



M0 / T0

Változat: 1.01

Kiadva: 2019. szeptember 9.

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

Anyagismereti alapok

írta: Dr. Molnár Kolos

**A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI WEB OLDALON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU**

1. A gyakorlat célja

A gyakorlat célja megismertetni a hallgatókat a polimertechnika alapvető fogalmaival. Az alapokra építve célunk bemutatni a polimerek csoportosítását, és a polimer anyagszerkezettan legalapvetőbb megfontolásait. Célunk a hallgatókkal megismertetni a leggyakrabban felhasznált mesterséges polimereket és azok alkalmazási körét.

2. A polimertechnika és -anyagszerkezettan alapjai

Az alapfogalmak (polimer, monomer, ismétlődő egység stb.) alapkövei a polimertechnikának és ezek ismerete a műszaki gyakorlatban is nélkülözhetetlen. Ez a tananyag ezek megtanulásában nyújt segítséget a hallgatóknak. A gyakorlat elvégzése után a hallgatók képesek lesznek választ adni, hogy a polimerek miért viselkednek másként, mint a többi szerkezeti anyag.

2.1. Alapfogalmak

A **polimer molekula** olyan nagyméretű molekula (makromolekula), amelyet nagyon sok (*poli*) láncszerűen összekapcsolt ismétlődő egység (*mer*) alkot. Az ismétlődő egységek, polimerizációra alkalmas kisméretű molekulákból, ún. **monomerekből** származtatottak és kovalens kötésekkel kapcsolódnak össze.

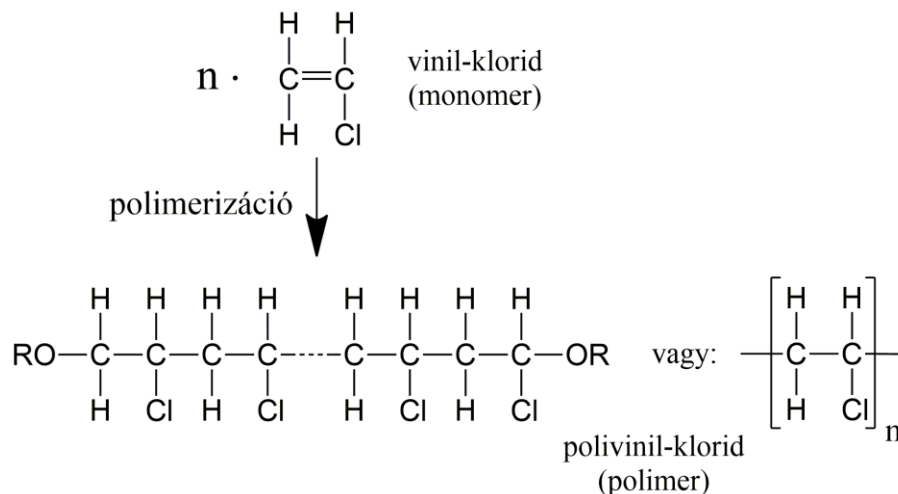
A polimerek közé tartoznak például a műanyagok, a gumik, a műszálak többsége, a cellulóz (fa, papír, pamut stb.) és a DNS is.

A **polimertechnika** (*polymer engineering*) minden olyan műszaki tevékenység, amelyet polimerekkel végzünk. A polimertechnika körébe tartozik a polimer anyagok előállítás, azok anyagtudománya – és vizsgálata, módosítása (pl. adalékolással), azok feldolgozása, valamint a kapcsolódó műszaki feladatok (szerszámtervezés, alkatrész- és terméktervezés, anyagválasztás).

A mesterséges polimereket döntően **polimerizációval**, vagy ritkábban természetes polimerek módosítása útján állítják elő. A polimerizáció során ún. **monomereket**, alakítanak át és egyesítenek polimer molekulákká. Ezek a monomerek polimerizáció során **kémiai átalakuláson** mennek át, vagyis a polimer részét képző ismétlődő egység kémiaiilag jelentősen eltér a monomertől. A polimer definíciójában a „nagyon sok” azt jelenti, hogy egy, vagy néhány ismétlődő

egység hozzáadásától, vagy elvételétől az anyag tulajdonságai nem változnak meg számottevően. A gyakorlatban ez több száz, általában minimum ezer ismétlődő egység összekapcsolását jelenti.

Vegyük például az egyik legnagyobb mennyiségben előállított polimert, a polivinil-kloridot (PVC). Az 1. ábrán látható, hogy a monomer a vinil-klorid, amelyből ún. polimerizációs láncreakcióval állítják elő a polimert. A vinil-kloridban található kettős kovalens kötés felszakad, reakcióba lép egy másik monomerrel és így ismétlődő egységgé alakul át. *A szintézis beindításához adalékanyagokat használnak, ami eredményeként a láncokat végcsoportok zárják le (itt RO-val jelölve).* Az ábra alsó részén látható az egyszerűsített jelölés, amely szerint az ismétlődő egységet zárójelbe tesszük és egy n betűvel jelezzük, hogy több ismétlődő egységből áll a molekula (itt a végcsoportokat is praktikusán elhanyagoljuk).



1. ábra A PVC polimerizációja vinilkloridból

Amennyiben konkrétan szeretnénk kifejezni, hogy a lánc hossza mekkora, akkor erre általában a **polimerizációs fokot** használjuk. A polimerizációs fok (**DP**, *degree of polymerization*) azt fejezi ki, hogy hány monomerből polimerizáltuk az adott molekulaláncot.

Az **oligomer** a polimerhez hasonló, de alapvetően kisebb tömegű molekula. Az oligomerben az ismétlődő egységek hasonló módon, ámde kis számban vannak összekapcsolva egymással, így néhány további egység hozzáadása, vagy éppen elvétele már jelentősen befolyásolja az anyagtulajdonságokat. Ezeknél a polimerizációs fok jellemzően tízes nagyságrendbe esik.

Az oligomereknek jelentős szerepe van összetett szerkezeti anyagok, ún. kompozitok és a hőre nem lágyuló (bővebben 2.2. fejezet) polimer termékek gyártásánál.

A **degradáció** a polimer életútját végigkísérő jelenség, amely során a polimer láncmolekulák statisztikusan töredeznek, vagy a végük rövidül (más néven *depolimerizáció*), illetve csoportok válnak le a polimer láncról (*elimináció*).

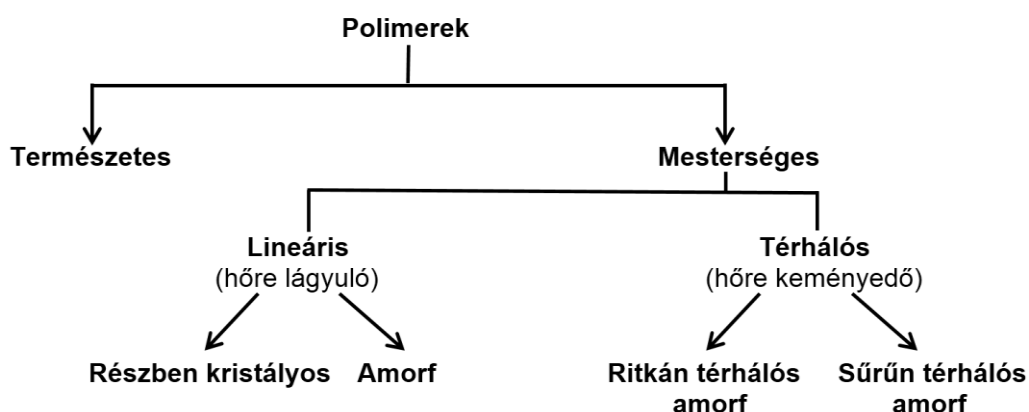
A degradáció a polimerizációval ellentétes, átlagos molekulatömeg csökkenéssel járó folyamat, amely az anyag minőségének folyamatos romlásához, öregedéshez, végül a polimer teljes lebomlásához vezet. A degradációt elősegíti a magas hőmérséklet, sugárzás (tipikusan UV), nedvesség, mechanikai és vegyi igénybevételek, illetve ezek kombinációja.

2.2. A polimerek csoportosítása

A polimerek túlnyomó többsége szerves vegyület. Léteznek szilícium vázú, szervesetlen polimerek is (pl. szilikongumik), de ezek jelen gyakorlaton nem kerülnek tárgyalásra.

A polimertechnikában **műanyagok**nak nevezzük a részben, vagy egészében mesterségesen előállított polimereket, illetve tágabb értelemben ezek adalékolt változatait is.

A polimerek csoportosítását mutatja be a 2. ábra. Eredetük szerint megkülönböztetünk természetes és mesterséges polimereket. A természetes polimerek a fehérjék (kollagén, albumin, zselatin), a poliszacharidok (cellulóz, keményítő, kitin, lecitin stb.), a polinukleotidok (DNS, RNS) és a természetes poliészterek.



2. ábra A polimer szerkezeti anyagok általános csoportosítása

A polimertechnikában a természetes polimerek közül a növényi eredetűeknek van nagyobb jelentősége: például cellulóz alapú természetes szálak (pamut, len, kender, juta, ramie, szizál stb.), fa és papír (cellulóz, hemicellulóz, lignin), de emellett állati eredetű polimereket is felhasználunk, például a hernyóselymet, vagy a bőrt (*Ezekről részletesen a természetes polimer szerkezeti anyagok*

c. tantárgyban tanulhatnak). A természetes polimereket a civilizáció kezdete óta széleskörűen használják, napjainkban a természetben történő viszonylag könnyű lebonthatóságuknak köszönhetően is egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek.

A mesterséges polimerek gyártása napjainkban túlnyomó részt kőolajból történik, de készülhetnek biológiailag megújuló szerves alapanyagokból is.

