekty konstrukce zařízení byly přesně

připravené na dané množství CO₂, které při spalování bude vznikat a kontinuálně opouštět spalovací proces. [36][37][40][41]

4.4.1 Proběhlá experimentální měření nedopalu Oxyfuel režimu

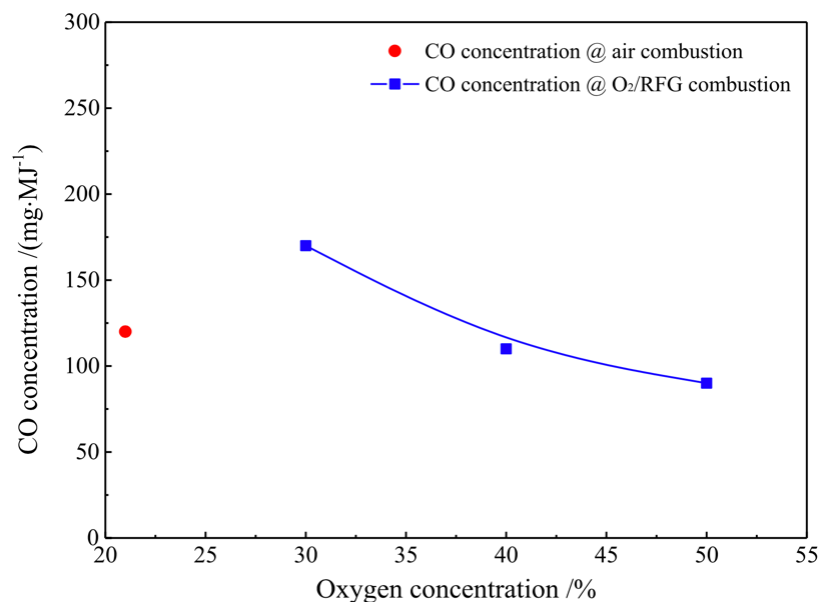
V ústavu pro inženýrskou termofyziku Čínské akademie věd byl proveden výzkum, za kterého byla posuzována rozdílnost spalování za pomoci cirkulující fluidní vrstvy se vzduchem a za režimu Oxyfuel s různými poměry okysličovadla vůči recirkulovaným spalinám, kde hlavními posuzujícími aspekty bylo hledisko dopadu na účinnost spalování uhlí, emise plyných znečišťujících látek, účinnost odsiřování vápence a charakteristika formování popela v 1 MWt pilotní jednotce Oxyfuel CFBC. Ač tento experiment probíhal za užití uhlí, podstata jeho výsledků je pro porovnání úměrná spalování biomasy. [36]

Experimentální výsledky ukázaly, že obsah nespáleného uhlí v popílku pro režim spalování Oxyfuel 30 % O₂/RFG je o něco vyšší, než obsah nedopalu pro režimu spalování se vzduchem. Když se však poměr O₂/RFG zvýší již na hodnotu 40 %, je obsah nespáleného materiálu v popílku menší než obsah nedopalu získaný z popela při režimu vzduchového vypalování. Lze tedy na základě tohoto experimentu říci, že pro menší poměry recirkulovaných spalin vůči přivedenému O₂ v okysličovadle se situace dohořívání paliva zhorší, po překročení hranice koncentrace 40 % O₂/RFG v okysličovadle se situace začne naopak zlepšit, resp. se množství nedopalu se zvyšujícím se poměrem O₂/RFG snižuje, jak je taktéž vidět na následujících grafech. [36]



Graf 3: Nespálený uhlík v popelu (vrstvě) při různých režimech spalování [36]

Dle závěrů dané studie Čínské univerzity existují dva hlavní důvody pro zvýšení množství nespáleného uhlí v popílku při spalovacím režimu Oxyfuel za poměru 30 % O₂/RFG. Za prvé, zvýšená koncentrace CO₂ ve spalování může zpomalit rychlost oxidace uhlí, což povede k vyššímu obsahu nespáleného uhlíku. Za druhé, rychlost spalování uhlí v atmosféře 30 % O₂/RFG může být nižší než ve vzduchu, což je připisováno tepelné kapacitě CO₂ vyšší než u N₂, a difuzivitě O₂ nižší v CO₂ než v N₂. [36]

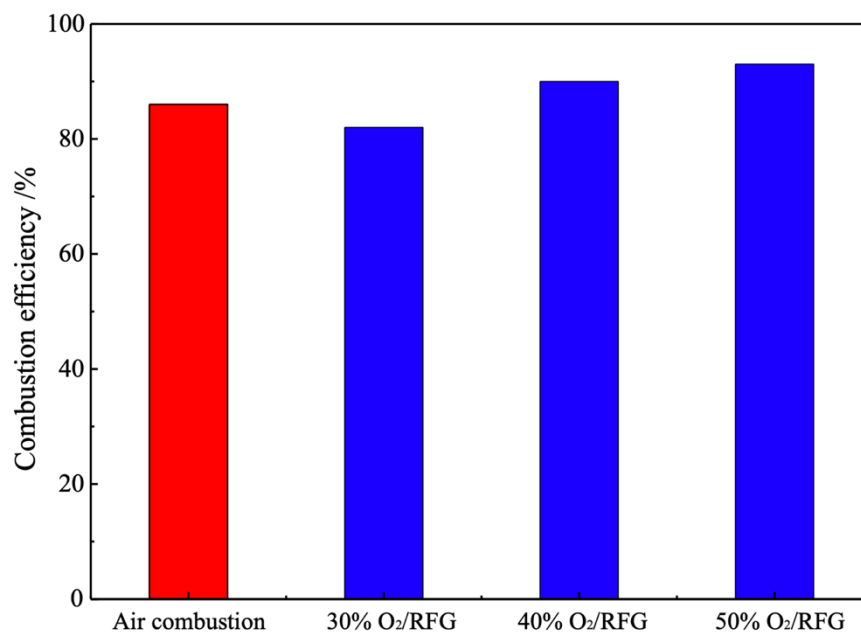


Graf 4: Normalizovaná hmotnost emisí CO v různých režimech spalování [36]

Jak lze vidět z druhého grafu, problematika chemické rovnováhy mezi CO a CO₂ se při těchto velikostech koncentrací O₂ přiváděného do procesu dokonce lepší, a množství CO ve spalinách se snižuje. Což ovšem již nemusí platit pro vyšší poměry přiváděného O₂/RFG. [36]

Chemické složení vzorků popílku získaného ze spalování se vzduchem a Oxyfuel bylo podobné, s výjimkou mírně nižších koncentrací K₂O, Na₂O a SO₃ v režimech Oxyfuel s vysokými koncentracemi O₂. [36] (Pozn. Nízké procento oxidů alkalických kovů je způsobeno zvýšenou absorpcí par alkalických kovů většími částicemi křemičitanu hlinitého, což může vést ke snížení náchylnosti k usazování popílku na površích tepelného výměníku.) [36]

Následující tabulka ukazuje hodnoty jednotlivých vzorků popílku na výstupů z cyklónu. Množství popílku v režimů spalování Oxyfuel bylo nižší, než v režimu spalování vzduchem. Se zvyšující se poměrem vstupního O₂/RFG se velikost částic popílku taktéž mírně snižovala. V tomto případě byly během spalovacího režimu Oxyfuel vstupní poměry vůči recirkulovaným spalinám 30 %, 40 % a 50 %. Rozložení mezi primárním a sekundárním plynem bylo stejné. [36]



Graf 5: Účinnost spalování v různých režimech [36]

Jak lze vidět na tomto grafu, množství nedopalu v režimu spalování Oxyfuel 30 % O₂/RFG je o něco vyšší, než při provozu spalování se vzduchem. Když však poměr přesáhne hodnotu 40 % O₂/RFG, je obsah nedopalu menší, než v režimu spalování vzduchem.

Kromě toho se vzrůstající koncentrací O₂ v kompletně přivedeném plynu během spalování Oxyfuel postupně klesá obsah nedopalu v popílku. Zdůvodnění jsou v tomto případě stejná, jako u nedopalu v popelu (vrstvě). [36]

Pouze pro zajímavost, v případě tohoto měření ve srovnání s režimem spalování se vzduchem byly emise SO₂ v jednotlivých režimech Oxyfuel výrazně vyšší, a účinnost odsiřování vápence je nižší. Emise NO byly mnohem nižší, ovšem emise N₂O vyšší, než emise v režimu spalování se vzduchem. Přičemž množství emisí N₂O je téměř stejné, jako odpovídající emise NO. Ovšem v chemickém složení popílku ve vzduchu a Oxyfuel nebyly žádné zjevné rozdíly, s výjimkou mírně nižšího procenta K₂O, Na₂O a SO₃ v režimech Oxyfuel při vyšších poměrech O₂/RFG. [36]

4.5 Emisní faktor CO

Chemický nedopal není tvořen pouze samotnou problematikou chemické rovnováhy. Vyhoření CO je především závislé na množství okysličovadla a teplotě. V teoretické části této práce již bylo vysvětleno, jakým způsobem se odlišují druhy nedopalu v podobě oxidu uhelnatého a pevných nevyhořelých částic. Dle jednotlivých naměřených hodnot objemových koncentrací oxidu uhelnatého u daných spalovacích stavů lze poté určit, které ze spalování (vzduch/oxyfuel) bylo na dohořívání CO efektivnější. Protože se ovšem jedná o dva naprosto odlišné druhy spalování, co se především do koncentrace přiváděného okysličovadla a následně kompletního složení prvků spalin v kotli týče, je třeba měřené údaje objemových koncentrací CO převést na emisní faktor. Jedině tak lze porovnávat hodnoty výstupních EF_{CO} mezi spalováním vzduchem a Oxyfuel. Tyto hodnoty jsou relevantní pro určení, která z uváděných spalovacích metod je efektivnější, při uvažování nejideálnějšího vyhoření CO. [28][36][37]

Emisní faktor lze určit z rovnice.:

$$EF_{CO} = \rho_{CO} \cdot V_{SS} \left[\frac{g}{kg} \right] \quad (3)$$

Přičemž hodnotu průtoku suchých spalin získáme ze stechiometrie, hodnotu jednotlivých objemových koncentrací musíme pak určit přepočtem z měřené hmotnostní koncentrace CO následující rovnicí. [28][36][37]

$$\rho_{CO} = \Phi_{CO} \cdot \frac{M_m \cdot p_n}{R \cdot T} \left[\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right] \quad (4)$$

Za použití této rovnice lze na základě daných objemových koncentrací určit následující hodnoty hmotnostní koncentrace, a stejně tak kompletní výpočet emisního faktoru. [28][36][37]

4.6 Teoretický předpoklad výsledků měření

Z podstaty zmíněného měření v předešlé kapitole je zřejmé, že výsledky měření budou pokračovat v naznačeném trendu. Jelikož se od překlenutí poměru 30 % O₂/RFG následně výsledky množství nedopalu jak v popelu, tak v cyklonu začali oproti vzduchovému spalování snižovat, lze předpokládat, že tomu tak bude i u dalšího zvýšení koncentrace. Ze studie ovšem nemůžeme jasně předpokládat, jak bude trend postupovat v případě koncentrací CO ve spalinách z důvodu koncentrace CO₂ jak ve spalinách, tak v zařízení. Přičemž by tento fakt také při následných koncentracích ve spalovacím procesu mohl vést i ke zhoršení výsledků nedopalu ve vrstvě a v cyklonu.

V úvahu je ovšem taktéž třeba brát jistou nelinearitu snižujícího se nedopalu plynoucí z grafů měření, kdy se množství nedopalu snižuje pomaleji mezi O₂/RFG mezi 40 – 50 %, než tomu bylo v rozmezí 30 – 40 %. Tento fakt může nakonec v případě experimentální části této práce vyvrcholit až do konečného možného zvýšení množství nedopalu ve vrstvě a v cyklonu, než je tomu u vzduchového spalování ve stacionární bublinkující fluidní vrstvě spalující biomasu.

