

Műanyag hulladék: elégetni vagy újrafeldolgozni?

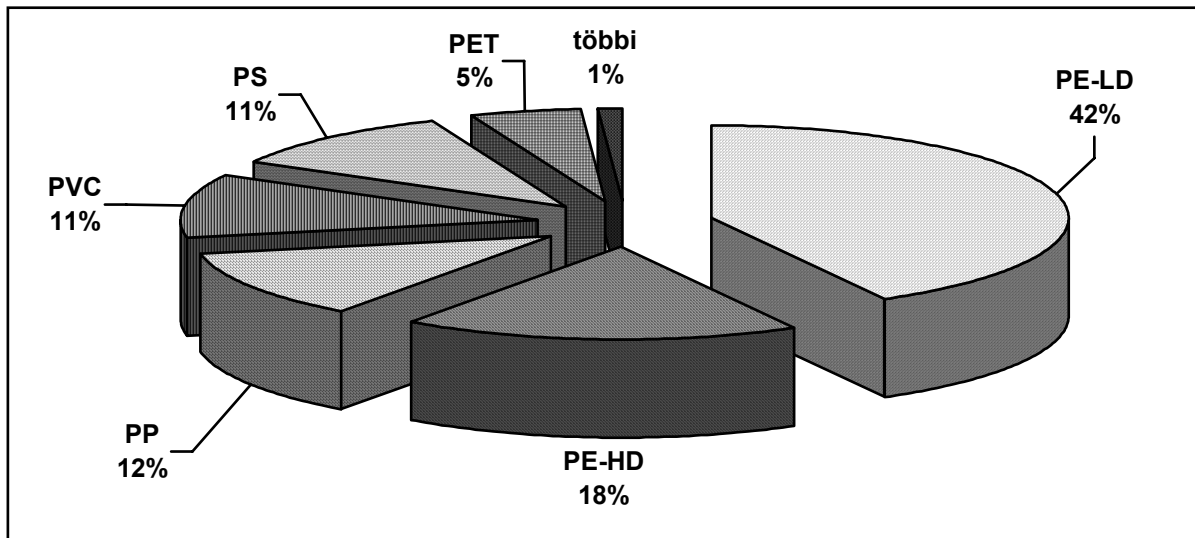
Tárgyszavak: műanyag hulladék; mennyiség; összetétel; lerakás; elégetés; káros égéstermékek; CO; CO₂; korom; policiklusos aromás vegyületek; visszaforgatás; energiamérleg.

Mi legyen a műanyag hulladékkal?

A műanyag hulladékok többsége nem bomlik le a természetben. Az ilyen hulladék legnagyobb mennyiségben csomagolóeszközként (pl. üdítőitalos palackként, ezek kupakjaként, tisztítószerflakonként) jelenik meg, de gyakran előfordul tartós cikkekben (pl. háztartási gépekben, bútorokban) és használati cikkekben is (pl. pelenkák, szemeteszsákok, poharak, evőeszközök, orvosi eszközök stb. formájában). *Az USA-ban 2000-ben a városi szilárd hulladék-áram tömegének 10,7%-a (mintegy 24,7 M t) műanyag volt.* A hulladékáram műanyag tartalma folyamatosan nőtt az 1960-as évektől (amikor csak mintegy 1% volt) a mai 10–11%-os értékre. Az utóbbi 5–10 évben, ahogy bevezették a műanyagok újrahasznosítását, a hulladékáram műanyag tartalma fokozatosan stabilizálódott a 10% körüli értéken. *Térfogatarányban a műanyagok kis sűrűsége miatt még rosszabb a helyzet, a kommunális hulladék térfogatának kb. 24%-át teszik ki.* A potenciálisan fertőző kórházi hulladéknak még nagyobb része, 40 % (m/m) műanyag.

A szilárd hulladék mennyiségének mérséklésére sokféle módszert dolgoztak ki a hulladékforrás csökkentésétől az újrahasznosításon és a hulladéklerakáson keresztül az energetikai hasznosításig. *Azonban még a fejlett országokban is csak a szilárd városi hulladék igen kis hányadát tudják gazdaságosan hasznosítani.* A műanyag hulladék nagy része továbbra is a lerakókba kerül. A korábbiakban a városi hulladékot minden válogatás nélkül lerakókba helyezték, de ez a városi lakosság növekedése és a rendelkezésre álló lerakók véges térfogata miatt egyre kevésbé lehetséges. A hulladékhegyek növekedése a környezet fokozott szennyezéséhez és a rágcsálók elszaporodásához vezetett.