Mesterséges polimereken belül megkülönböztetünk **lineáris** és **térhálós** polimereket. A lineáris polimerek fonál-szerű láncmolekulákból állnak, amelyek lehetnek elágazók: kisebb-nagyobb oldalláncok is vannak a főláncon. Megkülönböztetünk **amorf** (rendezetlen térbeli szerkezet, a molekulák távolsága egymástól nem állandó) és **részben kristályos** (a molekulák egy jelentős része térben szabályos rendeződést mutat) típusokat.

Az amorf és részben kristályos anyagok szerkezete különböző, ráadásul számos tekintetben eltérően viselkednek (eltérő optikai, mechanikai tulajdonságok, hőtágulás, vetemedés stb.).

A lineáris szerkezetű polimerek viselkedésük szerint ún. **hőre lágyuló polimerek**. Szobahőmérsékleten szilárdak, a feldolgozáskor jellemzően megömleszthetők, folyékony halmazállapotba hozhatók, hűtéssel pedig ismét megszilárdulnak. Ez a folyamat többször megismételhető, azaz reverzibilis. A feldolgozásukat az jellemzi, hogy először hő hatására alakítható állapotba hozzák őket (viszkózusan folyós, vagy lágy, termoelasztikus állapot), kialakítják a termék/alkatrész formáját, majd pedig az alakot hűtéssel rögzítik.

Anyagában történő újrahasznosításuk egyszerű a folyamat reverzibilitása miatt. Megjegyzendő, hogy a hőhatás következtében degradáció is fellép, ami végül is korlátozza az újrafeldolgozhatóságuk számát. A hőre lágyuló (lineáris) polimerek egy különleges fajtája a **termoplasztikus elasztomer**, amely viselkedését tekintve szobahőmérsékleten gumyszerű, ámde reverzibilisen megömleszthető anyagot jelent.

A **térhálós polimerek** egy-két különleges kivételtől eltekintve amorf szerkezetűek. A rendezetlen módon elhelyezkedő molekulaláncok itt nemcsak egymásba gabalyodnak, hanem egyes helyeken kémiaiailag is összekötődnek a polimerizációs folyamat során. Ennek a térbeli hálóstruktúrának az eredménye, hogy nincsenek különálló molekulaláncok, amelyek képesek lennének egymáshoz képest elcsúszni (folyni), éppen ezért nem lehet folyadék halmazállapotba vinni ezeket: nem lehet az anyagot megömleszteni, és az oldószerek is legfeljebb csak lágyítják-duzzasztják ezeket.

A térhálópontok közötti távolság szerint megkülönböztetünk **ritkán (gyengén) térhálós és sűrűn térhálós** polimereket. A gyengén térhálós amorf polimerek, más néven **gyengén térhálós elasztomerek** a gumik. A sűrűn térhálós polimerek, más néven **duromerek** szobahőmérsékleten igen merevek, ridegek, jó vegyszerállóság jellemzi ezeket. A köznyelvi műgyantáknak, néha keménygumiknak nevezi ezeket.

A térhálós polimerek viselkedésük szerint jellemzően **hőre keményedő** (más néven *hőre nem lágyuló*, vagy *termoreaktív*) polimerek. Ezek az anyagok a feldolgozást megelőzően viszkózan folyós, vagy lágy-szilárd állapotban lévő ún. pre-polimerek, amelyek hő és/vagy sugárzással történő kezelés hatására megömleszthetetlen, megolvaszthatatlan, oldószerben nem feloldható polimerré alakulnak át, amely átalakulás irreverzibilis.

A **hőre keményedő polimerek** feldolgozása során tehát polimerizáció játszódik le. Először beindítják a kémiai folyamatot (komponensek összekeverése), majd a keverékből rögtön kialakítják a termék alakját, amit jellemzően hőkezeléssel (a kémiai folyamat felgyorsításával) rögzítenek. Mivel a folyamat során az alak irreverzibilis módon rögzül, ezért a kémiai folyamatot (polimerizációt) a termék gyártásakor, helyben kell elvégezni.

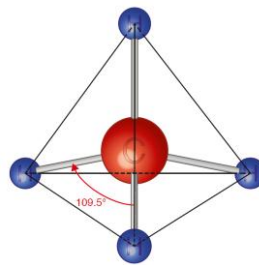
Ezeknél az anyagoknál tehát magának a polimernek és a terméknek az előállítása térben és időben egyszerre történik, nem választható el egymástól.

Az egyes anyagcsaládokra a műszaki gyakorlatból vett, néhány jellemző polimer (a rövidítések a 28. oldalon megtalálhatók):

- Lineáris amorf (hőre lágyuló) anyagok: **PVC, PS, ABS, SAN, PMMA, PC.**
- Lineáris, részben kristályos (hőre lágyuló) anyagok: **PET, PE, PP, PA, PEEK, PTFE, PBT, POM.**
- Ritkán térhálós elasztomerek (hőre keményedő): **természetes gumi (NR)**, butadién gumi (BR), nitril-butadién gumi (NBR), sztírol butadién gumi (SBR), kloroprén gumi (CR).
- Sűrűn térhálós duromerek (hőre keményedő): **epoxi (EP), telítetlen poliészter (UP), vinilészter (VE) gyanták**, fenol-formaldehid gyanta (bakelit), melamin gyanták.

3. A polimer anyagszerkezetan alapjai

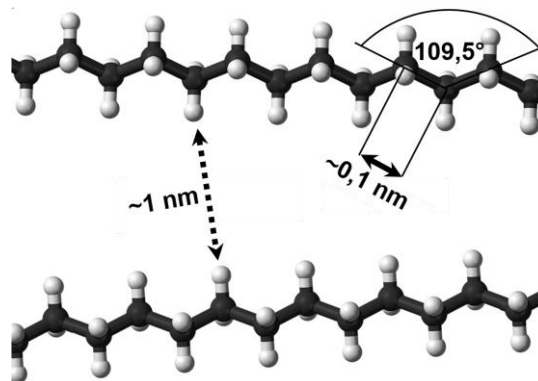
A polimer molekulák ismétlődő egységekből állnak, bennük az atomok erős, **elsőrendű** kovalens kötéssel kapcsolódnak egymáshoz, amelyek kötéstávolsága kicsi, nagyságrendileg 0,1 nm (1 Å). Kovalens kötés található az ismétlődő egységen belül is, a kapcsolódó atomok között. A szén 4 vegyérték elektronnal rendelkezik, így a szénatomhoz 4 atom tud kapcsolódni, tetraédres térbeli szerkezetet létrehozva pl. metán, (3. ábra), amelyben az atomok kapcsolódási szöge $109,5^\circ$.



3. ábra: A metán molekula (CH₄) tetraédres formájának sematikus ábrája

A 4. ábra mutatja be a polimer lánc térbeli szerkezetét egy polietilén molekula példáján keresztül. A szénatomok feketével, a hidrogén atomok szürkével vannak jelölve. A szénatomok itt a polimer lánc részei, a kötések térbeli elrendeződése ($109,5^\circ$ térszög) miatt a polimer lánc egy cikk-cakk alakot vesz fel. A kötésszögek terhelések hatására némileg tudnak változni, illetve a lánc flexibilis, a szénatomok között elfordulások is lehetségesek, így a molekula gombolyag formájában felgöngyölödhet.

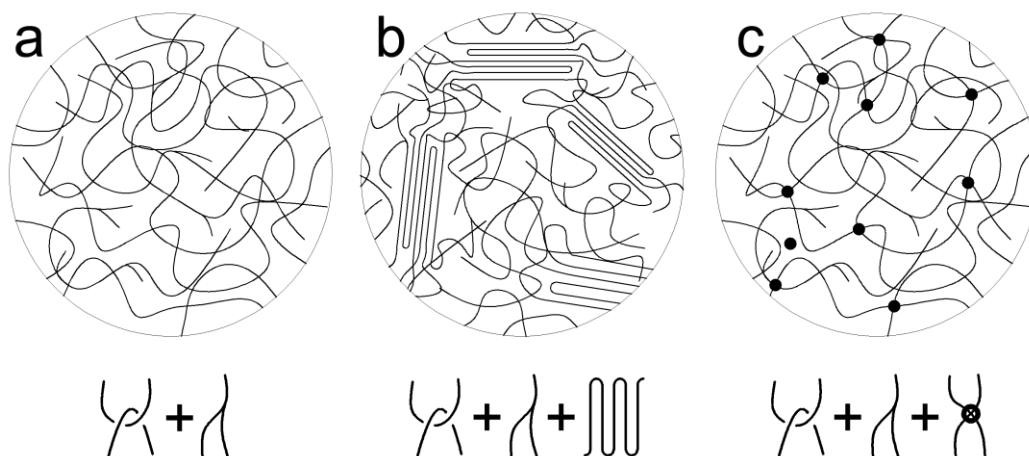
A polimer molekulalánc kisebb szakaszait, amelyek termodinamikailag külön egységet alkotnak, **szegmensek**nek hívjuk. A szegmens mérete rendszerint néhány ismétlődő egység, de hossza függ a hőmérséklettől is.