5 Experimentální část

Experimentální část této práce pojednává o určení míry nedopalu vzniklého při spalování biomasových pelet dvěma druhy spalovací technologie. Jednou ve fluidním kotli se stacionární fluidní vrstvou za klasických podmínek využívajících vzduch, podruhé metodou Oxyfuel. U obou druhů spalování jsou taktéž upravovány podmínky spalování pro různé hodnoty koncentrace kyslíku ve spalinách za teploty fluidní vrstvy 850 °C při obou měření.³ Jednotlivé vzorky, odebírány jak z vrstvy, tak z cyklonu, jsou následně vyhodnoceny opětovným vyžháním, a na základě procentuálního úbytku daného materiálu se následně vyhodnocuje míra nedopalu pro daný spalovací stav. Do výsledků měření bude taktéž zahrnut na základě sledování průběhu spalování výsledek hodnot emisního faktoru nespáleného uhlíku transformovaného do oxidu uhelnatého, který již nestačí vyhořet a společně se spalinami opouští zařízení. Ten je analyzován za pomoci měřících přístrojů a jeho výsledky vypočtené v hmotové bilanci jsou taktéž součástí výsledků experimentu, protože se jedná o výpočet postavený na reálně měřených hodnotách.

Výstupem tohoto experimentu je porovnání jednotlivých procentuálních množství mechanického nedopalu z vrstvy a cyklonu, a chemického nedopalu v podobě množství CO ve spalinách. Při následném posuzování bude dle porovnání obou technologií a jejich provozních stavech vyhodnocen neoptimálnější spalovací režim v závislosti na nejnižší míru nedopalu.

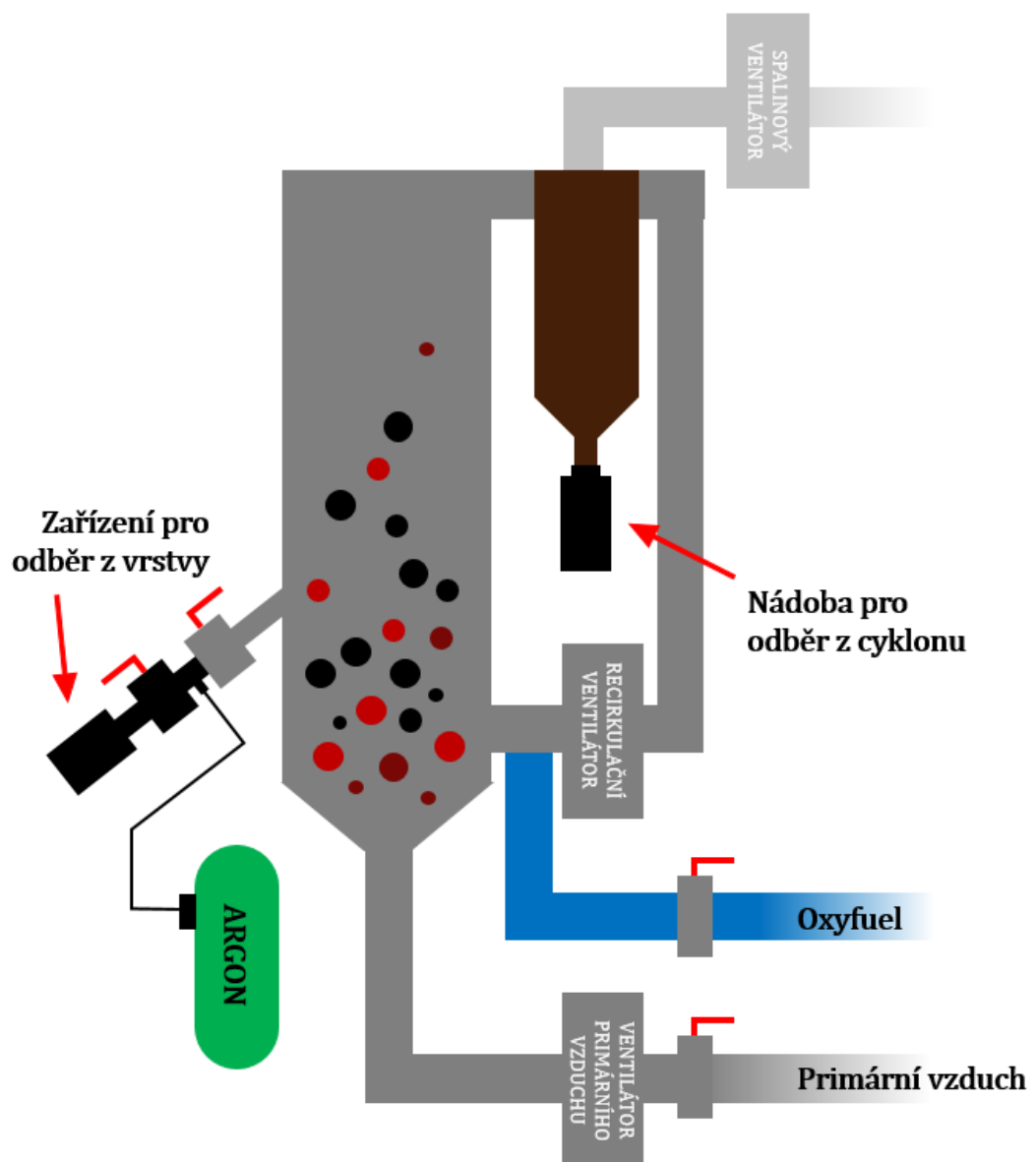
V experimentální části je taktéž zahrnuta výpočtová část bilance, kterou je třeba provést na základě výpočtu stechiometrie a teoretického určení provozních dat, která jsou porovnána s daty měřeními při provozu kotle. A tím provedeno porovnání správných teoretických předpokladů výsledků měření.

³ V rámci experimentálního měření nebylo možné nastavit přesnou teplotu ve fluidní vrstvě a přebytku kyslíku ve spalinách. Vždy bylo experimentální zařízení provozováno tak, aby se průměrná hodnota v daných časových úsecích co nejvíce přibližovala stanoveným přebytkům a teplotě.

5.1 Popis zařízení

Měření bylo provedeno na experimentálním fluidním kotli s možností spalování různých druhů tuhých paliv, s potřebnými technologickými prvky pro odběr jednotlivých vzorců a konstrukční možností připojení kyslíkových lahví pro provoz kotle v režimu Oxyfuel. Jako takový experiment vyžadoval 2 etapy, přičemž každá z etap zahrnovala jiný režim spalování.

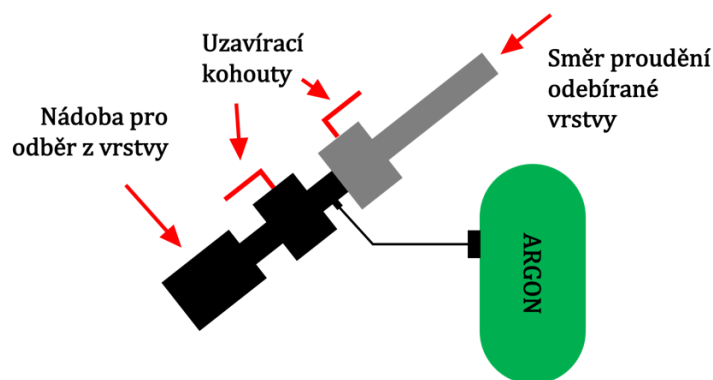
5.1.1 Schéma kotle



Obrázek 15: Schéma spalovacího zařízení

Kotel je zavěšen na konstrukci ve výšce 3 m, přičemž jeho samotná výška je 2,5 m. Spalovací prostor má obdélníkový průřez o rozměrech 15 x 22,5 cm. Kotel je vybaven recirkulací spalin. Spaliny z kotle odcházejí přes cyklonový odlučovač a jsou roz distribuovány na spaliny recirkulované a spaliny, které jsou za pomoci spalinového ventilátoru odváděny kouřovodem ven. Zařízení je taktéž napojeno na analyzátor spalin, který měří jednotlivé koncentrace složek spalin O_2 , CO_2 , CO , NO_x a SO_2 . Kotel je po své výšce vybaven termočlánky v jednotlivých částech vrstvy pro správnou detekci teploty vrstvy a jednotlivé komponenty jsou ovládány pomocí systému LabView z připojeného počítače.

5.1.2 Schéma odběrového zařízení



Obrázek 16: Schéma odběrového zařízení

Jak lze vidět ze schématu odběrového zařízení, je třeba vytvořit odběrovou nádobu, která bude vhodně fungovat při odběru vzorků. Pod cyklon je našroubována kovová nádoba, do které zbytky z cyklonu samovolně padají. Tu stačí poté pouze odšroubovat, a následně vzorky vysypat. V případě odběru z vrstvy je postup o něco složitější než u cyklonu. Je nutné zajistit, aby vzorek nedohořival i nadále v odběrové nádobě, protože vrstva, ze které je vzorek odebírána má cca 850 °C. Z tohoto důvodu je odběrová nádoba tlakována stlačeným argonem, který vzorek padající do nádoby jak ochladí, tak i zamezí přístupu vzduchu, čímž se kompletně zamezí případnému dohořívání odebraného nedopalu.

Fotografie jak odběrové nádoby, tak celého spalovacího zařízení jsou vloženy v přílohách práce.

5.2 Popis experimentu

Za konstantního provozu zařízení byly pro oba spalovací režimy odebrány vzorky za tři různých koncentrací přebytku O₂ ve spalinách na základě rozvrhu dle následující tabulky, ze kterých byla následně dle stanovené normy určena míra nedopalu. [43]

Aby se celé experimentální měření dalo považovat za relevantní, je třeba dodržet metodiku postupu vyhodnocení stanovenou normou. V tomto případě se jedná o normu ČSN 44 1355, která nese název „*Tuhá paliva. Nedopal. Stanovení uhlíku a vodíku*“. Tato norma popisuje průběh postupu při stanovení nedopalu ze vzorků tuhých paliv. V tomto případě je tedy nutné vzorky vyžít za daného stanoveného rozsahu teplot, kdy v případě tohoto měření byla užitá teplota 815 °C. [43]

Tabulka 1: Rozdělení měření

Přebytek O ₂ ve spalinách	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
3 %	1. měření	2. měření
6 %	Pro každý přebytek okysličovačla provedeny odběry vzorků z cyklonu a z vrstvy	Pro každý přebytek okysličovačla provedeny odběry vzorků z cyklonu a z vrstvy
9 %		

5.3 Provedení experimentu

Po proběhnutí nahřívání, zapálení a celkového najetí kotle na požadovanou teplotu, lze následně řízením míry přiváděného vzduchu a míry recirkulace dosáhnout požadované teploty, stejně tak koncentrace přebytku kyslíku ve spalinách. Měření jednoho stavu při ustálených podmínkách trvalo minimálně 30 minut. Po uplynutí této doby lze odebrat relevantní vzorky.

Při užití metody Oxyfuel byl kotel najížděn za standartních podmínek vzduchového spalování. Po následném ustálení spalovacího režimu a nahřátí celého zařízení byl vpuštěn do kotle kyslík z tlakových lahví a v souladu s tím vypnut průtok okysličovacího vzduchu. Následně je třeba opětovně čekat na ustálení provozních podmínek za dané metodiky spalování. Průběh odběru vzorků a postupu měření je následně již obdobný, jako u vzduchového spalování.