Az 1. ábrán látható a lakossági hulladék műanyagfrakciójának típus szerinti megoszlása, amely világszerte elég hasonló. A műanyag hulladék nagy részét (99%) három műanyag típus teszi ki: a poliolefinok (72%), a PVC (11%) és a PET (5%). Ezek mindegyike magában visszaforgatható lenne, de ez csak a PET esetében gazdaságos az alapanyag magas ára miatt. Érdeemes tehát megvizsgálni az elégetés és az újrahasznosítás kérdését mind gazdasági, mind környezeti szempontból.



1. ábra A lakossági műanyag hulladék jellemző összetétele

Környezeti szempontból az újrahasznosítás mindenképpen előnyös, mert az adott anyagot nem kell újra megtermelni, és kevesebb hulladék kerül a talajba, de ez nem végleges megoldás, hiszen az újrahasznosítási ciklusok száma mindenképpen véges. Nem elhanyagolható nehézséget jelent az újrahasznosítási előírások betartatása és a újrafeldolgozott (visszaforgatott) műanyagok piaci elhelyezése sem.

Az energetikai hasznosítás (elégetés) mind környezetvédelmi, mind gazdasági szempontból fontos lehetőség marad. A módszernek számos előnye is van: eltünteti a káros szennyeződések, jelentősen (több mint 90%-kal) csökkenti a hulladék tömegét és térfogatát, energiát termel és megszünteti pl. az orvosi hulladékok eredeti fertőzőképességét. A legtöbb műanyag fűtőértéke vetekszik az olyan jó minőségű tüzelőanyagokéval, mint a benzin (44–47 MJ/kg). A hulladékok elégetésére többféle kemencetípust használnak (forgó csökemence, mozgó rostélyos kemence, fluid ágyas kemence), és a keletkező hő villamos energiává alakítására is megvannak a megfelelő módszerek.

Mivel a műanyag hulladék elhelyezése lerakókban – különösen a sűrűn lakott ipari államokban – egyre kevésbé lehetséges, eltüntetésére csak elégetés

vagy újrahasznosítás révén oldható meg. *Mindkét eljárásnak vannak hívei, védelmezői, fejlesztői – és heves ellenzői.* A következőkben mindkét táborból mutatunk be példát. Egy kutatócsoport az USA-ban laboratóriumi kísérletekkel keresi a műanyagok elégetésének környezetre legkevésbé káros módját, egy argentinai kutatócsoport viszont a divatos energiamérlegek alapján véli azt, hogy a valódi megoldást a visszaforgatás jelenti.

A műanyag hulladék elégetése energia-visszanyeréssel

A hulladékégetők telepítése ellen a lakosság gyakran tiltakozik, mert fél a környezetbe kerülő káros anyagoktól. Az elégetés körülményeitől függően a műanyagok égése valóban nem mindig tekinthető teljesnek. Ahhoz, hogy az égés tökéletes legyen, igen gondosan kell ellenőrizni a tüzelőanyag- és levegőadagolást, a hőmérsékletet, a tartózkodási időt. *Arra kell törekedni, hogy minél hatékonyabban égessék el a szemetet, és közben minimalizálják a tökéletlen égésből származó káros anyagokat* (PIC, products of incomplete combustions). Az utóbbi években számos tanulmány foglalkozott a műanyagok pirolízisével és elégetésével. A káros égéstermékek közé tartoznak a szén-monoxid, a koromszemcsék, az el nem égett szénhidrogének, pl. a policiklusos (polikondenzált) aromás szénhidrogének (PAH).

Egy korábbi vizsgálatsorozatban a műanyag hulladék nagy részét alkotó polietilén (PE), polisztirol (PS) és poli(vinilklorid) (PVC) égését vizsgálták kétlépcsős, álló ágyas kemencében. A primer égetőmű tulajdonképpen a műanyag pirolízisére szolgált, majd a keletkezett illékony molekulákat egy Venturi csőben levegővel összekeverve égették el (utóégetés). A primer és a szekunder égetés körülményeit vizsgálva arra a következtetésre jutottak, hogy a káros égéstermékek kibocsátásában fontos szerepe van az első lépés (pirolízis) körülményeinek (elsősorban a hőmérsékletnek), és hogy a másodlagos égetés bizonyos komponenseket hatékonyan távolít el, másokat viszont nem – ez az utóégetés körülményeinek a függvénye. Az oxigéntartalom növelése az utóégetéskor és a részecskék primer égetés utáni kiszűrése ugyancsak csökkenti a káros égéstermékek kibocsátását a környezetbe.