4. ábra Az atomok és a molekulák kapcsolódása a polietilén (PE) lánc modelljén szemléltetve

A molekulákon belül az atomok tehát szorosan kapcsolódnak (szén-szén: 0,15 nm, szén-hidrogén 0,11 nm), azonban az egyes makromolekulák között csupán másodrendű, fizikai kapcsolat van. Ezek a **másodrendű** kötések lényegesen nagyobb, nagyságrendileg 1 nm kötéstávolsággal rendelkeznek. Éppen ezért a polimer molekulák között nagy szabad térfogat áll rendelkezésre. Ez a nagy szabad térfogat egyrészt **kis sűrűséget** (általában 900-1400 kg/m³) eredményez, másrészt lehetővé teszi a molekulák kisebb-nagyobb részeinek, **szegmenseinek** elmozdulását. A gyenge másodrendű kötések következménye a polimerek nagy hőtágulási együtthatója is. A szabad térfogatba kisebb molekulák tudnak bediffundálni (pl. oldószer, víz, lágyítószer), amely a polimer nedvességfelvételéhez vezethet, de adalékokkal történő lágyítást és oldószerrel történő duzzasztást, vagy oldatba vitelt is lehetővé tesz. A nagy szabad térfogatnak, és a molekulák mozgékonyságának köszönhetően az egyes molekulák összegabalyodhatnak, azaz a molekulák számos helyen áthurkolódnak egymáson. Ez a jelenség a molekulák egymáshoz képesti elmozdulását nehezebbé teszi, és kihatással van a kristályosodási folyamatra is.

Az 5. ábra mutatja be az egyes polimer csoportoknak az egyszerűsített finomszerkezetét. A fekete vonalak molekulákat jelölnek (elhanyagolva a cikk-cakk alakot), amelyek minden esetben lehetnek elágazottak.



5. ábra A polimerek egyszerűsített szerkezeti vázlata, a) amorf hőre lágyuló (lineáris), b) részben kristályos hőre lágyuló (lineáris), c) térhálós (hőre nem lágyuló, amorf) szerkezet

Az **amorf hőre lágyuló (a)** anyagok egyetlen, amorf fázisból állnak. A molekulák lineárisak, tartalmazhatnak elágazásokat, oldalláncokat. A molekulák itt rendezetlenül helyezkednek el a térben, azaz a molekulák közötti távolság nem állandó.

Éppen ezért az amorf fázisban a legnagyobb a molekulák közötti szabad térfogat, ami kis sűrűséget eredményez, és nagy deformációkat tesz lehetővé. Az amorf hőre lágyuló polimereket az

jellemzi, hogy a hosszú, lineáris molekulák között áthurkolódások alakulnak ki. Ha a szerkezetet megömlesztjük, akkor a molekulák egymáshoz képest viszonylag könnyen el tudnak csúszni, de semmilyen statikus szerkezeti változás nem történik, a molekulák ugyanolyan, az ábrának megfelelő, rendezetlen állapotban vannak.

A **részben kristályos (b)** anyagok esetében az a jellemző, hogy a felhasználás hőmérsékletén, szilárd halmazállapotban az amorf részek mellett térben rendezett részek is jelentős mértékben találhatók bennük. Ezek a polimerek is lineáris szerkezetűek.

Egyes polimerek ömledékének hűtése során a molekulák rövidebb-hosszabb részei szabályosan rendeződnek egymás mellé. A molekulák áthurkolódásai, az elágazások, a térháló kötésponatok, a molekulavégek és emellett az energetikai okok is mind ellehetetlenítik az anyag teljes kristályosodását, így amorf fázis és kristályos fázis egyaránt kialakul bennük. A kristályosodás eredménye a b) ábrán látható (egyszerűsített) szerkezet, amelyben egy tetszőleges molekulalánc áthaladhat kristályos és amorf részeken egyaránt. A kristályos fázis nem határolható síklapokkal. A fázisok koherensen és erősen kapcsolódnak egymáshoz, de alapvetően nincsen éles átmenet közöttük.

A térhálós polimerek egy-két különleges esettől (pl. részben kristályos polimer utólagos térhálósítása nagyenergiájú sugárzással, gumik nyújtási kristályosodása) eltekintve mind amorf szerkezetűek. A molekulavégek és áthurkolódások mellett térháló kötésponatok is találhatók bennük.

Ezek a térháló kötésponatok elsőrendű, kovalens kötésekkel kötik össze az atomokat (ismétlődő egységeket). A hőre lágyuló polimerekhez képest itt hatalmas méretű, térben hálószerűen kiterjedt molekulák alakulnak ki. A folyadék állapot létrejöttének alapfeltétele a molekulák egymáshoz képesti nagymértékű és irreverzibilis elmozdulása, amit ez a kötött szerkezet nem tesz lehetővé. Emiatt nem is tudjuk ezeket az anyagokat ömledék állapotba vinni és a polimer egy ismételt melegítés során is szilárd marad. Ha a térháló ritka (~1000 szénatomra jut egy térháló kötésponat), akkor nagy deformációkra nyílik lehetőség (elasztomerek), míg a sűrű kötésponatok (~20 szénatomra jut egy térháló kötésponat) merev szerkezetet eredményeznek (duromerek). Míg az elasztomerek esetében a molekulák egymáson való áthurkolódásának hatásaival lehet számolni, addig a duromereken belül ennek hatása igen kis mértékű.

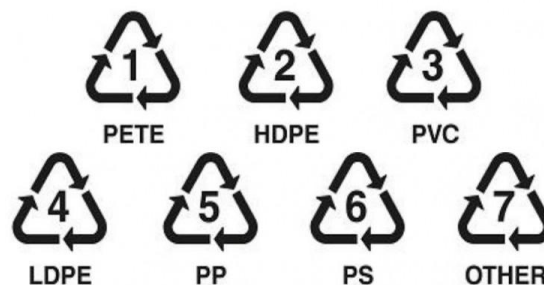
Ezek a modellek a polimerek valódi szerkezetét igencsak egyszerűsített módon mutatják be, így bonyolult folyamatok modellezésére nem alkalmasak, ugyanakkor jól használhatók arra, hogy

ezek segítségével a polimerek mechanikai viselkedését és fizikai tulajdonságait szemléletesen mutassuk be, ezáltal könnyítve azok megértését.

4. A leggyakoribb mesterséges polimer szerkezeti anyagok

A világ műanyag termelése 2016-ban 335 millió tonna volt, amelyből Európában ennek nagyjából 1/5-e, 60 millió tonna készült. A világ műanyagtermelésének körülbelül 80%-át 6 műanyagtípus fedi le: polietilén (PE), polipropilén (PP), polivinil-klorid (PVC), poliuretánok (PUR), polietilén-tereftalát (PET), polisztirol (PS). Hagyományosan a PE-t, PP-t, PVC-t, PS-t és PET-et nevezzük tömegműanyagoknak, míg a PUR-t nem soroljuk ide, mert ugyan nagy tömegben gyártják, de nem egy adott polimer típust, hanem egy egész anyagcsaládot jelöl.

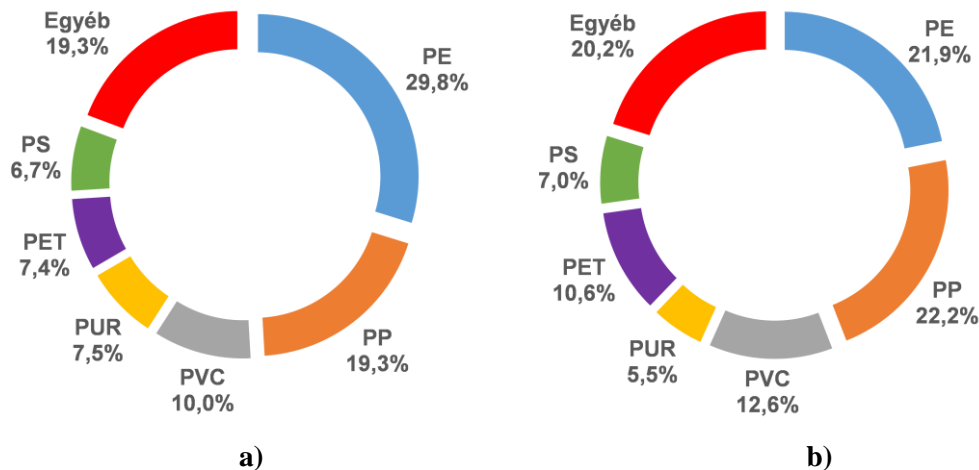
Mivel a tömegműanyagokat használjuk fel a legnagyobb mennyiségben, ezért az újrahasznosításuk rendkívül fontos. Éppen ezért vezették be az **azonosítási kódokat** (6. ábra), amelyek a műanyag termékek zömén is megtalálható. Ez lehetővé teszi, hogy a műanyag hulladékokat fajták szerint külön gyűjtsék, illetve vegyes hulladék esetén a válogatásnál is nagy segítséget nyújt, így megkönnyítve azok újrahasznosítását. Az 1-es szám a PET-et jelöli, gyakran PETE felirattal. A 3-as PVC-nél gyakran csak egy V felirat látható a szám alatt. A polietilén (PE) nagy sűrűségű (*high density polyethylene*, HDPE) és kis sűrűségű (*low density polyethylene*, LDPE) technikai okokból külön válogatják (2-es és 4-es számmal). Az öt tömegműanyag mellett minden csak „egyéb” (7-es számmal) kategóriába esik.



6. ábra A műanyagok újrahasznosításánál használt egyezményes azonosítási kódok

A műanyagok feldolgozásának mennyiségi eloszlása (2016) látható az 7. ábrán. Az „egyéb” kategóriába – hasonlóan az azonosítási kódokhoz – műszaki és nagyteljesítményű műanyagok tartoznak. Ezekből mennyiségileg kevesebbet használunk fel, de jellemzően sokkal nagyobb műszaki igényeket elégítenek ki és az ebből készült termékek élettartama is lényegesen hosszabb.

Tulajdonságai miatt a műszaki műanyagok körébe soroljuk ezeket. Magyarországon a legnagyobb mennyiségben feldolgozott műszaki műanyagok: ABS (5,7%), PUR (5,5%), PA (3,4%), PC (2,5%), PBT (1,6%), PC/ABS (keverék, 0,5%), POM (0,4%).