Následně byl každý z 12 vzorků připraven na 3 žíhací kelímky, z důvodu relevantnosti jednotlivých výsledků. Všechny 3 výsledky jsou následně průměrovány a tento výsledek udává odpovídající výstup. Vzorky byly nejprve vloženy do sušící pece na 105 °C, kde jsou ponechány 60 minut pro odpaření vlhkosti ze vzorku. Po tomto sušení se vzorky opět zváží, pro určení procentuální vlhkosti vzorku, a následně jsou vkládány do žíhací pece dle výše zmíněné normy. Po tomto vyžhání jsou vzorky opět zváženy, a následné porovnání jejich vah vede k vyhodnocení obsahu nedopalu ve vzorku před žiháním.

5.4 Materiál, palivo

Jako materiál tvořícím fluidní vrstvu byl užit keramzit s označím LWA 2-4, se středním průměrem částic 3,3 mm. Jako palivo byli použity dřevní pelety o průměru 6 mm. Složení a přepočty daného paliva jsou uvedeny v následující tabulce.:

Tabulka 2: Složení a přepočet paliva

	r	d	daf
C	0,462	0,502	0,51
H	0,063	0,068	0,069
N	0,003	0,003	0,003
S	0	$2,95 \cdot 10^5$	$2,9989 \cdot 10^5$
O	0,379	0,411	0,418
A	0,015	0,016	-
W	0,078	-	-
Qi	17711,587	16228,042	16203,507
Qs	19284,566	20916,015	21261,925



Obrázek 17: Obrázek pelet, jako využitého paliva

5.5 Parametry spalování

Jak již bylo zmíněno, pro udržení relevantnosti vzorků co do nastavení jednotných podmínek pro spalování je nutné, aby některé z hodnot, které nejsou v rozporu s jednotlivými změnami stavu spalování zůstaly konstantní. Tak lze zajistit, že je složení jednotné a tvoří jej reprezentativní vzorky. Stejně tak je třeba některé hodnoty měnit v návaznosti na potřebné koncentrace přebytku kyslíku ve spalinách.

Tabulka 3: Parametry spalování

	Vzduch			Oxyfuel			
Teplota vrstvy	875,6	871,6	847	742,4	798,8	847,5	°C
Požadovaný podíl O ₂	3	6	9	3	6	9	%
Reálný podíl O ₂ ve spalinách	3	6,8	9,2	3,4	5,2	10,5	%
Množství paliva	8,208	8,208	8,208	8,208	8,208	8,208	kg/h
Přebytek vzduchu α	1,161	1,474	1,768	1,032	1,049	1,106	1
Průtok okysličovadla	51	60	73	7,98	7,96	8,14	Nm ³ /h
Velikost recirkulace	32,54	26,29	21,30	49,5	49,6	55,9	Nm ³ /h
Recirkulační koeficient r	0,638	0,438	0,291	6,203	6,237	6,877	1

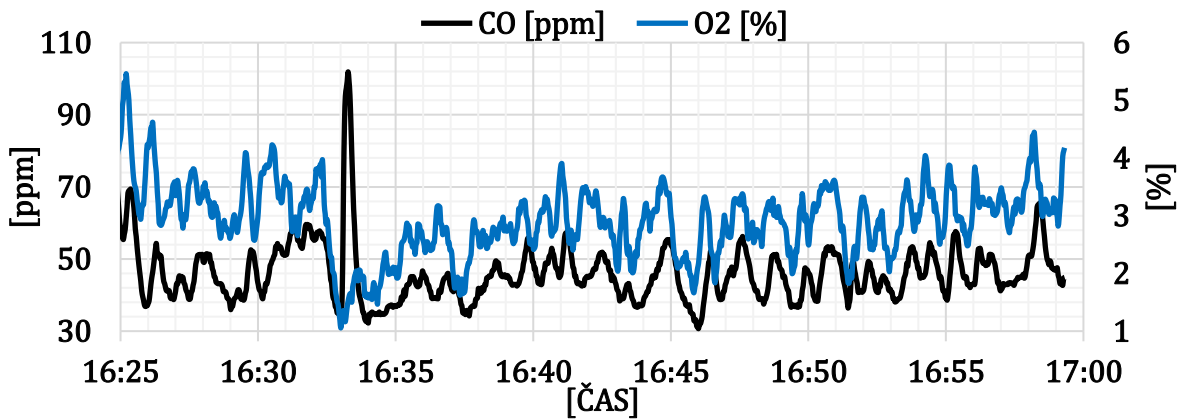
Veškeré parametry spalování pro jednotlivé etapy jsou uvedeny ve výše vložené tabulce. Kompletní průběhy jednotlivých spalovacích režimů jsou uvedeny v přílohách.

5.6 Průběh spalování

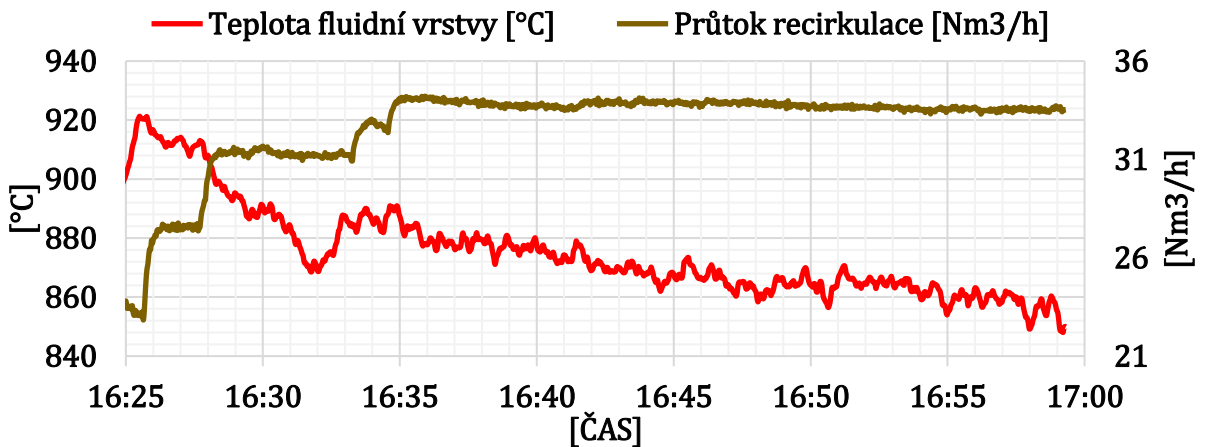
Z důvodu pozdějšího vyhodnocení a diskuze výsledků je ovšem nutné vynést některé na sobě závislé prvky, aby bylo možné následně posoudit průběh spalování vůči výsledkům experimentu.

5.6.1 Průběhy teploty fluidní vrstvy, recirkulace spalin, CO a O₂

Vzduchové spalování – 3 % O₂ ve spalinách:

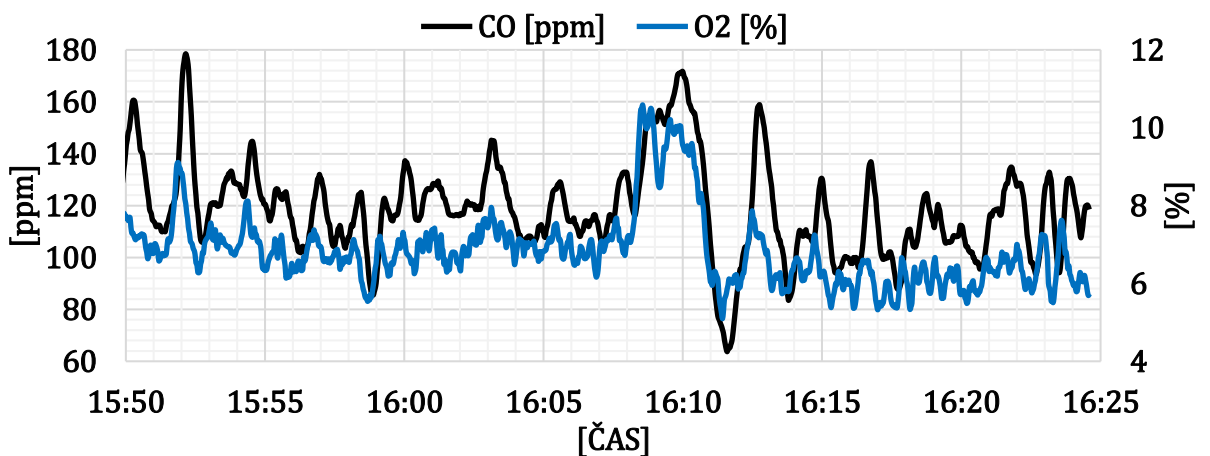


Graf 6: Průběh CO a O₂ - Vzduchové spalování - 2,957 % O₂ ve spalinách

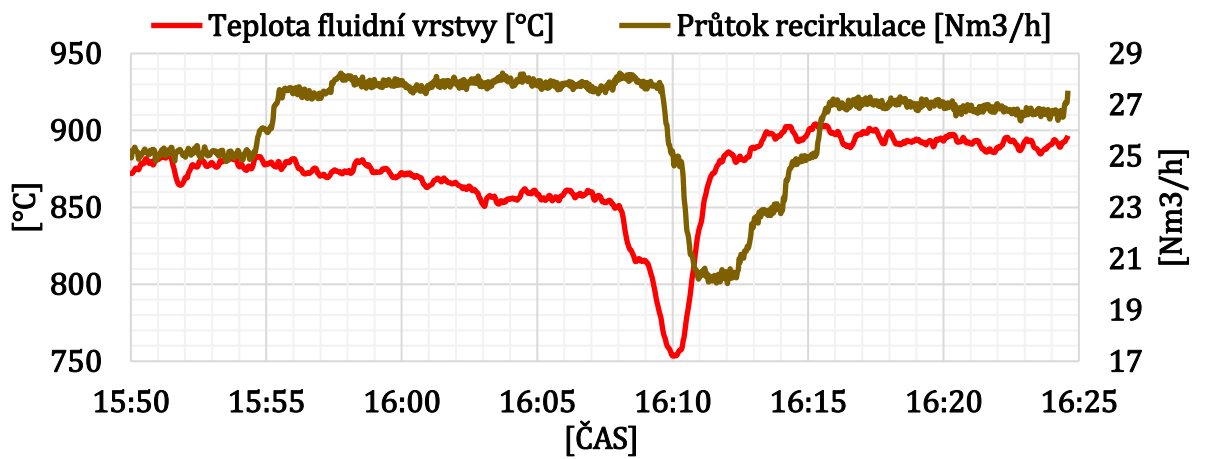


Graf 7: Průběh teploty a recirkulace - Vzduchové spalování - 2,957 % O₂ ve spalinách

Vzduchové spalování – 6,8 % O₂ ve spalinách:

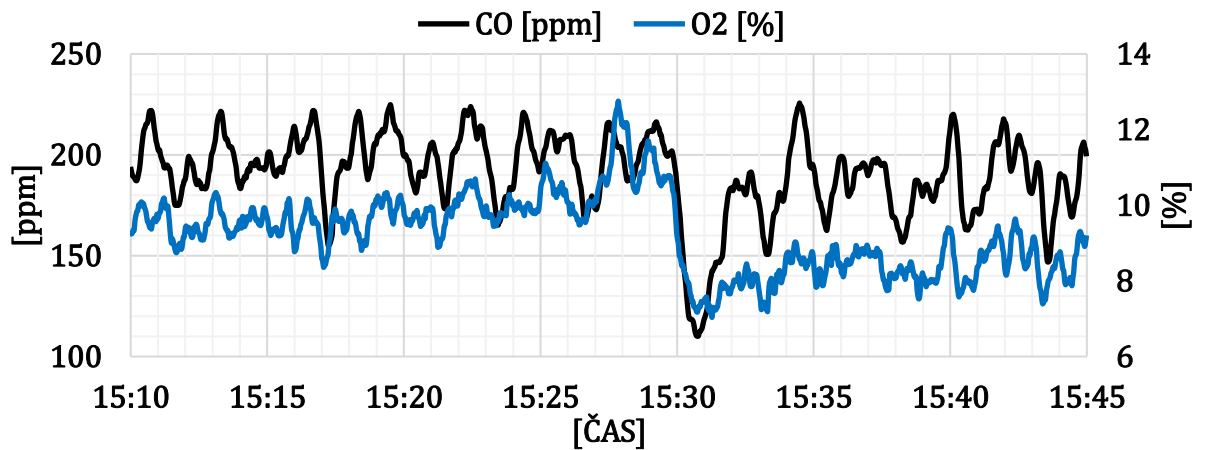


Graf 8: Průběh CO a O₂ - Vzduchové spalování - 6,845 % O₂ ve spalinách

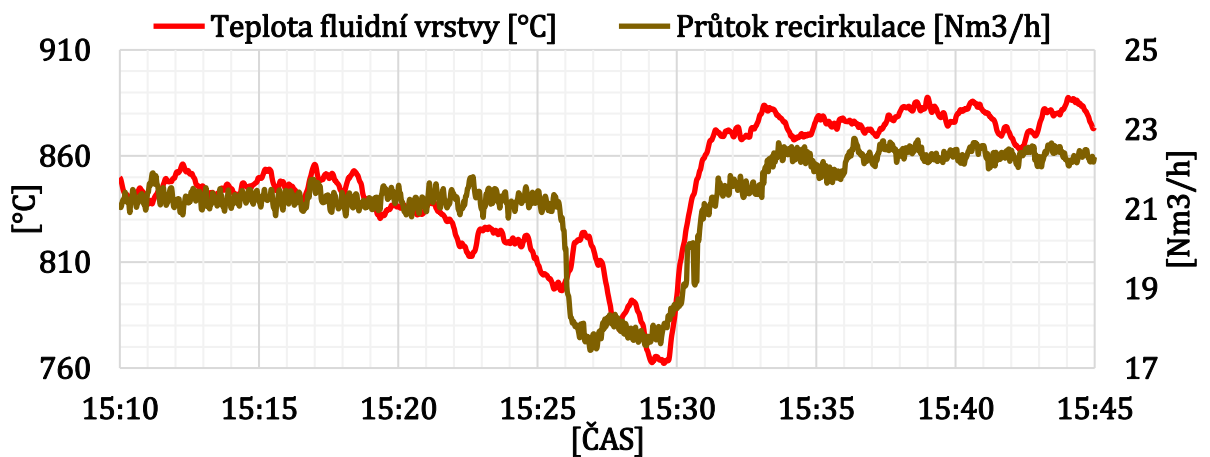


Graf 9: Průběh teploty a recirkulace - Vzduchové spalování - 6,845 % O₂ ve spalinách

Vzduchové spalování – 9,2 % O₂ ve spalinách:

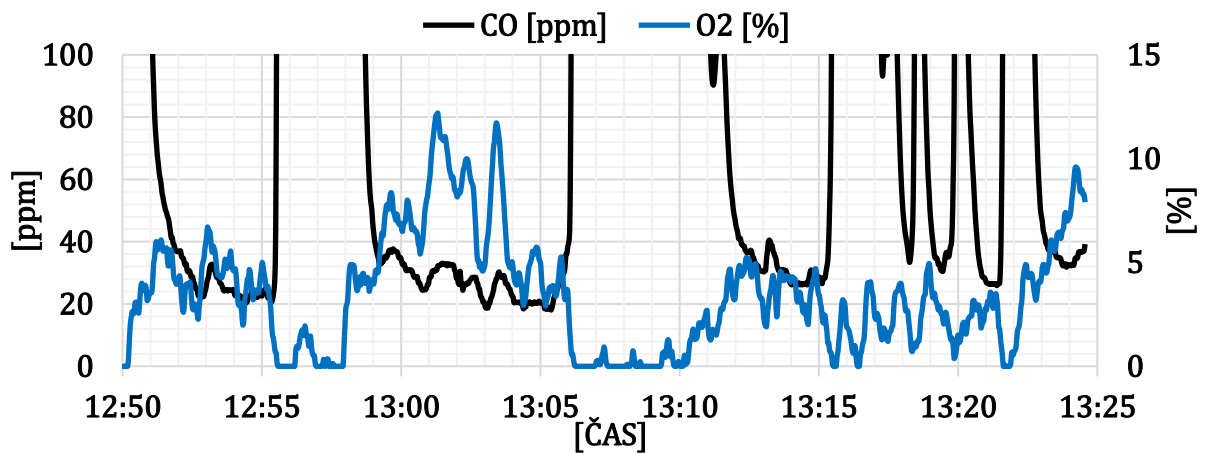


Graf 10: Průběh CO a O₂ - Vzduchové spalování - 9,222 % O₂ ve spalinách

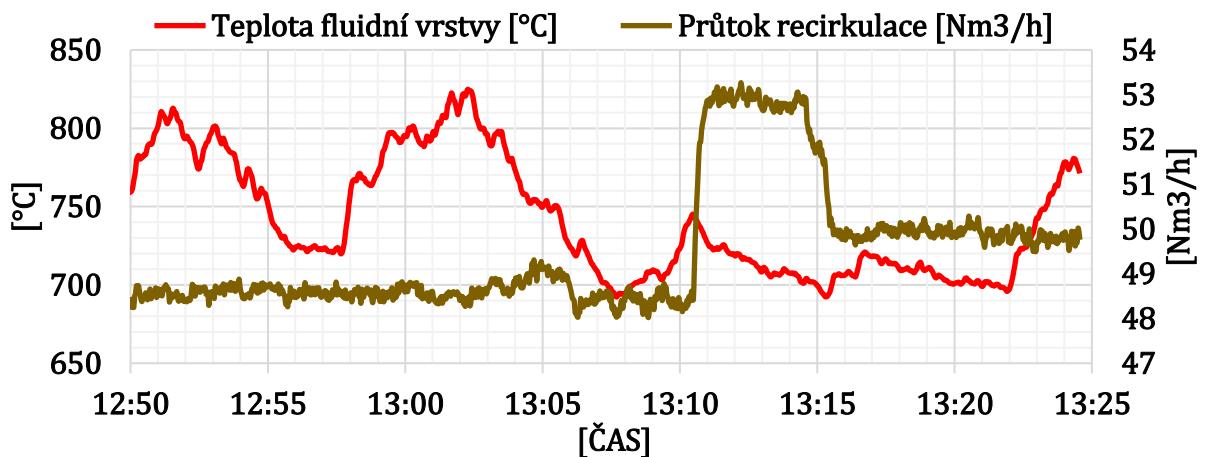


Graf 11: Průběh teploty a recirkulace - Vzduchové spalování - 9,222 % O₂ ve spalinách

Oxyfuel spalování – 3,4 % O₂ ve spalinách:

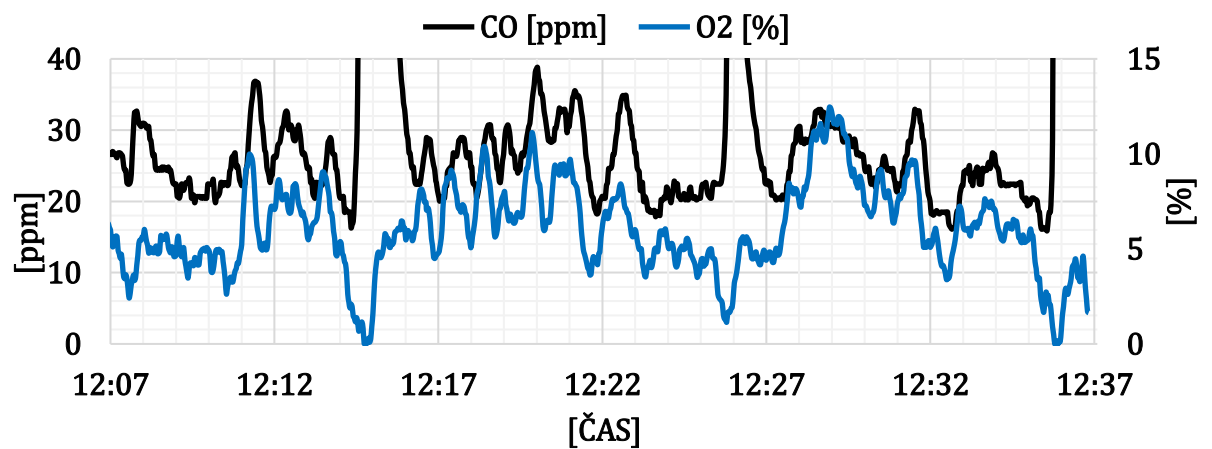


Graf 12: Průběh CO a O₂ - Oxyfuel spalování - 3,142 % O₂ ve spalinách

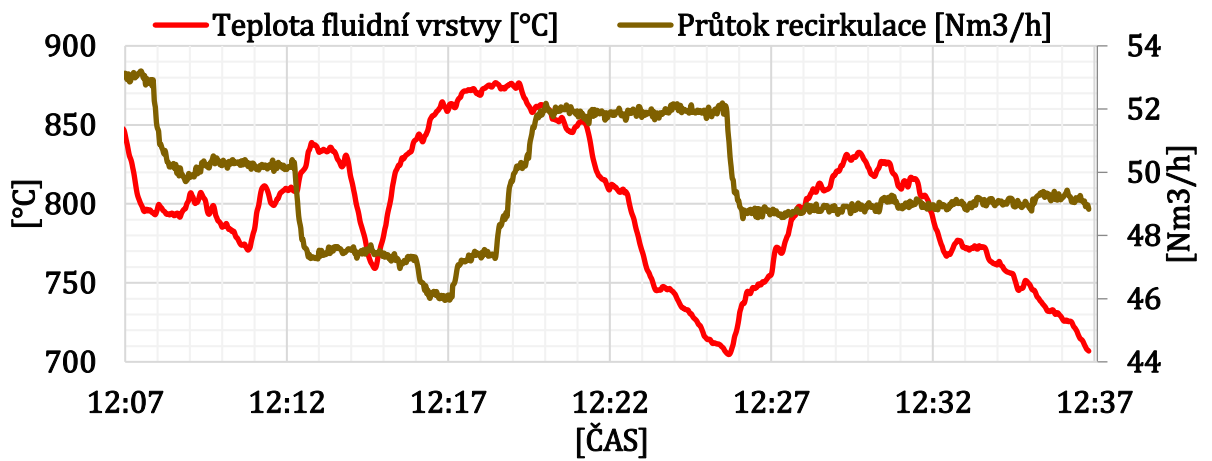


Graf 13: Průběh teploty a recirkulace - Oxyfuel spalování - 3,412 % O₂ ve spalinách

Oxyfuel spalování – 6 % O₂ ve spalinách:

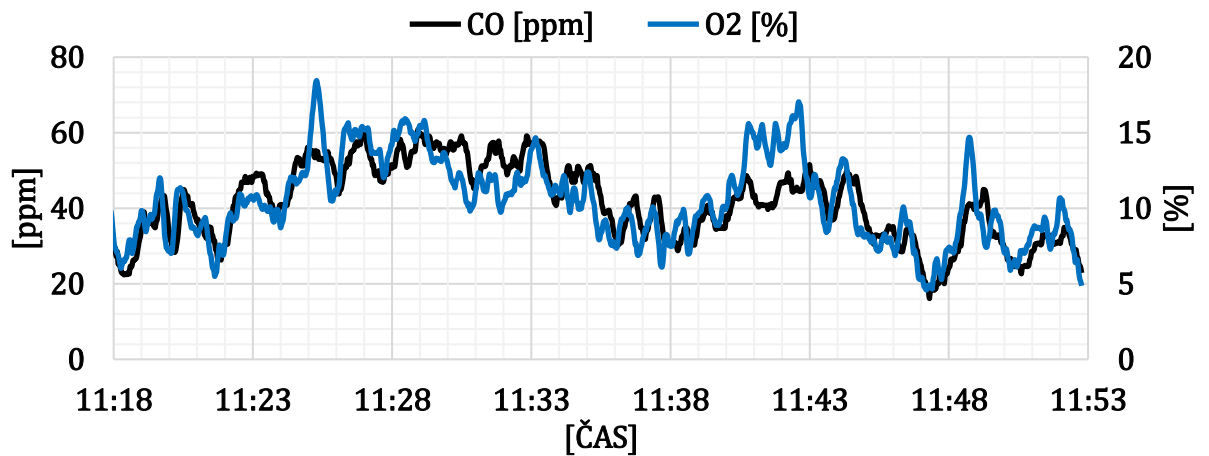


Graf 14: Průběh CO a O₂ - Oxyfuel spalování - 6,01 % O₂ ve spalinách

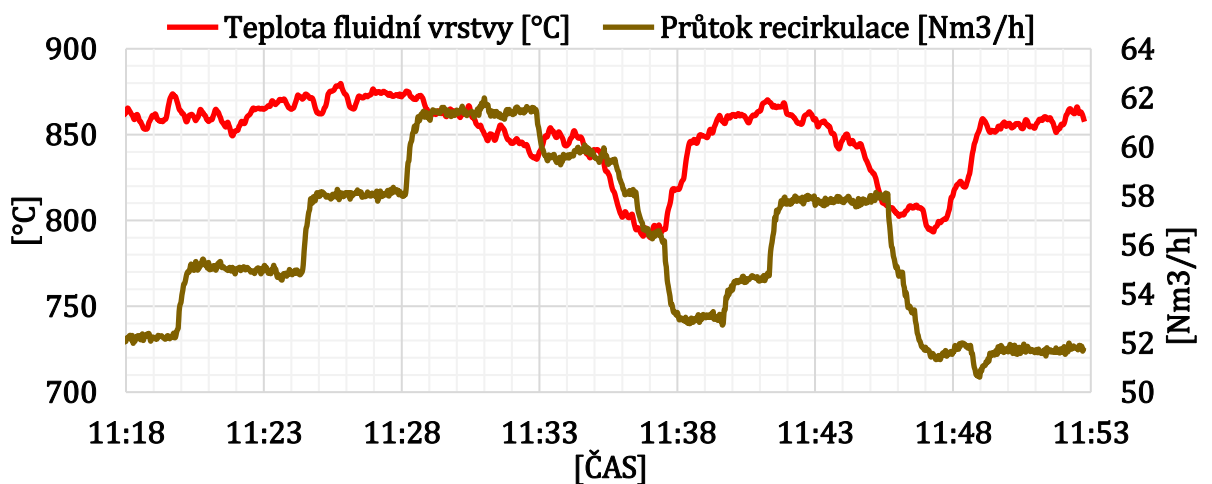


Graf 15: Průběh teploty a recirkulace - Oxyfuel spalování - 6,01 % O₂ ve spalinách

Oxyfuel spalování – 10,5 % O₂ ve spalinách:



Graf 16: Průběh CO a O₂ - Oxyfuel spalování - 10,457 % O₂ ve spalinách



Graf 17: Průběh teploty a recirkulace - Oxyfuel spalování - 10,457 % O₂ ve spalinách

Z grafů je zřejmá vysoká kolísavost a nestabilita provozu režimu Oxyfuel. Převážně v případě spalování za 3 % přebytku kyslíku ve spalinách hodnoty CO místy dosahovaly hodnot vyšších než 6000 ppm, což je konečná hodnota možná ke změření v rámci využívaného analyzátoru. Následně se zase ustálili do průměrných hodnot v rozmezí desítek ppm.

Taktéž je převážně u měřených průtoků CO z grafů zřejmá vysoká spojitost s koncentrací O₂ ve spalinách. Což samozřejmě koresponduje i se zmiňovanou koncentrací O₂ ve spalinách. Ta se s nárůstem CO ve spalinách snižuje až do nulových hodnot.

Rychlost vyhořívání CO se se změnou teploty mění exponenciálně. Lze tedy pozorovat, především u metody Oxyfuel, silné návaznosti na zvyšování průtoku CO se snižující se teplotou, která byla v konečném průměru ze všech měření nejnižší.

6 Bilance Oxyfuel spalování

První z částí praktického experimentu navazující na řešerši o Oxyfuel spalování je však bilance spalování. Důvodem bilančního výpočtu, jak již byl zmíněno, je tedy ověření relevantnost výpočtů a předpokládaných výsledků experimentálního měření vůči reálně odměřeným datům. To lze nejlépe provést na základě porovnání potřebných průtoků okysličovadla do obou systémů, které jako takové závisí na většině vstupních parametrů, a jsou jimi ovlivněny natolik, že podobnost výsledků výpočtu a reálně odměřených dat následně nastiňuje téměř identicky reálně provedený experiment, jak je jeho průběh dle výpočtů namodelován a předpokládán. V případě významně přiblížených hodnot průtoků okysličovadla u jednotlivých spalovacích metod lze následně tvrdit, že spalování probíhá dle teoretických a výpočetních předpokladů, a jeho výsledky jsou tudíž relevantní.

6.1 Postup porovnání

V tomto případě lze porovnání nejlépe provést na vypočtených hodnotách potřebného průtoků okysličovadla, které je třeba následně porovnat s reálně měřenou hodnotou. Stejně, či podobné hodnoty s minimální chybou jasně deklarují, že v zařízení byly nastoleny obdobné podmínky, se kterými se uvažuje při teoretických výpočtech. Důvodem je ovlivnění množství potřebného okysličovadla většinou aspektů, jakými jsou druh paliva, složení paliva, množství paliva, druh spalování, přebytek vzduchu, koncentraci O_2 ve spalinách, koncentraci CO_2 ve spalinách atd. Základní hodnotou pro toto určení je průtok paliva. $Q_{\text{palivo}} = 8,208 \left[\frac{kg}{h} \right]$

Z této hodnoty lze následně dle následujícího vztahu určit potřebné průtoků okysličovadla za hodinu pro srovnání s reálně měřenými hodnotami.

$$V_{VV_{\text{teoretické}}} = V_{VV} \cdot Q_{\text{palivo}} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] \quad (5)$$

6.1.1 Vstupy do bilance

Výpočty, které jsou určující pro porovnávací bilanci jsou stechiometrické výpočty. Hodnoty přebytku okysličovadla jsou již v rámci přesnosti výpočtu v této bilanci nastaveny tak, aby teoretické podíly kyslíku ve spalinách odpovídali reálně odměřeným hodnotám.

Tabulka 4: Hodnoty stechiometrických výpočtů pro vzduchové spalování

α	1,16	-	α	1,474	-	α	1,768	-
V _{vs}	5,222		V _{vs}	6,632		V _{vs}	7,954	
V _{vv}	5,318		V _{vv}	6,757		V _{vv}	8,105	
V _{o2}	1,097	Koncentrace	V _{o2}	1,393	Koncentrace	V _{o2}	1,670	Koncentrace
V _{co2}	0,859	0,167	V _{co2}	0,859	0,131	V _{co2}	0,860	0,109
V _{so2}	0,000	0,000	V _{so2}	0,000	0,000	V _{so2}	0,000	0,000
V _{N2}	4,078	0,794	V _{N2}	5,179	0,791	V _{N2}	6,210	0,789
V _{Ar}	0,048	0,009	V _{Ar}	0,061	0,009	V _{Ar}	0,073	0,009
V _{H2O}	0,792	0,000	V _{H2O}	0,792	0,000	V _{H2O}	0,792	0,000
V _{o2}	0,152	0,030	V _{o2}	0,448	0,068	V _{o2}	0,726	0,092
V _{sv}	5,929		V _{sv}	7,339		V _{sv}	8,661	
V _{ss}	5,137		V _{ss}	6,547		V _{ss}	7,869	
	Nm3/kg			Nm3/kg			Nm3/kg	

Tabulka 5: Hodnoty stechiometrických výpočtů pro Oxyfuel spalování

α	1,032	-	α	1,049	-	α	1,106	-
V _{vs}	0,976		V _{vs}	0,992		V _{vs}	1,046	
V _{vv}	0,994		V _{vv}	1,011		V _{vv}	1,066	
V _{o2}	0,993	Koncentrace	V _{o2}	1,01	Koncentrace	V _{o2}	1,065	Koncentrace
V _{co2}	0,857	0,962	V _{co2}	0,857	0,945	V _{co2}	0,857	0,892
V _{so2}	0,000	0,000	V _{so2}	0,000	0,000	V _{so2}	0,000	0,000
V _{N2}	0,003	0,004	V _{N2}	0,003	0,003	V _{N2}	0,003	0,003
V _{Ar}	0,000	0,000	V _{Ar}	0,000	0,000	V _{Ar}	0,000	0,000
V _{H2O}	0,792	0,000	V _{H2O}	0,792	0,000	V _{H2O}	0,792	0,000
V _{o2}	0,030	0,034	V _{o2}	0,047	0,06	V _{o2}	0,101	0,105
V _{sv}	1,683		V _{sv}	1,699		V _{sv}	1,753	
V _{ss}	0,891		V _{ss}	0,907		V _{ss}	0,961	
	Nm3/kg			Nm3/kg			Nm3/kg	

6.1.2 Výstupy bilance

Tabulka 6: Hodnoty teoretických a měřených průtoků okysličovadla pro vzduchové spalování

Přebytek O₂ ve spalinách	3	6,8	9,2	%
V_{vv}	5,318	6,757	8,105	Nm ³ /kg
V_{vv}teoretické	42,86	54,44	65,29	Nm ³ /h
V_{vv}měřené	51	60	73	Nm ³ /h
Odchylka	16,33	9,38	10,94	%

Tabulka 7: Hodnoty teoretických a měřených průtoků okysličovadla pro Oxyfuel spalování⁴

Přebytek O₂ ve spalinách	3,4	5,2	10,5	%
V_{o2}	0,994	1,011	1,066	Nm ³ /kg
V_{o2}teoretické	7,97	8,21	8,45	Nm ³ /h
V_{o2}měřené	7,9	7,88	8,06	Nm ³ /h
Odchylka	0,93	4,22	4,88	%

Dle tabulek lze pozorovat teoretické množství potřebného okysličovadla vůči množství, které bylo při měření experimentu do zařízení reálně přiváděno. Ani v tomto případě měření nelze počítat s naprostou přesností.

Jak lze pozorovat z výše uvedených tabulek, měření pouze o několik procent neodpovídají teoretickým předpokladům. U metody Oxyfuel je tato nepřesnost pouze do 5 %, v případě vzduchového spalování dosahuje vyšších hodnot. Průtok vzduchu je v případě vzduchového spalování měřen na základě tlakové ztráty na clonce. Naopak průtok kyslíku při Oxyfuel měření je řízen přesněji pomocí flow controlleru. Patrně díky vyšší přesnosti měření pak sedí lépe výsledky pro Oxyfuel spalování. Z tohoto důvodu lze usoudit, že nejen emisní faktory CO, ale i celkový experiment může v rámci průběhu měření a vyhodnocování vzorků nést jisté nepřesnosti, které jsou uvedeny odchylkou.

⁴ V případě hodnot okysličovadla u metody Oxyfuel bylo užito výpočtu množství potřebného průtoku kyslíku, z důvodu koncentrace kyslíku 99 % používaného pro měření. V tomto případě se tedy hodnota výpočtu průtoku okysličovadla a potřebného kyslíku sobě téměř rovná.

7 Provedené experimentální měření

Dle uvedených postupů jsou v následující tabulce shrnuty výsledky dle metodiky spalování. Uvedeny jsou procentuální hodnoty množství nespáleného materiálu ve vzorku, přičemž číslo je tvořeno průměrem ze 3 odebraných vzorků. Kompletní tabulky vyhodnocení i s jednotlivými absolutními hodnotami a procentuálním obsahem vody jsou uvedeny v příloze.