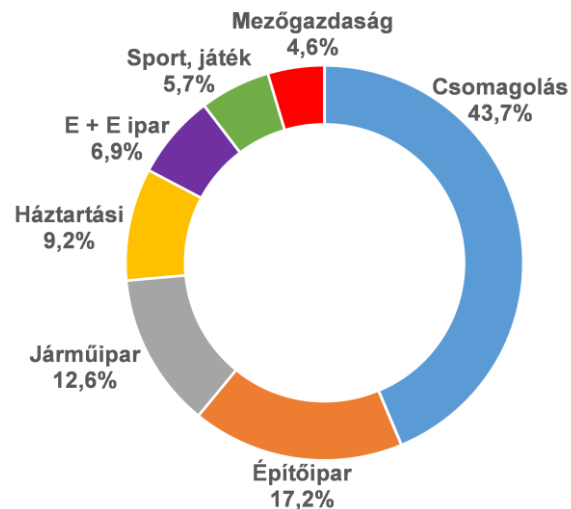


7. ábra A műanyag feldolgozásának megoszlása polimer típusonként, a) EU28+Norvégia és Svájc, b) Magyarország

4.1. A tömegműanyagok

A tömegműanyagok megjelenése gyakran esztétikus (pl. csomagolások), de a mechanikai tulajdonságaik mérsékeltek és a bennük rejlő műszaki tartalom is korlátozott; leginkább a csekély árukkal nyertek nagy teret. A tömegműanyagok alacsony árának köszönhető, hogy olyan célokra is próbálják alkalmazni, amelyekre alkalmatlanok. A nem megfelelő működés, vagy korai tönkremenetel nem a műanyag hibája, hanem a helytelen anyagválasztás, a mérnök és a megrendelő vagy gyártó rossz kompromisszumainak következménye. A termékgyártás során gyakran ütközhetünk méretpontosságbeli korlátokba, és gyakran hajlamosak zsugorodásra, vetemedésre és egy részük időjárás-állósága (UV állóság, degradáció) sem kielégítő.

A 8. ábra mutatja be a Magyarországon feldolgozott műanyag mennyiségének iparágankénti eloszlását. A tömegműanyagok ára a nyersolaj árától és egyéb világpiaci tényezőktől jelentősen függ, de jellemzően csupán 0,8-1 €/kg között mozog. Éppen ezért van az, hogy megéri ezekből a tömegműanyagokból egyszer használatos csomagolóanyagokat és eldobható termékeket (pl. pelenka, fecskendő stb.) valamint szezonális termékeket (mezőgazdasági fóliák) gyártani.

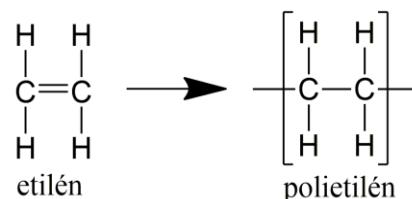


8. ábra Magyarországon 2016-ban feldolgozott műanyag mennyisége iparáganként

A felhasznált tömegműanyagok jó részéből, azért nem keletkezik szinte azonnal és automatikusan hulladék. Számos tömegműanyagból készül időtálló és minőségi termék (játékok, autóiipari alkatrészek, elektronikai alkatrészek, kábelszigetelések, víz-, gáz- és szennyvíz vezetékek, építőipari hőszigetelő rendszerek, rekeszek, műszálak).

4.1.1. A polietilén (PE)

A polietilén egy ún. poliolefin, anyag (ismétlődő egysége csak szénből és hidrogénből áll), gyártása túlnyomó többségében kőolaj-alapú. A kőolaj nagy hőmérsékletű (650-850 °C), oxigénmentes bontása (pirolízise) során jelentős mennyiségű etilén és propilén (lásd PP, 4.1.2.) keletkezik. A polietilént az etilén (amely szobahőmérsékleten gáz halmazállapotú, nehezen komprimálható és robbanásveszélyes) polimerizációs láncreakciójával állítják elő. Az etilén monomert és a PE egyetlen ismétlődő egységét a 9. ábra mutatja be. (A polimer molekulát, kihangsúlyozva hogy sok ismétlődő egységből áll, a zárójel után n indexszel jelöljük az 1. ábrához hasonló módon.)



9. ábra Az etilén molekula és a polietilén ismétlődő egysége

A PE részben kristályos (kristályos részaránya 30-80 tömeg%), hőre lágyuló polimer, amely erősen apoláros. Környezeti körülmények között éghető anyag, amely kékes színű lánggal, igen gyorsan ég, miközben paraffin illatot áraszt és csöpög is (ami a láng továbbterjesztéséhez hozzájárul). Könnyen színezhető, ennek hiányában áttetsző-opálos, nagyon vékony fólia esetében lehet átlátszó, de sosem víztiszta.

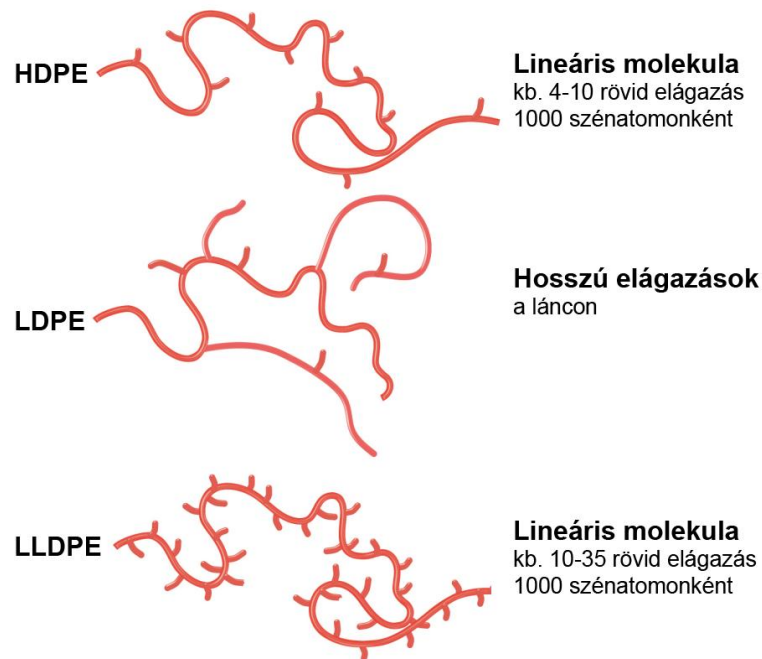
A PE szívós anyag, törés-szakadás előtt nagy nyúlásokat is képes elviselni, ámde ez a deformációja jórészt irreverzibilis. Kis szilárdsággal és merevséggel rendelkezik. Kis sűrűséggel bír ($870-970 \text{ kg/m}^3$), és nagy hőtágulási együttható jellemzi. Kiválóan ellenáll vegyszereknek (savaknak, lúgoknak egyaránt), éppen ezért nagyon nehéz oldatba vinni (szobahőmérsékleten nem is lehetséges), nagyon jó elektromos szigetelő. Vízáteresztő képessége csekély, víztaszító (hidrofób), de a szerves gázokat átengedi (nem aromazáró). A PE UV stabilitása igen gyenge, ami degradációra hajlamossá teszi, amely során sárgulásra és az amúgy sem nagy szilárdság csökkenésére, törékennyé válásra is számítani kell. Megfelelő stabilizátorokkal (adalékolás) a degradációs hajlam csökkenthető. A felhasználási hőmérséklettartománya $-120 - +60 \text{ °C}$ között van.

A PE feldolgozása könnyű, jellemzően fröccsöntéssel, extrúzióval, extrúziós fúvással, rotációs öntéssel történik. A feldolgozása során érdemes megfontolni, hogy nagyon nehezen ragasztható, inkább hegeszteni érdemes, festése és lakkozása szintén problémás, ezért a címkézés preferált.

A PE több fajtáját is megkülönböztetjük, amelyek azonos monomerből, de különböző gyártástechnológiával (nyomásviszonyok, katalizátor rendszer stb.) készülnek:

- **LDPE** (kissűrűségű polietilén): a polimer láncon sok, nagyon hosszú elágazás van (10. ábra), ami a kristályosodásnak gátat szab (legfeljebb 35-55% kristályos részarány). Nagyon szívós, hajlékony, lényegesen lágyabb, kisebb modulusú, és kisebb hőterhelhetőségű, mint a HDPE.
- **HDPE** (nagsűrűségű polietilén): az LDPE-nél hosszabb láncok alkotják, amelyeken sokkal kevesebb, rövid elágazás van (10. ábra). A kristályos részarány ennek megfelelően nagyobb, akár 70-80% is lehet, nagyobb méretű és egyenletesebb méreteloszlású kristallitokkal. Nagyobb szilárdságú, hőterhelhetőségű és merevebb, mint az LDPE, de kevésbé átlátszó és kisebb nyúlásokat képes szakadás nélkül elviselni, mint az.
- **LLDPE** (lineáris kissűrűségű polietilén): a molekuláin nagyon sűrűn van nagyon sok rövid elágazás (10. ábra). Kevés áthurkolódás jellemzi és a molekulák el tudnak csúszni egymáson. Így szerkezetét tekintve a HDPE-hez hasonló, de hajlékonyabb annál. Az LDPE-

nél nagyobb a kristályossága, jobb a szilárdsága, jobb az ütésállósága és jellemzően vékonyabb fóliák készíthetők belőle.



10. ábra A leggyakoribb polietilén típusok molekulaalakja

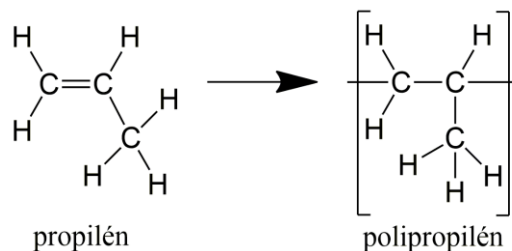
- MDPE (közepes sűrűségű polietilén): tulajdonságait tekintve az LDPE és a HDPE között helyezkedik el. Lágyabb és szívósabb a HDPE-nél, de kevesebbet nyúlik és nem olyan átlátszó, mint az LDPE.
- **UHMWPE** (ultra-nagy molekulatömegű polietilén): szívóssága kiváló, a fáradásnak jól ellenáll, kicsi a sűrűsége (930 kg/m^3). A nagy molekulatömege miatt nehezebb feldolgozni a hagyományos technológiákkal. Az emberi szervezettel összeférhető, ezért például csípőprotézis készül belőle.
- HPPE (nagyteljesítményű polietilén) vagy HOPE (nagy orientáltóságú polietilén): egy különleges fajta UHMWPE szál, amelyet ún. gélfázisú szálképzéssel állítanak elő. Nagyon nagy a kristályossága és a molekuláris orientációja, ezért nagy szilárdsággal (akár 4 GPa) és modulusszal (150 GPa) rendelkezik. Tipikusan hegymászó köteleket, horgászszinórokat gyártanak belőle.
- X-PE (térhálósított, ill. térhálósítható polietilén): a PE-t utólag térhálósítják nagyenergiájú besugárással, vagy kémiai úton. A technológiával a hőálló képesség akár 95 °C -ig

megnövelhető (pl. alumínium betétes többrétegű fűtéscsövek), illetve alakemlékező képessége és jó elektromos szigetelőképessége miatt hő-zsugorcsövek készülnek belőle.

A polietilén jellemző alkalmazási területei: csomagolófóliák, zacskók és mezőgazdasági fóliák, kábelek szigetelése (LDPE és LLDPE), fűjt flakonok, gázcsövek, lemezek, kis és nagy tárolóedények, tartályok, forgalomterelő-elemek, hulladékgyűjtő-szigetek, üzemanyag-tartályok, kültéri székek (HDPE), emellett kiváló minőségű cérnák, zsinórok, kötelek (HPPE), csípőprotézisek, gépelemek (UHMWPE).

4.1.2. A polipropilén (PP)

A PP szintén egy poliolefin anyag, a műszaki gyakorlatban hőre lágyuló részben kristályos polimer, amely erősen apoláros. Gyártása túlnyomó többségében kőolaj-alapú, propilén láncreakciós polimerizációjával történik. A PP egyetlen ismétlődő egysége a 11. ábrán látható.



11. ábra A propilén monomer és a polipropilén ismétlődő egysége

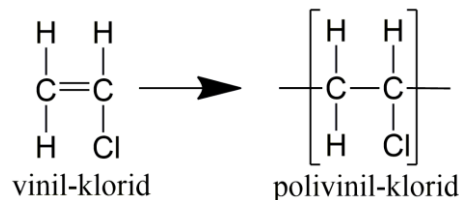
A PP sűrűsége az egyik legkisebb a polimerek között, csupán kb. 900 kg/m³. Kiváló ütésállósággal rendelkezik, nagyon nagy energia-elnyelő képessége van és akár 90 °C-ig is felhasználható. Az UV állósága nem kielégítő, sárgulásra hajlamos. A hidegállósága sem kielégítő, körülbelül 0 °C-on ridegedik (üvegesedési átmenetet mutat), ezért a polimerizációkor gyakran 5-7% etilént is a monomer elegyhez kevernek, amivel a hidegtűrése javítható (E-PP kopolimer, random PP kopolimer). Rugalmas változatot kaphatunk, ha a propilén polimerizációja során etilént és diént egyaránt használunk (EPDM gumi). Kifejezetten gyakran szokták társítani különféle erősítőanyagokkal, például farosttal vagy vágott üvegszállal, amelyekkel a merevsége javítható.

Vegyileg ellenálló, jó elektromos szigetelőanyag. A szerszámban jelentősen zsugorodik, a hőtágulása nagy, de kisebb, mint a PE-nek. A PP kék lánggal, gyorsan ég, paraffinos szaga van, a lángterjedést elősegíti, hogy csepegve ég. A PP-t a HDPE-hez hasonló technológiákkal (fröccsöntés, extrúzió stb.) dolgozzák fel.

Főbb alkalmazási területei: műszálak, kötöző zsinórok, zsákok, hevederek, műanyag cserepek, ládák, dobozok és rekeszek, flakonok, egyszer használatos orvosi eszközök, gépkocsi belső burkolati elemek (farosttal társítva), lökhárító (EPDM változat), kisebb terhelésű gépipari alkatrészek (üvegszállal társítva).

4.1.3. A polivinil-klorid (PVC)

A PVC amorf, hőre lágyuló polimer, amely megjelenését tekintve alapvetően átlátszó-áttetsző. Monomere a vinilklorid, amely az ismétlődő egységgel együtt a 12. ábrán látható. A PVC gyártása is polimerizációs láncreakcióval történik.



12. ábra A vinilklorid monomer és a PVC ismétlődő egysége (b)

A PVC-ben a klór atomok javarészt rendezetlenül helyezkednek el a lánc mentén (ataktikus), valamint a molekulákon az LDPE-hez hasonlóan hosszú elágazások találhatóak (1000 szénatomra jut 2-4 ilyen) ezért nem hajlamos a kristályosodásra.

A PVC nehezen gyullad, zöld lánggal ég, szúrós szagú, mert égésekor sósav keletkezik. Vegyszerállósága korlátozott, UV-degradációra és termikus degradációra hajlamos. Merev, jó méretpontosságú és méretstabilitású termékek gyárthatók belőle, és merevsége ellenére szívós és ütésálló anyag. Lágyítással és egyéb adalékokkal mechanikai tulajdonságai széles határok között beállítható. Jó hidegállósággal rendelkezik, a hőtágulása nagy, de kisebb, mint a PE-nek, tartós hőterhetősége 60 °C körül van.

A PVC önmagában inert és ártalmatlan. A PVC kemény anyag, amely nem dolgozható fel a hagyományos, hőre lágyuló polimer feldolgozási technológiákkal, ezért általában lágyítókat kevernek hozzá, gyakran nagy mennyiségben. A lágyító egy kis molsúlyú anyag, amely jellegzetes szagot kölcsönöz a terméknek és a PVC-ből kioldódva egészségre ártalmas lehet (ezeket a típusokat folyamatosan vezetik ki a termelésből). Emellett a polimerizáció során a visszamaradt, a tömbi anyagban megtalálható vinilklorid monomer is jelenthet problémát. A 13. ábra mutatja be, hogyan ágyazódnak be a lágyító rövid molekulái (vastaggal) a hosszú PVC molekulák közé. A lágyítás

mechanizmusa során a lágyító molekulái csökkentik a polimer molekulák közötti másodrendű kötések mennyiségét, így az anyag mechanikai tulajdonságai széles spektrumban változtathatók a lágyítószer mennyiségének változtatásával.



13. ábra A PVC lágyítása

A PVC feldolgozásakor nagyon nagy odafigyeléssel kell eljárni, mert a berendezésekben és a személyzetben egyaránt kárt tehet. Túl nagy hőmérsékletre melegítve, illetve túl sokáig ott tartva a polimer hőbomlása játszódik le, amely során hirtelen nagy mennyiségű sósav gáz keletkezik. Ez könnyen korrodálja a feldolgozó berendezéseket, az üzem egyéb fém felületeit és belélegezve is ártalmas. Mivel a PVC termikus stabilitása nem megfelelő, ezért adalékként fém-alapú hőstabilizátort adnak hozzá. Kifejezetten olcsó anyagot kaphatunk, ha a PVC-t töltőanyagokkal, akár 70%-ban adalékoljuk. Ilyen töltőanyag lehet például a kvarchomok, talkum, vagy a farost. A PVC termékek élettartama egyes termékeknél (pl. csövek, ablakkeretek) nagyon hosszú (akár 50 év) lehet.

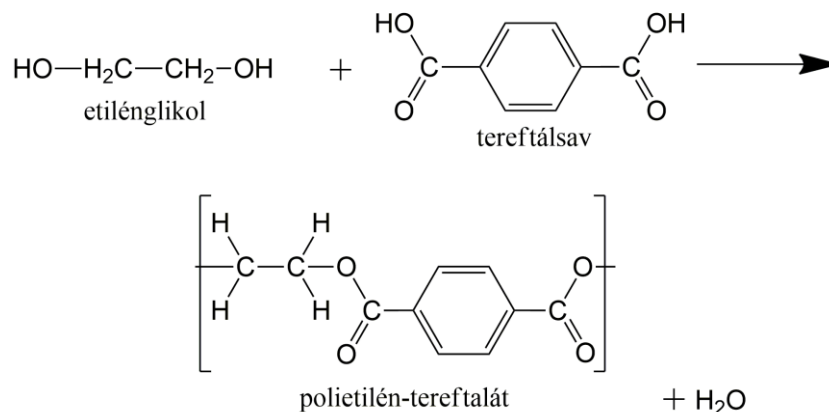
A PVC jellemző feldolgozási módszerei: extrúzió és extrúziós fűvás, kalanderezés, bevonatolás és kapcsolódó technológiák, de a fröccsöntés sem kizárt.

Főbb alkalmazási területei: lefolyó-, akvárium és egyéb csövek, ablak- és ajtókeretek, kábelek bevonata, ruházati termékek: gumicsizma, cipők talpbélése, műbőrök (gyakran egyéb anyaggal kombinálva és a felület megmintázásával), padlók (linóleum), fogantyúk, úszógumi. A lágyítók miatt élelmiszer tárolására használatos edények nem készülnek PVC-ből, ugyanakkor megfelelő körültekintéssel infúziós tasakok és egyéb orvostechikai eszközök, valamint játékok igen.