Tabulka 8: Shrnutí výsledků měření a výpočtů procentuálního nedopalu

Místo odběru	O ₂ ve spalinách	Vzduchové spalování	Místo odběru	O ₂ ve spalinách	Oxyfuel spalování	
Vrstva	3	2,16	Vrstva	3,4	1,52	%
	6,9	0,63		6	0,86	%
	9,2	3,27		10,5	1,73	%
Cyklon	3	46,33	Cyklon	3,4	48,57	%
	6,9	44,95		6	31,73	%
	9,2	31,81		10,5	14,24	%

7.1 Výsledky výpočtu emisního faktoru

Tabulka 9: Hodnoty EFCO a hmotnostní koncentrace pro vzduchové spalování

Přebytek O ₂ ve spalinách	3	6,9	9,2	%
Objemová koncentrace φ_{CO}	47	119	190	ppm
Hmotnostní koncentrace ρ_{CO}	59	149	238	mg/Nm ³
Emisní faktor CO	301	973	1873	g/kg

Tabulka 10: Hodnoty EFCO a hmotnostní koncentrace pro Oxyfuel spalování

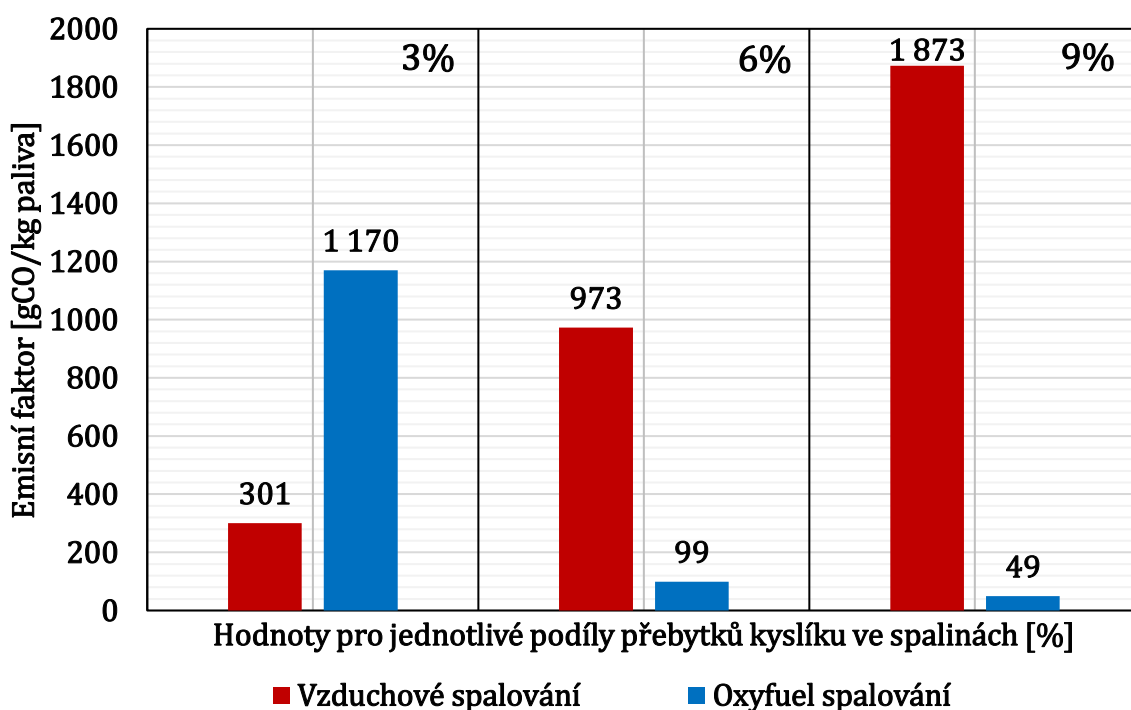
Přebytek O ₂ ve spalinách	3,4	6	10,5	%
Objemová koncentrace φ_{CO}	1051	88	41	ppm
Hmotnostní koncentrace ρ_{CO}	1313	110	51	mg/Nm ³
Emisní faktor CO	1170	99	49	g/kg

7.2 Vyhodnocení nedopalu a diskuze výsledků

Dle výše uvedených výsledků měření v předešlých kapitolách byly následně vytvořeny grafy, které sloupcově poměří procentuální hodnoty jednotlivých množství chemického i mechanického nedopalu v palivu mezi metodikami spalování. V případě mechanického nedopalu byla tato vyhodnocení vždy porovnáována buďto u odběrů ve vrstvě, nebo u odběrů z cyklonu.

7.2.1 Chemický nedopal

Dle daných výpočtů emisního faktoru na základě hmotnostní koncentrace a průtoku spalin je zřejmé, že jak pro různé druhy spalování, tak různé druhy podílu kyslíku ve spalinách vycházejí zcela odlišné emisní faktory udávající zastoupení CO ve spalinách.



Graf 18: Porovnání výsledků emisního faktoru

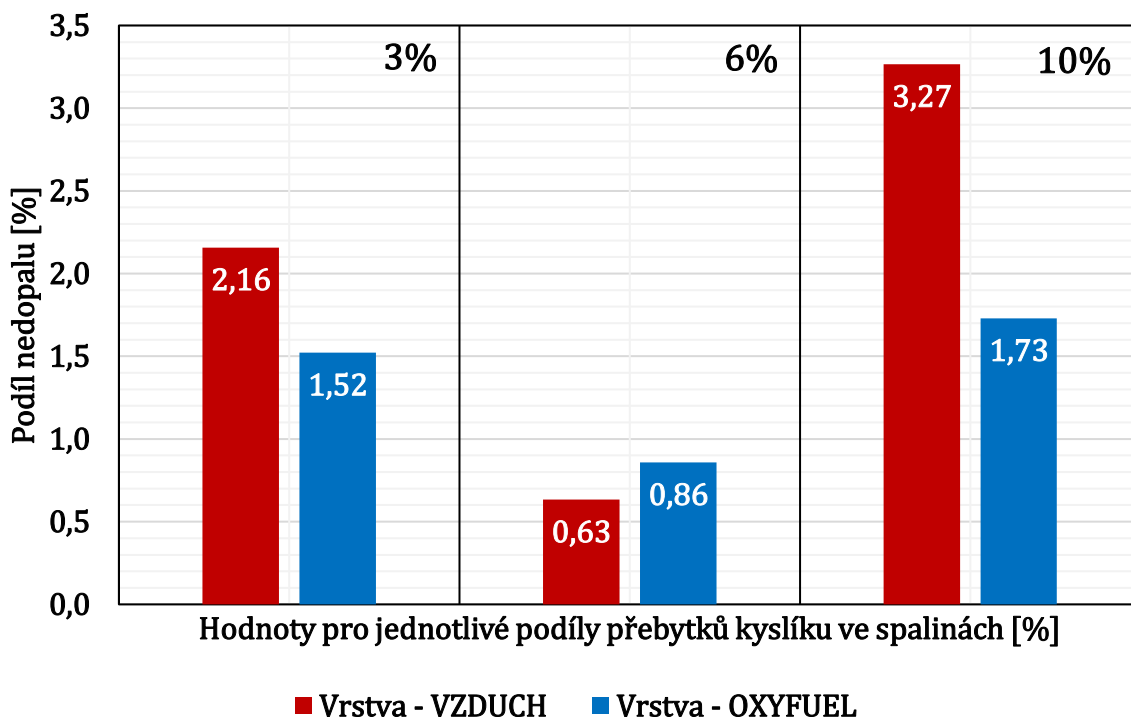
Jak je vidět, se zvyšujícím se přebytkem kyslíku ve spalinách se u konvenčního vzduchového spalování podíl emisního faktoru CO výrazně zvyšuje, s tříprocentním nárůstem z první hladiny od více jak trojnásobek, následně o dvojnásobek. U spalování Oxyfuel se následně množství emisního faktoru CO začne s nastavením spalování na vyšší hodnotu kyslíku ve spalinách snižovat už u 6 %, přičemž u 9 % je tato hodnota velmi podobná. V případě procentuálního podílu kolem 3 % O₂ ve spalinách se pravděpodobně

bude jednat o problematiku špatného dohořívání z důvodu nižšího průtoku okysličovadla do systému společně s nízkou teplotou, a ku zvýšení recirkulačního koeficientu. Průtok okysličovadla je dle průběhu dat z měření uvedených výše však pouze jednou z veličin, které mají v tomto případě na nedopal vliv. Na diagramech lze pozorovat výraznou návaznost koncentrace O_2 ve spalinách vůči koncentraci CO. Primárně však již byla zmiňována problematika nízké teploty fluidní vrstvy, která v průměru dosahovala hodnoty $742^\circ C$.

Ač by dle očekávání u vzduchového spalování měl emisní faktor v závislosti na přebytku O_2 ve spalinách vykazovat obdobné, nebo konstantní hodnoty, s koncentrací O_2 ve spalinách množství CO roste. Což také poukazuje na nejednoznačnost měření, převážně v ohledu na jejich proběhlé množství. Důvodem by mohla být především snižující se teplota spalování. V části vyhodnocení emisního faktoru již bylo zmiňováno, že návaznost dohořívání CO má velký vliv. Dalším z faktorů ovlivňující intenzitu dohořívání je fluidační rychlost. Ta souvisí s intenzitou distribuovaného okysličovadla, a následně taktéž s dohoříváním paliva.

Důvodem vysoké kolísavosti systému Oxyfuel za 3 % přebytku je především nedostatek kyslíku. A to právě především v momentech vysokých píků CO v grafu, které se opět ustálili po stabilizování systému. Lze ovšem říci, že za nízkého přebytku O_2 ve spalinách, který navazuje na průtok okysličovadla do systému má metoda Oxyfuel značné problémy se stabilitou a celkovou efektivitou průběhu spalování, což je zřejmé i dle dosahovaných teplot fluidní vrstvy, kdy byla snaha o vytvoření podmínek, které by vedli k teplotě $850^\circ C$. Důvodem taktéž může být například hromadění paliva ve vrstvě. V případě, že se palivo následně najednou celé zažehne, spotřebuje všechnen přivedený kyslík a z tohoto důvodu vrostou koncentrace CO, kterou můžeme pozorovat na zmiňovaných extrémních nárůstech. Což nahrává faktu, že v tomto případě systém lze označit za zcela nestabilní.