4.1.4. A polietilén-tereftalát (PET)

A polietilén-tereftalát (PET, 14. ábra) egy részben kristályos hőre lágyuló polimer, amely a telített poliészterek családjába tartozik. A poliészterek két leggyakoribb fajtája a polietilén-tereftalát (PET) és a polibutilén-tereftalát (PBT). Egyedüli különbség közöttük, hogy a PET főláncában két CH₂ csoport van, míg a PBT-ben négy. A mechanikai tulajdonságai alapján mindkét anyag a műszaki műanyagok közé sorolható, ugyanakkor a nagy volumenben történő gyártása révén a PET igen olcsón hozzáférhető. A PET-et 1941-ben fedezték fel, a DuPont cég 1952-ben Mylar márkanéven vezette be a piacra. Az utóbbi két évtizedben lett igazán népszerű csomagolóanyag, az utóbbi időben már a 4. legnagyobb mennyiségben előállított és felhasznált műanyag, népszerűségét lényegében a PET palackok elterjedésének köszönheti.

A PET előállítása polikondenzációval történik etilén-glikolból (dialkohol) és tereftálsavból (dikarboxil-sav). Kristályosodása jelentősen függ a hűtés sebességétől. Gyors hűtéssel és ún.-gócképző adalékokkal elérhető, hogy igen kis kristályos részarány alakuljon ki, illetve kisméretűek legyenek a krisztallitok, így megjelenése víztiszta lesz. Lassú hűtéssel, ezzel szemben nagyobb kristályos részarány keletkezik és áttetsző, opálos lesz a termék.



14. ábra A PET ismétlődő egységének előállítása etilénglikolból és tereftálsavból (melléktermékként jelen esetben víz kondenzálódik)

A PET mérsékelten ütésálló, de jó hidegtűrő, emellett fázasztó igénybevételeknek is jól ellenáll. Alapvetően nagy szilárdságú és moduluszú, jó időjárásálló anyag, jó UV stabilitása van, méretpontos, méretstabil termékek állíthatók elő belőle.

Jó víz- és gázzáró képessége van (A PP-hez képest kb. 30x jobban ellenáll a CO₂ gáz diffúziójának), különösképpen, ha utólagos nyújtást kap a szerkezet (pl. palackfűvésznél, vagy fólia mechanikus nyújtásánál), ámde némi nedvesség felvételére (kb. 0,2%) hajlamos. Relatíve könnyen

feldolgozható, de ha nincsen jól kiszárítva, akkor annak során hidrolízissel degradálódik. A zsugorodása a hűtést követően nagy, akár 1,2-2 térfogat%.

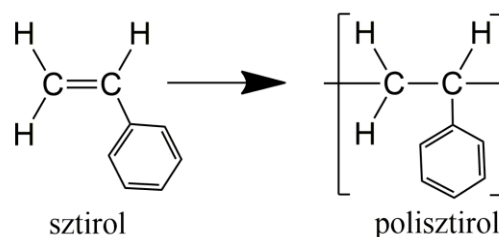
Nagyon jó elektromos szigetelő, de hajlamos elektrosztatikus feltöltődésre, amelyet sokáig meg is tart (pl. műszálas ruházatoknál kellemetlen, az E+E alkalmazásnál körültekintést igényel). Szerves oldószereknek szobahőmérsékleten ellenáll, nagyobb hőmérsékleten alkoholokban és aromás vegyületekben oldódik. Ellenáll olajnak, zsírnak, gyenge savaknak és lúgoknak. Nehezen gyűjthető meg, kormozó, sárga-narancs színű lánggal ég, miközben édeskés-aromás, de nem különösebben jellegzetes szagot áraszt. Sűrűsége kb. 1350 kg/m^3 , tartós hőállósága $100 \text{ }^\circ\text{C}$ körüli, üvegszál erősítéssel akár $140 \text{ }^\circ\text{C}$ is lehet. Mindezek alapján a PET kiváló műszaki polimer, amit a termelt mennyiség okán soroltak az elmúlt években a tömegműanyagok közé.

A PET elsődleges feldolgozása fröccsfúvással, illetve fóliagyártási eljárásokkal és melegalakítással történik. Az újrahasznosított PET-ből a leggyakrabban extrudált műszálakat készítenek, amely poliészter (PES) szál néven kerül forgalomba és a textil- és konfekcióipar előszeretettel használja, mint olcsó alapanyagot.

Főbb alkalmazási területei: ásványvizes és üdítőitalos palackok, műszálak (PES), víztiszta és színezett jó minőségű fóliák, dobozok, tojástartók, egyéb csomagolóipari termékek, üvegszál erősítéssel és adalékolással autóiipari alkatrészek és elektronikai szigetelőanyagok.

4.1.5. A polisztirol (PS)

A polisztirol (PS) egy jellemzően amorf szerkezetű, apoláros és aromás (15. ábra) polimer. Sztírol polimerizációs láncreakciójával állítják elő. Sok különféle sztírol származék (metilsztírol, metoxisztírol) polimerizációjával próbálkoztak korábban, de egyik sem lett akkora siker, mint a PS.



15. ábra A sztírol monomer és a PS ismétlődő egysége

A PS víztiszta megjelenésű (1,6-os törésmutatójú) és magassfényű, igen könnyen színezhető polimer, amely rendkívül gyenge UV állósága miatt üveg imitációjára többnyire nem alkalmas. A

feldolgozása során elérhető, hogy szag és ízmentes legyen, ezért az élelmiszeriparban egyszer használatos eszközökként (tányér, poharak, evőeszköz és csomagolások) előszeretettel használják.

A PS nagyon kemény, nagy rugalmassági modulussal rendelkező anyag, amely kiváló dielektromos tulajdonságokkal és szigetelőképeséssel rendelkezik. A nagy merevségét a benzol gyűrűnek köszönheti, amely a szénláncot nehezen deformálhatóvá, kötötté és rideggé teszi. Nagyon jó méretpontosság és méretstabilitás érhető el vele és egészen 100 °C-ig terhelhető.

A legfőbb ok, amiért nem tekinthetjük a PS-t műszaki polimernek, hogy nagyon rideg és törékeny. Kifejezetten rossz időjárás-, víz- és gázzáró. Kémiaailag ellenáll savaknak, lúgoknak és zsíroknak, olajoknak és alkoholoknak, de nem áll ellen például benzinnek, benzolnak és sok szerves oldószernek sem (pl. aceton). Hajlamos feszültségi repedezésre.

A PS sárga fénnnyel, nagyon jól, csepegve és erősen kormozva ég, miközben édeskés sztirol szagot áraszt. A PS nedvességet lényegében nem vesz fel, feldolgozása relatíve egyszerű, termikus degradációra sem érzékeny. Könnyen festhető, címkézhető, anyagában is színezhető.

A PS feldolgozása jellemzően melegalakítással (vákuumformázás, préslegformázás stb.), extrúzióval (tömör, valamint XPS), expandálással (EPS) tömbösítve történik, de fröccsöntéssel is számos terméket készítenek belőle.

Főbb alkalmazási területei: műanyag evőeszközök, tárolódobozok, játékok, poharak, pipetták, Petri-csészék és gyógyszer tárolók, valamint az építőiparban széleskörben és nagy volumenben használnak expandált (EPS) és az extrudált (XPS) habokat. Az EPS hab jellemzően fehér színű gyöngyökből áll és általános szigetelési feladatokat lát el (falak, födémek) stb., míg az XPS hab zárt cellás szerkezetű hab, amelyet jellemzően kékre, zöldre vagy rózsaszínre színeznek és jellemzően lábazatok szigetelésre használják. Az 1. táblázatban összefoglaltuk a tömegműanyagok legfontosabb tulajdonságait.

1. táblázat: A tömegműanyagok főbb tulajdonságainak összehasonlító táblázata

	LDPE	HDPE	PP	kPVC	PET	PS
Fizikai tulajdonságok						
Sűrűség [kg/m ³]	920	950-960	850-905	1380	1340	1050
Kristályos részarány [tömeg%]	35-55	60-80	70	amorf	kicsi	amorf
Telítettségi vízfelvétel [%]	<0,05		<0,05	<0,05	0,2	<0,1
Törésmutató (n) [-]	1,48		1,47	1,53	1,58	1,59
Mechanikai tulajdonságok						
Húzószilárdság [MPa]	10-15	30	30	50-70	70-80	35-50
Szakadási nyúlás [%]	500-1500		150	10-50	10-30	1-3
Húzási rugalmassági modulus [GPa]	0,1-0,5	1-1,5	1-1,7	2,5-3	2-4	3
Fajlagos ütőmunka (23 °C, Izod, hornyolt) [kJ/m]	nem török	0,15	0,05	0,06	0,02	>0,01
Shore D keménység	42-47	59-65	70-83	65-90	85-95	85-95
Termofizikai tulajdonságok						
Ismétlődő egység tömege [g/mol]	28,05		42,08	62,50	192,17	104,15
Oldhatósági paraméter [MPa ^{0,5}]	17,0		16,7	19,0	21,9	19,0
Olvadási hőmérséklet (T _m) [°C]	110	130	165	-	255	-
Üveges átmeneti hőmérséklet (T _g) [°C]	-120		-5	75	70	105
HDT hőállóság (1,8 MPa) [°C]	40	50	60	70	65	85
Tartós hőterhelhetőség [°C]	60	80	90	60	70-100	70
Lineáris hőtágulás T _g alatt (felett) [10 ⁻⁴ K ⁻¹]	(2,5)	(1,5)	1,4 (1,8)	0,7	0,7	0,7
Zsugorodás fröccsöntésnél [térfogat%]	2,6	1,5-2,5	1,2-2,5	0,5-0,7	1,2-2	0,3-0,6

4.2. A műszaki műanyagok

Műszaki műanyagok alatt olyan szintetikus polimereket értünk, amelyekkel szemben nagyobb műszaki elvárásokat támasztunk, és amelyek elsősorban műszaki alkalmazásokban kerülnek felhasználásra. Ezeknél már általános követelmény a kielégítő hőállóság, a méretpontosság, és a hosszútávú használat során is megfelelő mechanikai tulajdonságok. Nem általános követelmény, de az anyagválasztás során mérlegelni kell a konkrét alkalmazáshoz nélkülözhetetlen funkcionális tulajdonságokat is (pl. elektromos tulajdonságok, ütésállóság, tribológiai tulajdonságok, forgácsolhatóság, vegyszerállóság, karcállóság, kellemes tapintás, kellemes optikai megjelenés stb.), amelyekre szintén jó példákat lehet találni a műszaki műanyagok körében. A következőkben néhány, műszaki gyakorlatban népszerű műanyag típust mutatunk be röviden.

4.2.1. Poliuretánok (PUR)

A poliuretánok a világ legnagyobb mennyiségben gyártott és feldolgozott műszaki műanyagjai. A poliuretán egy egész anyagcsaládot jelöl, amelyben az uretán csoporttal összekötött különféle vegyületekkel az anyagtulajdonságok széles spektruma lefedhető. A poliuretánok két komponensből (di- vagy tri- izocianát és többértékű alkohol, más néven poliol) polimerizálhatók poliaddíciós eljárással. A PUR-ok lehetnek hőre lágyuló amorf szerkezetűek, vagy térhálósak egyaránt.

A poliuretánokat a hagyományos feldolgozás technológiák (fröccsöntés, extrúzió stb.) mellett nagyon gyakran habosítják, az előgyártmányok és termékek a lágy és rugalmas gumitól az egészen merev viselkedésig sokféle változatban rendelkezésre állnak. Rugalmas műszálakként, bevonatokként, tömítéseként és ragasztókként szintén használjuk ezeket. A PUR-ok azért foglalnak el különleges szerepet a polimerek feldolgozásában, mert nagyon gyakran a polimerizációs reakció a forma kialakítása során (pl. szerszámban) játszódik le. Ilyen eljárás a reaktív habképzés, a reaktív fröccsöntés (RIM) és a bevonatolás reaktív szórással.

PUR-ból készülnek járműipari szigetelések, műszerfal borítások és ülések rugalmas részei, műbőrök, szivacsok és „memória” habok, cipőtalpak, építőiparban szigetelések, szerelő és ragasztóhabok, emellett kis szériában reaktív fröccsöntött termékek stb.

4.2.2. Akrilnitril-butadién-sztirol (ABS)

Az ABS Magyarországon a legnagyobb mennyiségben feldolgozott műszaki műanyag. Lényegében egy módosított PS-nak tekinthető, amelyben a sztirolt akrilnitrillel és butadiénnel kopolimerizálják, polimerizációs láncreakcióval. A PS-nél nagyobb szilárdság és kifejezetten jobb szívósság és ütésállóság érhető el, hasonlóan amorf szerkezet és méretpontosság mellett. Az ütésállóságért gumyszerű butadién felel, míg akrilnitrillel a hőterhelhetőség javítható. UV állósága kielégítő, víztiszta változatban is rendelkezésre áll kereskedelmi forgalomban, egészségre ártalmatlan anyag. Kopásállósága nagyon jó, szívós, jól bírja a hőingadozást is. Ellenáll olajoknak, zsíroknak, benzinnak, savaknak és lúgoknak, de nem áll ellen acetonnak, éternek, benzoloknak. A polimer sárga lánggal, kormozva ég, jellemző édeskés szaggal.

Az ABS-t jellemzően fröccsöntéssel dolgozzák fel. Nedvességfelvételre nem érzékeny (max. 0,2%, akrilnitril tartalomtól függően), de szárítani szükséges. Mivel galvanizálható, ezért fröccsöntött áramköri hordozók (*molded interconnect device, MID*) kedvelt alapanyaga. Emellett elektronikai eszközök és háztartási és irodagépek (porszívó, hajszárító, fénymásoló stb.) burkolata és igényes játékok is készülnek belőle. Az autóiipari és elektrotechnikai alkalmazásoknál adalékolással érik el, hogy a polimer önkioltó legyen.

4.2.3. Poliamidok (PA)

A poliamidok (PA) egy egész anyagcsaládot jelentenek, különböző szerkezetű és megjelenésű anyagokkal. Alapvetően jó műszaki anyagok, nagy szilárdsággal, szívóssággal és hőállósággal. Alapvető különbség van az alifás (benzol gyűrűt nem tartalmazó) és aromás (benzol gyűrűt tartalmazó) változatok között. Az aromás poliamidok (aramidok) nagyobb merevséggel, szilárdsággal, jobb méretstabilitással és hőterhelhetőséggel rendelkeznek, de előállításuk drágább és piaci áruk lényegesen nagyobb.

A PA-okat tipikusan egy disav és egy diamin polikondenzációs reakciójával állítják elő, vagy laktámok gyűrűfelnnyitásával polimerizációjával. A PA ismétlődő egységében metilén (-CH₂-) csoportok, és amid kötőcsoport (-C=O-NH-) váltják egymást. A metilén részek könnyű térbeli rendeződése révén részben kristályos polimerek. A molekulaláncok között kialakuló hidrogén kötések következtében jó hőállósággal rendelkeznek, viszont nedvesség felvételére is hajlamosak.

4.2.3.1. Alifás poliamidok

Az alifás PA-okat általában az ismétlődő egységben lévő szénatomok számával szokták megnevezni. A két leggyakoribb változat a Poliamid 6 és a Poliamid 6.6. Az előbbiben 5 db apoláros metil (CH_2) csoporthoz kötődik az 1 db szénatomot tartalmazó *amid* csoport, míg az utóbbiban 4 db metil – 1 db amid – 6 db metil – 1 db amid a sorrend. Egyéb típusai: PA 3, PA 4.6, PA 6.10, PA 6.12, PA8, PA 10, PA 10.10, PA 11, PA 12. A különböző metil szegmens-hosszak eltérő kristályosodási hajlamhoz és a lánc eltérő merevségéhez-hajlékonyságához vezetnek. A nedvesség-felvételi hajlamuk jelentős, de az apoláros metilén csoportok számának a poláros amid csoportok számának rovására történő növelésével csökken (ezzel együtt a szilárdság is). Feldolgozásuk könnyű, de minden esetben előzetes szárítást igényel, mert hidrolitikus degradációra hajlamosak.

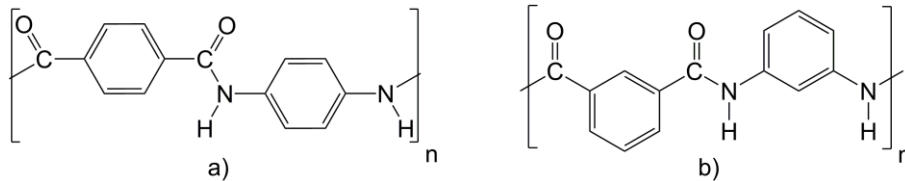
A poliamidok fehéres színűek, de anyagában jól színezhetők és emellett jól ragaszthatóak. Típustól függően akár $120\text{ }^\circ\text{C}$ - $180\text{ }^\circ\text{C}$ -ig is lehet tartósan terhelni ezeket. Kemények, merevek, kedvező frikciós tulajdonságaik, kopásállóságuk van és a polimerek között jól forgácsolható anyagnak számítanak, ezért előszeretettel gyártanak belőlük gépelemeket (fogaskerék, műanyag anya, csapágycsukló és siklóelemek) fröccsöntéssel, amelyeket utólag forgácsolási eljárásokkal még inkább méretpontosabbá lehet tenni. Az alifás PA-ok jó vegyszerállóak, ellenállnak benzinnel, benzolnak, zsíroknak, olajoknak és lúgoknak, valamint a gombáknak is; viszont savak és peroxid vegyületek kikezdi. Igen gyakran kombinálják az alifás PA-okat üvegszál erősítéssel, amely nagyobb szilárdságot és hőtűrést tesz lehetővé, ezeket a változatokat az autó- és gépipar előszeretettel használja motortéri elemek, kézi kisgépek burkolataként.

Adalékolással elérhető, hogy önkiló legyen, egyébként buborékozva és sercegve ég, kék színű, sárga peremű lánggal. Szaga – a természetes fehérjékhez hasonló szerkezete miatt – az égett állati szőrre hasonlít.

4.2.3.2. Aromás poliamidok

Az aromás poliamidokat aramidoknak nevezzük. A nagy hőállóságukat és nedvességfelvételi-hajlamukat a molekulaláncok között kialakuló hidrogén hidaknak köszönhetik. A főláncban található benzol-gyűrű alapvetően nagy merevséget és rideg szerkezetet, ezzel együtt jó energiaelnyelő-képességet eredményez. Az aramidok még az átlagos műszaki műanyagokénál is jobb tulajdonságokkal bírnak, ezért a nagyteljesítményű műanyagokhoz soroljuk ezeket.

Az aromás poliamidok két legjellemzőbb típusa a poli-para-fenilén-tereftálaramid (Kevlar, Technora, Twaron) és a poli-meta-fenilén-tereftálaramid (Nomex) - 16. ábra, amelyek azonos atomokból állnak, de azok a gyűrűhöz különféle módon kapcsolódnak.