7.2.2 Mechanický nedopal - Vrstva



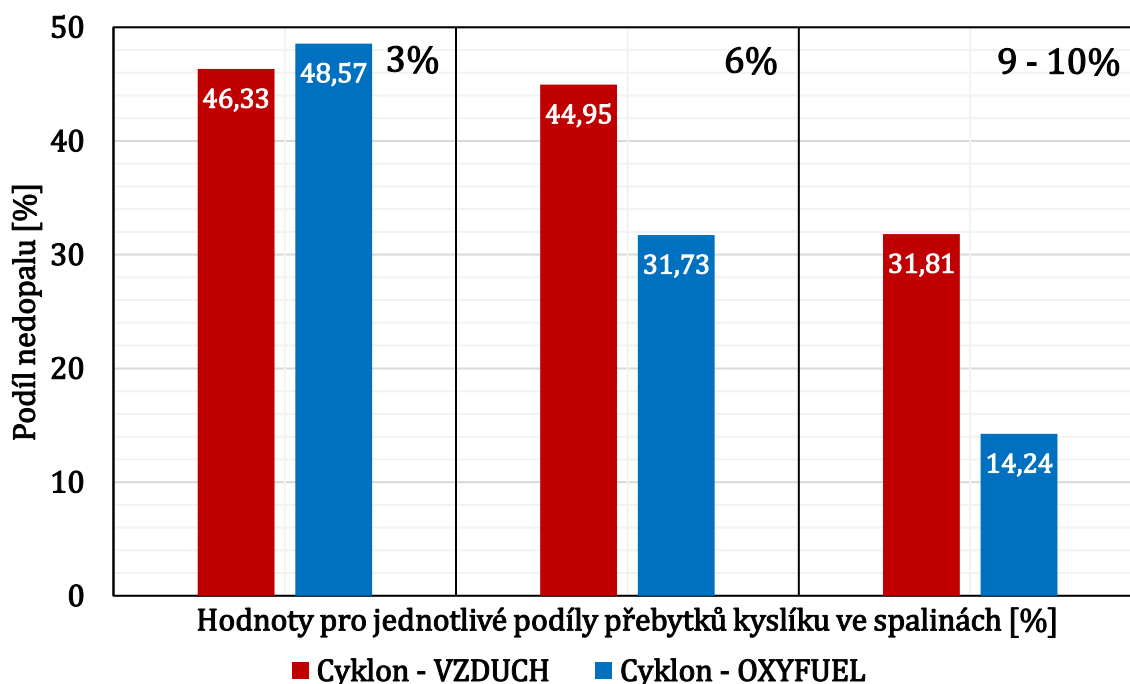
Graf 19: Porovnání výsledků mechanického nedopalu ve vrstvě

Jak lze pozorovat z grafu, hodnoty procentuálního podílu nedopalu ve vzorcích se výrazně liší. Dle dat je zřejmé, že průběhy nedopalu zvyšující se či snižující se s koncentrací přebytku O_2 ve spalinách nemají jakkoli lineární, či dokonce rostoucí nebo klesající průběh, jak by se dalo očekávat. V případě vyhodnocení se nedopaly ve vrstvě pohybovaly od hodnot desetin do jednotek procent, jak ve vzduchovém spalování, tak v metodě Oxyfuel. Ve vrstvě vychází nejnižší podíl nespáleného materiálu pro oba druhy spalování pro 6 % přebytek O_2 ve spalinách. Oproti tomu nejvyšší vychází u hodnot pohybujících se kolem 9 %. Se zvyšujícím se přebytkem O_2 ve spalinách se nedopal do 6 % snížil, následně se pak opět u 9 % zvýšil, a to o větší podíl, než u 3 % přebytku O_2 ve spalinách u obou technologií. V případě 3 % O_2 ve spalinách může nedopal ovlivňovat malé množství oksylichovadla, díky kterému nestačí materiál dostatečně vyhořet. V případě vysokého přebytku vzduchu ve spalinách jsou důvodem špatné spalovací podmínky uvnitř zařízení, související se sníženým podílem recirkulovaných spalin a teplotou vrstvy.

Lze ovšem říci, že dle očekávání je u odběrů z vrstvy ve všech výsledcích procentuálně velmi nízká hladina nedopalu. Ač je z grafů zřejmé, že u obou technologií by se dala

hladina 6 % kyslíku ve spalinách brát jako neoptimálnější, ač se vyhodnocení výsledků především u vrstvy jeví nejednoznačně. Dále je třeba brát v úvahu, že metodika odběru vzorku stále dává jen přibližné hodnoty o nedopalu ve vrstvě. Protože za provozu kotle nelze odebrat přesný referenční vzorek. To ovšem stále nebrání v tvrzení, že hladina nedopalu u obou technologií je v řádu jednotek procent.

7.2.3 Mechanický nedopal - Cyklon



Graf 20: Porovnání výsledků mechanického nedopalu v cyklonu

Druhé porovnání za pomoci sloupcového grafu se týká vzorků z cyklonu. Z dat je zřejmé, že se hodnoty jednotlivých procentuálních podílů nedopalu oproti vrstvě zvýšily na desítky procent, což je u fluidního kotle očekávatelné. Stejně, jako u výsledků odběrů z vrstvy lze i v tomto případě hovořit o jisté relevantnosti proběhlých měření. Převážně z důvodu podobnosti snižování podílu nedopalu se zvyšující se koncentrací O₂ ve spalinách u obou technologií.

Lze pozorovat, že v případě nedopalu zachyceného v cyklonu mají průběhy poměrně jednoznačný charakter. Se zvyšující se koncentrací O₂ ve spalinách množství nedopalu klesá. U konvenční technologie nemá toto klesání tak strmý průběh. U metody Oxyfuel se ovšem procentuální podíl nedopalu s rostoucím přebytkem kyslíku vždy sníží téměř o polovinu předcházející hodnoty.

Ač hodnota nedopalu u technologie Oxyfuel u koncentrace 3 % O₂ ve spalinách mírně převyšuje hodnotu nedopalu u vzduchového spalování, lze opět tvrdit, že se v technologii Oxyfuel dochází v případě vyhodnocení z cyklonu k lepšímu dohořívání paliva, než je tomu u vzduchového fluidního spalování. Neoptimálnějším způsobem spalování se však jeví provoz za 9 % podílu O₂ ve spalinách. Převážně se může jednat o vhodné množství přivedeného okysličovadla vůči recirkulovaným spalinám, což ovšem nekoresponduje s výsledky z vrstvy, které jsou ovlivňovány taktéž teplotou fluidní vrstvy a fluidační rychlostí.

Výsledky celého experimentu ukazují, že čím více okysličovadla v případě metody Oxyfuel do systému přivedu, tím lépe materiál dohořívá. To ovšem neplatí u odběrů přímo z vrstvy, u které materiál nejlépe dohoříval za 6 % přebytku O₂ ve spalinách. Rozdílnost mezi 6 a 9 % v případě emisního faktoru již nejsou natolik rozdílné, a proto se využití 6 % koncentrace O₂ ve spalinách v případě tohoto měření může jevit jako neoptimálnější.

Proběhlé měření koresponduje taktéž s výzkumem pekingské, která do dostupných článků dle svých experimentů uvádí, že efektivita spalování se u technologie Oxyfuel snižovala se zvyšujícím se podílem recirkulačního koeficientu. Což v případě nastavení různých koncentrací kyslíku ve spalinách odpovídá výsledkům experimentu.

8 Závěr

V této práci byla shrnuta teorie fluidního spalování biomasy, a možnosti tuto technologii provozovat v rámci režimu Oxyfuel, jako jedné z metod CCS technologií. Jako taková byla teoretická část podpořena bilančním výpočtem a praktickým experimentem. Bilanční část pojednávala o porovnání praktického provozu zařízení s teoretickým výpočtem. Experimentální část určovala míry nedopalu z dvou odběrových míst na kotli (vrstva a cyklon), za provozu fluidního kotle na 850 °C v rámci třech různých podílů kyslíku ve spalinách, společně s výpočtem emisního faktoru CO.

Výsledky experimentálního měření i bilančního výpočtu jsou následující. Míra nespáleného paliva se co do formy tuhé látky, tak oxidu uhelnatého jeví menší u fluidní technologie využívající metody Oxyfuel. V tomto případě je vždy třeba zařízení provozovat ideálně na vyšší jak 6 % podíl kyslíku ve spalinách, kdy pro daný interval mezi 6–9 % přebytku kyslíku vycházeli převážně snižující se množství nedopalu. V případě 3 % podílu kyslíku ve spalinách se co do nedopalu Oxyfuel spalování ve většině případů jeví horší než konvenční vzduchové spalování, převážně z důvodu nízkého množství oksyličovadla přiváděného do systému. Jediným měřeným aspektem, u kterého vycházela míra nedopalu hůře u 9 % O₂ ve spalinách byly odběry z fluidní vrstvy.

Meze tohoto měření byly bohužel stanoveny pouze do užití teploty fluidní vrstvy 850 °C v obou případech. Množství relevantních výsledků, které by mohly rozšířit tuto práci by bylo užití stejných metod měření a přebytků kyslíku ve spalinách pro různé hodnoty teplot. Jak u vzduchového spalování, tak u metody Oxyfuel. Jednalo by se kompletní provozu za 800 a 900 °C. Výsledky z těchto měření by opět mohly přispět k určení neoptimálnějšího druhu spalování, co se do kvality spalovacího procesu týče.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení měření.....	52
Tabulka 2: Složení a přepočet paliva	53
Tabulka 3: Parametry spalování.....	54
Tabulka 4: Hodnoty stechiometrických výpočtů pro vzduchové spalování.....	61
Tabulka 5: Hodnoty stechiometrických výpočtů pro Oxyfuel spalování.....	61
Tabulka 6: Hodnoty teoretických a měřených průtoků okysličovadla pro vzduchové spalování.....	62
Tabulka 7: Hodnoty teoretických a měřených průtoků okysličovadla pro Oxyfuel spalování.....	62
Tabulka 8: Shrnutí výsledků měření a výpočtů procentuálního nedopalu.....	63
Tabulka 9: Hodnoty EFCO a hmotnostní koncentrace pro vzduchové spalování	63
Tabulka 10: Hodnoty EFCO a hmotnostní koncentrace pro Oxyfuel spalování.....	63

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vlastnosti fluidní vrstvy podobné kapalinám [8]	18
Obrázek 2: Rozdělení fluidních vrstev (Část A - D) [8].....	19
Obrázek 3: Rozdělení fluidních vrstev (Část E - H) [8].....	20
Obrázek 4: Geldartovo rozdělení částic (Pro vzduch za standartních podmínek) [8]	22
Obrázek 5: Stacionární bublinkující fluidní vrstva [8].....	23
Obrázek 6: Stacionární bublinkující fluidní vrstva [8].....	24
Obrázek 7: Princip metody Post-Combustion.....	27
Obrázek 8: Princip metody Pre-Combustion.....	28
Obrázek 9: Princip metody Oxyfuel	29
Obrázek 10: Ilustrační fotografie elektrárny Callide využívající komerční nasazení systému Oxyfuel [26]	31

Obrázek 11: Principiální schéma fungování elektrárny Callide [26]	31
Obrázek 12: Porovnání referenčního bloku se začleněním technologie Oxyfuel [20]	32
Obrázek 13: Rozložení intenzity teploty v délce spalovacího zařízení za různých spalovacích režimů [29]	34
Obrázek 14: Porovnání průtoků recirkulace při vzduchovém a Oxyfuel spalování [17]	36
Obrázek 15: Schéma spalovacího zařízení	50
Obrázek 16: Schéma odběrového zařízení	51
Obrázek 17: Obrázek pelet, jako využitého paliva	53

Seznam grafů

Graf 1: Vliv recirkulačního koeficientu na T_{np} a V_{fm} [18].....	35
Graf 2: Množství obsahu rtuti v popelu vůči množství nespáleného uhlíku v palivu [37]	42
Graf 3: Nespálený uhlík v popelu (vrstvě) při různých režimech spalování [36]	45
Graf 4: Normalizovaná hmotnost emisí CO v různých režimech spalování [36]	45
Graf 5: Účinnost spalování v různých režimech [36]	46
Graf 6: Průběh CO ₂ a O ₂ - Vzduchové spalování - 2,957 % O ₂ ve spalinách	55
Graf 7: Průběh teploty a recirkulace - Vzduchové spalování - 2,957 % O ₂ ve spalinách	55
Graf 8: Průběh CO ₂ a O ₂ - Vzduchové spalování - 6,845 % O ₂ ve spalinách	55
Graf 9: Průběh teploty a recirkulace - Vzduchové spalování - 6,845 % O ₂ ve spalinách	56
Graf 10: Průběh CO ₂ a O ₂ - Vzduchové spalování - 9,222 % O ₂ ve spalinách	56
Graf 11: Průběh teploty a recirkulace - Vzduchové spalování - 9,222 % O ₂ ve spalinách	56
Graf 12: Průběh CO a O ₂ - Oxyfuel spalování - 3,142 % O ₂ ve spalinách.....	57
Graf 13: Průběh teploty a recirkulace - Oxyfuel spalování - 3,412 % O ₂ ve spalinách....	57
Graf 14: Průběh CO ₂ a O ₂ - Oxyfuel spalování - 6,01 % O ₂ ve spalinách.....	57

Graf 15: Průběh teploty a recirkulace - Oxyfuel spalování - 6,01 % O ₂ ve spalinách.....	58
Graf 16: Průběh CO ₂ a O ₂ - Oxyfuel spalování - 10,457 % O ₂ ve spalinách.....	58
Graf 17: Průběh teploty a recirkulace - Oxyfuel spalování - 10,457 % O ₂ ve spalinách ..	58
Graf 19: Porovnání výsledků emisního faktoru.....	64
Graf 20: Porovnání výsledků mechanického nedopalu ve vrstvě	66
Graf 21: Porovnání výsledků mechanického nedopalu v cyklonu	67

Seznam rovnic

Rovnice 1: Sféricita	23
Rovnice 2: Recirkulační koeficient	35
Rovnice 3: Emisní faktor	47
Rovnice 4: Hmotnostní koncentrace	48
Rovnice 5: Objem vlhkého vzduchu	60

Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] VOBOŘIL, David. Biomasa: Využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. OEnergetice.cz [online]. Praha, 6. 2. 2017 [cit. 2020-6-3]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [2] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa: Definice a členění. *TZBinfo.cz* [online]. Praha, 2009, 15.5.2009 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [3] KALTSCHMITT, Martin, Hans HARTMANN a Hermann HOFBAUER, ed. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2016. Berlin: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-662-47438-9.
- [4] WEGER, Jan. Biomasa jako zdroj energie. *Biom.cz* [online]. Praha, 2009, 2.2.2009 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-jako-zdroj-energie>
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 477/2012 Sb.: Vyhláška o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů. In: . Praha, 2012, ročník 2012, 180/2012, číslo 477. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-477>
- [6] HRDLIČKA, Jan: Fluidní kotel na biomasu s inertní náplní Liapor. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- [7] TOMAN, Zdeněk: Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2011- 02-07 [cit. 2019-10-11]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>. ISSN: 1801-2655.
- [8] KUNII, D. LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. 2. vydání. Howard Brenner Massachusetts institute of Technology: Butterworth-Heinemann, 1991. 522 s. ISBN 0-409-90233-0
- [9] YANG, W. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. 1. vydání. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. 850 s. ISBN 0-8247-0259-X
- [10] OKA, S. N. ANTHONY, E. J. *Fluidized Bed Combustion*. 1. Vydání. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. 580 s. ISBN 0-8247-4699-6
- [11] HRDLIČKA, F. JANEBA, Břetislav. BERÁNEK Jaroslav. *Optimalizace malých fluidních kotlů* (1. část). Energie. Praha: Panorama publishing, s.r.o., 2/98, str. 126 – 130. ISSN 1211-9822
- [12] HRDLIČKA, F. JANEBA, Břetislav. BERÁNEK Jaroslav. *Optimalizace malých fluidních kotlů* (2. část). Energie. Praha: Panorama publishing, s.r.o., 3/98, str. 123 – 127. ISSN 1211-9822
- [13] HRDLIČKA, J. OPATŘIL, J. *Optimalizace adiabatického fluidního ohniště se stacionární fluidní vrstvou*. ENERGIE Z BIOMASY XIV. Praha: Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, 2013, str. 60 – 63.

- [14] HARTMAN, M. SVOBODA, K. TRNKA, O. BERAN, Z. *Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou*. Chemické listy 93 - Referáty. Praha: Ústav chemických procesů, Akademie věd České republiky. 1999. str. 788 – 793.
- [15] SCHREIBEROVÁ, L. NEUŽIL, P. *Fluidace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta checko-inženýrská, Výzkumná zpráva. 2008. Str. 7,1 – 7,11
- [16] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlu a spalinových výměníku*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [17] SKOPEC, P. HRDLIČKA, J. VODIČKA, M. *Zkušenosti s oxy-fuel spalováním ve stacionární fluidní vrstvě*. ENERGIE Z BIOMASY XVI. Praha: Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, 2015, str. 100 – 105.
- [18] SKOPEC, P. et al. *Studium problematiky využití fluidní vrstvy pro spalování biomasy a alternativních paliv*. V *Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XIV*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013, s. 69-73. ISBN 978-80-214-4775-2
- [19] MARTINEK, J. *Fluidní kotel CFB na spalování dřevní biomasy o parametrech páry 150 t/h; 9,3 MPa; 530 °C*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..
- [20] POPELKA, O. *Fluidní kotel na spalování uhlí a biomasy 150 t/h*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 142 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc..
- [21] SLOUKA, Pavel, DUPAL, Tomáš. *Metody a technologie zachycování CO₂ ze spalín a technologie oxyfuel: Výzkum a vývoj metod a technologií zachycování CO₂ v elektrárnách na fosilní paliva a ukládání do geologických formací v podmínkách ČR*, 2009, 5021-F-091112
- [22] InternationalEnergyAgency.IEAStatistics-CO₂ Emissions from Fossil Fuel Combustion: Highlights. 1. vyd. Luxembourg: International Energy Agency, 2011 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>
- [23] MALIŠ, J. *Metody snižování emisí oxidu uhličitého*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [24] Geology (Česká geologická služba): Informační portál pro technologie zachytávání a ukládání CO₂ – Technologie CCS [online]. 2017 [cit.2017-05-08] Dostupné z: <http://www.geology.cz/ccs/technologie-ccs>
- [25] Redakce National Geographic. *Změny klimatu: 7 věcí, které byste měli vědět o změně klimatu*. Praha: National Geographic Česko, 2017 (4), str. 26 - 27. ISSN 1213-9394.
- [26] Global CCS Institute: *Callide oxyfuel project* [online]. 2016 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/202090/cop-finalresults-publicreport-march2018.pdf>

- [27] International Energy Agency: *Energy Policies of IEA Countries - Czech Republic 2016 Review* [online]. 2016 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Policies_of_IEA_Countries_Czech_Republic_2016_Review.pdf
- [28] BUHRE, B.J.P. ELLIOTT, L.K. SHENG, C.D. GUPTA, R.P. WALL, T.F. *Oxy-fuel Combustion technology for coal-fired power generation*. Progress in Energy and Combustion Science. 2005, č. 31, s. 283-307.
- [29] AL-MAKHADMEH, Leema, Uwe SCHNELL, Jörg MAIER a Günter SCHEFFKNECHT. Oxy-fuel coal combustion: A review of the current state-of-the-art. In: SEAN MCCOY, Sean. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 5. Amsterdam: Elsevier, 2018, s. 17-35. ISSN 1750-5836.
- [30] BRIX, Jacob, Peter A. JENSEN, Peter GLARBORG, Anker D. JENSEN a Maja B. TOFTEGAARD. Oxy-fuel combustion of solid fuels. In: WANG, Hai a Christof SCHULZ. *Progress in Energy and Combustion Science: An International Review Journal*. 4. Amsterdam: Elsevier, 2018, 583 - 622. ISSN 0360-1285.
- [31] SHENG, C.D., R.P. GUPTA a T.F. WALL. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. In: WANG, Hai a Christof SCHULZ. *Progress in Energy and Combustion Science*. 5. Amsterdam: Elsevier, 2018, 284 - 307. ISSN 0360-1285.
- [32] MACENAUEROVÁ, T. Vliv vnitřní recirkulace spalin na charakteristické parametry spalování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.
- [33] SVOBODA, Karel. Moderní technologie spalování: Nové procesy spalování založené na spalování ve směsi kyslíku s oxidem uhličitým a vodní parou (oxy-fuel spalování). In: BIČÁNKOVÁ, Olga, Michal JEREMIÁŠ, Michael POHOŘELÝ, Pavel STRAKA, Karel SVOBODA a Michal ŠYC. *Netradiční zdroje energie, čistá paliva a nové metody spalování: Netradiční zdroje energie, čistá paliva a nové metody spalování*. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2016, 40 - 47. ISBN 978-80-200-2665-1.
- [34] DUDEK, Rostislav, Kristina PEŘINOVÁ a Jaroslav KALOUSEK. Teorie technologických procesů. Praha: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2571-7.
- [35] NOVÁK, Josef. Fyzikální chemie: Skriptum bakalářského a magisterského kurzu. Praha: VŠCHT Praha, 2011.
- [36] LI, Haoyu, Wei LI, Mingxin XU, Eric G. EDDINGS, Qiangqiang REN a Qinggang LU. Coal combustion emission and ash formation characteristics at high oxygen concentration in a 1 MWth pilot-scale oxy-fuel circulating fluidized bed. In: YAN, Jinyue. *Applied Energy*. 5. Amsterdam: Elsevier, 2017, 2014 - 2011. ISSN 0306-2619.
- [37] Behavior of mercury emitted from the combustion of coal and dried sewage sludge: The effect of unburned carbon, Cl, Cu and Fe. In: HUANG, Zuohua, John PATRICK a Eric SUUBERG. *Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy*. 6. Amsterdam: Elsevier, 2017, 749 - 756. ISSN 0016-2361.
- [38] BARTOŇOVÁ, Lucie. Chování prvků při spalování uhlí - porovnání jejich obsahů v nedopalu, uhlí a popelu. *Chemické listy*. 2006, 100(9), 798-802. ISSN 1213-7103.

- [39] SUUBERG, Eric M. Size distribution of unburned carbon in coal fly ash and its implications. In: HUANG, Zuohua, John PATRICK a Eric SUUBERG. *Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy*. 6. Amsterdam: Elsevier, 2017, 223 - 230. ISSN 0016-2361.
- [40] FARTÁK, Josef a Ivo JIŘÍČEK. Studium metod pro stanovení vlhkosti v biomase a v nedopalu v jejím popelu. In: *PALIVA 7*. Praha: Fakulta technologie ochrany prostředí VŠCHT Praha, 2015, 54 - 58. ISSN 1804-2058.
- [41] STRAKA, Pavel a Jana NÁHUNKOVÁ. Termogravimetrická analýza popelů ze spalování biomasy. In: *PALIVA 5*. Praha: Fakulta technologie ochrany prostředí VŠCHT Praha, 2013, 32 - 36. ISSN 1804-2058.
- [42] HAVLÍK, Martin. *Technologie Oxy-Fuel spalování ve fluidních kotlích*. Praha, 2018. Bakalářská práce. Fakulta strojní, ČVUT Praha. Vedoucí práce Ing. Pavel Skopec, Ph.D.
- [43] ČSN 44 1355. Tuhá paliva. Nedopal. Stanovení uhlíku a vodíku. Praha, 1993.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Průběh VZDUCHOVÉHO spalování – 3 % O ₂ ve spalinách.....	I
Příloha č. 2: Průběh VZDUCHOVÉHO spalování – 6 % O ₂ ve spalinách.....	II
Příloha č. 3: Průběh VZDUCHOVÉHO spalování – 9 % O ₂ ve spalinách.....	III
Příloha č. 4: Průběh OXYFUEL spalování – 3 % O ₂ ve spalinách.....	IV
Příloha č. 5: Průběh OXYFUEL spalování – 6 % O ₂ ve spalinách.....	V
Příloha č. 6: Průběh OXYFUEL spalování – 9 % O ₂ ve spalinách.....	VI
Příloha č. 7: Vyhodnocené výsledky nedopalu ze VZDUCHOVÉHO spalování.....	VII
Příloha č. 8: Vyhodnocené výsledky nedopalu ze OXYFUEL spalování.....	VIII
Příloha č. 9: Ilustrační foto experimentálního zařízení.....	IX
Příloha č. 10: Ilustrační foto odběrového zařízení z vrsrtvy.....	X
Příloha č. 11: Ilustrační foto odběrové nádoby z cyklonu.....	XI