16. ábra: A Kevlar (a) és a Nomex (b) ismétlődő egysége

A kevlár 300-350 °C-ig felhasználható, sárgás színű anyag. Rugalmassági modulusa 165 GPa, míg húzószilárdsága 2-3000 MPa, szakadási nyúlása 2,5-4 %. Szálas formában spröd, viszonylag könnyen hajlik, de a hajlítgatást nem bírja, könnyen kopik, ezért vágás- és golyóálló mellényekként, fékbetétekben, hevederekként, kompozitok erősítőanyagaként, sportszerekben, gumiabroncsok erősítésére stb. használják. A Nomex sárgás-barnás színű, nagy elektromos átütési szilárdságú, kis dielektromos állandójú, kiváló elektromos szigetelőképeségű anyag, amelyet elsősorban vékony lap formában használnak fel az elektromos iparban, valamint kompozitok szedvicsszerkezetek maganyagaként (M5 laborgyakorlat), de emellett szál formában is kapható kereskedelmi forgalomban. A meta-kapcsolódás a molekulalánc kisebb merevségét eredményezi, a molekulák flexibilisebbek, ezért például ruházati célra (hőálló védőfelszerelések tűzoltóknak, autóversenyzők lángálló ruházata) megfelelőbb és viselete komfortosabb. Kisebb a sűrűsége, mint a kevlárnak (1390 Vs. 1440 kg/cm³), de a szilárdsága és merevsége is. Szakadási nyúlása 7-20%. Szintén a meta-kapcsolódás miatt nehezebb szabályosan elrendezni a molekulaszegmenseket, ezért a kristályos részaránya rendszerint kisebb.

4.2.4. Polikarbonátok (PC)

A polikarbonát egy amorf szerkezetű, hőre lágyuló polimer, amelyet általában polikondenzációval állítanak elő biszfenol-A-ból (BPA). Természetes állapotában tiszta és átlátszó, anyagában könnyen színezhető, magasfényű és kiváló optikai tulajdonságokkal rendelkező anyag.

Elsősorban üveg imitációjára használják. Nagyon jó ütésállósággal rendelkezik, igen nagy deformációkat elvisel törés nélkül és emellett karcálló is tekinthető. Mivel jól alakítható anyag, így megfelelő körültekintéssel fűrészselhető, lyukasztható, vágható, fűrható és szegecselhető, anélkül, hogy a munkadarab megrepedne. Emellett amorf szerkezete révén melegen könnyen lehet

hajlítani és egyéb módokon formázni. Nagyon jó UV állósággal rendelkezik, ráadásul az UV sugarakat elnyeli, emellett kiváló ütésállóságát $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig megőrzi. Tartós hőterhelhetősége kb. $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, üvegesedési átmenete $145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A polikarbonát ellenáll olajnak, benzinnek, híg savaknak és lúgoknak, de nem áll ellen erős savaknak, lúgoknak és benzolnak. A PC nehezen gyújtható meg és a lángon kívül elalszik, vagyis önkioltó. Kormozva, buborékképződéssel, sárga lánggal ég, nincsen jellemző szaga.

A polikarbonátot kereskedelmi forgalomban előgyártmányként többnyire tábla, üregkamrás lemez, illetve rúd formában lehet kapni. Polikarbonátból készülnek személygépkocsik lámpatestjei, (nap)szemüvegek lencségei, poharak, előtetők, és a mára népszerűségüket elvesztő CD/DVD lemezek. Gyakran keverik (blendelik) ABS-el. A PC/ABS keverékből általában háztartási kisgépek, elektronikai eszközök burkolata készül.

4.2.5. Polioximetilén (POM)

A polioximetilén (POM), vagy más néven poliacetál a poliéterek családjába tartozik, mivel benne egy éter-kötés (-O-) kapcsol össze a főláncban metilén (CH_2) csoportokat. Az egyszerű szerkezete és kisméretű ismétlődő egysége teszi lehetővé a nagy kristályos részarányt. Sokáig nem tudták megoldani a megfelelő stabilizálását, ezért csak az 1960-as évektől gyártják üzemi körülmények között. UV sugárzás hatására történő degradációra érzékeny. Ellenáll benzinnek, benzolnak, gyenge savaknak és lúgoknak, olajoknak és alkoholoknak. Könnyen gyullad és kékes lánggal, csepegve ég. Tartós hőterhelhetősége $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A POM egyszerre kemény, merev és szívós anyag, amely hidegen is ütésálló. Rendkívül méretpontos termékek készíthetők belőle, hagyományos technológiákkal forgácsolható, kiválóan ellenáll a fárasztó és koptató igénybevételeknek, csekély kúszási hajlama van, emellett önkenő, ezáltal kenés nélkül is kedvező csúszási tulajdonságai is vannak.

A POM kiváló választás fogaskerekek és egyéb hajtástechnikai elemekhez, csapok és szelepek, pneumatikai elemek, csatlakozók egymáshoz képest elmozduló elemeihez (vízre érzéketlen), táskák csatjaihoz.

4.2.6. Poli(metil-metakrilát) (PMMA)

A legnépszerűbb, nagy volumenben gyártott poliakrilát a poli(metil-metakrilát), (PMMA) amely egy amorf, víztiszta megjelenésű és magas fényű, hidrofób polimer. Népszerű márkaneve a

Plexiglas, ami révén gyakran plexinek, vagy plexiüvegnek nevezzük. Előállítására rendszerint polimerizációs láncreakcióval történik, gyakran üveglapok között, így belső feszültségektől mentes táblákat kapnak.

Az akrilát polimereket széles körben használják műszaki alkalmazásokban, elsősorban üveg imitációkhoz. Kemény, merev, a karcállósága nem jó és nem is ütésálló. Forgácsolás során megrepedhet, a fűrésztó igénybevételek során feszültségi repedezés jellemzi. Időjárás állósága kiváló és könnyen színezhető, ezért kültéri alkalmazásai is népszerűek. Vegyszerállósága mérsékelt, jól ragasztható és hegeszthető. Gyúlékony, fehér lánggal ég, kormoz, serceg, miközben édeskés-gyümölcsös szagot áraszt. A PMMA alapvetően biokompatibilis (az emberi szervezettel összeférhető), ezért számos gyógyászati területen is használják, beleértve az implantátumokat is. Az akrilát polimerek népszerűek a fogpótlásban és javításban, valamint a szürkehályog (*cataracta*) gyógyítására szolgáló beültethető (intraokuláris) lencsék egy része is ebből készül. Ezen kívül készülnek belőle különféle szemüveg lencsék, kontakt lencsék, plasztikai műtétek segédanyagai stb.

5. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul (nem kérjük számon)

Magyar	Angol
Amorf	Amorphous
Hőre lágyuló	Thermoplastic
Hőre nem lágyuló	Thermoset
Ismétlődő egység	Repeat unit
Kovalens kötés	Covalent bond
Lágyító	Plasticizer
Mesterséges polimer	Synthetic polymer
Monomer	Monomer
Műanyag	Plastic
Műszál	Synthetic fiber / Man-made fiber
Műszaki műanyag	Engineering plastic
Oligomer	Olygomer
Polimer (molekula)	Polymer (molecule)
Polimerizációs fok	Degree of Polymerization
Részben kristályos	Semi-crystalline
Szegmens	Segment
Térhálós	Cross-linked
Természetes polimer	Natural polymer
Tömegműanyag	Commodity plastic
Üvegesedési átmenet (hőmérséklete)	Glass transition (temperature)

6. Polimer anyagtipusok rövidítésének jegyzéke (nem kérjük közvetlen számon)

ABS	akrilonitril-butadiénsztirol (polimer)	PE	polietilén
BR	butadién gumi	PEEK	poliéter-éterketon
CR	kloroprén gumi	PES	poliészter (műszál)
EP	epoxi	PET	polietilén-tereftalát
EPDM	etilén-propilén-dién monomer gumi	PMMA	polimetil-metakrilát
EPS	expandált polisztirol (hab)	POM	poli(oximetilén)
HDPE	nagsűrűségű polietilén	PP	polipropilén
HOPE	nagy orientáltságú polietilén	PS	polisztirol
HPPE	nagyteljesítményű polietilén	PTFE	poli(tetra-fluoretilén), teflon
kPVC	kemény polivinil-klorid	PUR	poliuretán
LDPE	kissűrűségű polietilén	PVC	polivinil-klorid
LLDPE	lineáris kissűrűségű polietilén	SAN	sztirol-akrilonitril kopolimer
IPVC	lágypolivinil-klorid	SBR	sztirol-butadién gumi
MDPE	közepes sűrűségű polietilén	UHMWPE	ultra-nagy molekulatömegű polietilén
NBR	nitril-butadién gumi	UP	telítetlen poliészter
NR	természetes gumi	VE	vinilészter
PA	poliamid	X-PE	térhálósított/térhálósítható polietilén
PBT	poli(butadién-tereftalát)	XPS	extrudált polisztirol (hab)
PC	polikarbonát		

7. Ajánlott irodalom

1. T. Czvikovszky, P. Nagy, J. Gaál: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
2. G. W. Ehrenstein: Polymeric Materials, Hanser Verlag, München, 2001.
3. www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_e_one_page.pdf (2018. szeptember 3.)
4. L. Buzási: Magyarország műanyagipara 2016-ban (I.), Polimerek, 3(7), 200-205, 2017.
5. L. Buzási: Magyarország műanyagipara 2016-ban (II.), Polimerek, 3(8), 232-237, 2017.
6. A. Dunai, L. Macskási: Műanyagok Fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003
7. www.polymerdatabase.com (2018. szeptember 3.)
8. T. A. Osswald, G. Menges: Material Science of Polymers for Engineers, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
9. J. E. Mark: Polymer Data Handbook, Oxford University Press, 1999.
10. T.R. Crompton, Physical Testing of Plastics, Smithers Rapra Technology, Akron, 2012.

A jegyzettel kapcsolatos észrevételeit küldje el e-mailben:

Dr. Molnár Kolos

molnar@pt.bme.hu