Egy újabb vizsgálatsorozatban az utóégetés utáni szűrés hatásait tanulmányozták, ill. olyan körülmények kidolgozását tűzték ki célul, amelyek hatására valamennyi káros égéstermék emissziója csökken. A szűrés visszatartó hatására a részecskék várhatóan hosszabb ideig tartózkodnak az utóégető tűzterében, és így nagyobb mértékben tudnak oxidálódni. A PAH emisszió csökkenése is várható részben a kondenzált aromás vegyületek alacsonyabb forráspontja, részben a szemcséken bekövetkező adszorpciójuk és kondenzációjuk miatt. A vizsgálatokat kinetikai modellvizsgálatok egészítették ki. Külön figyelmet fordítottak a kevert műanyagok esetleges PVC-tartalmának halogén-emissziójára.

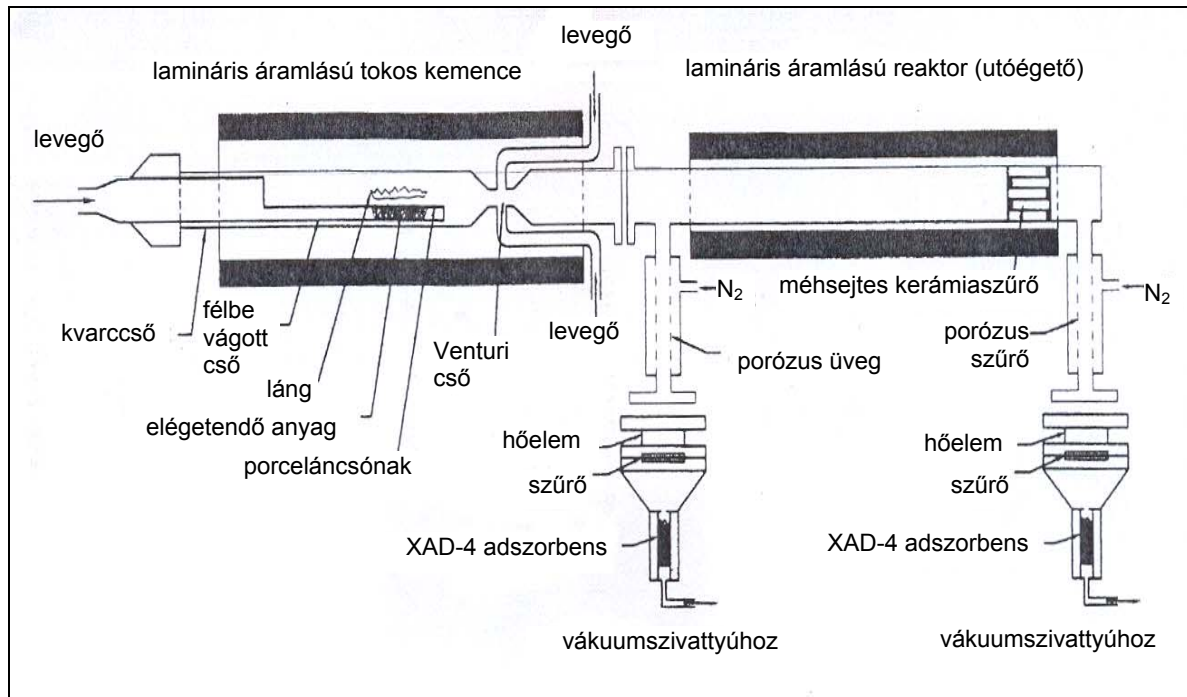
Az égetési kísérletekben felhasznált polimerek összetétele
és tulajdonságai

Tulajdonság	Egység	PS	PE	PVC
Fixált (maradó) szén	%	1	0	9
Illékony szén	%	99	100	91
Hamu	%	0	0	1
C-tartalom	%	92	86	38
H-tartalom	%	8	14	5
S-tartalom	%	0,04	0	0
Cl-tartalom	%	0	0	57
N-tartalom	%	0	0	0
O-tartalom	%	0	0	0
Fűtőérték	MJ/kg	44,5	40,5	19,2

A felhasznált anyagok, kísérleti eszközök és vizsgálati módszerek

Alapanyagként tiszta polisztirol (PS), PVC és PE-LD granulátumot használtak, amelyek összetételét és fűtőértékét az 1. táblázat foglalja össze. Az égetési kísérleteket egy 1 kW-os, megosztott égésterű villamos tokos kemencében végezték, amelynek belsejében egy 4 cm átmérőjű, 87 cm hosszú kvarccső helyezkedett el (2. ábra). A primer kemence égéstermékeit egy másik tokos kemencébe vezették, amelyben 38 cm hosszú, 2 cm átmérőjű kvarccső volt, itt végezték az utóégetést. Amikor a csőkemence elérte a beállított hőmérsékletet, porceláncsónakban 0,25–1,25 g granulátumot juttattak az első csőkemence közepére (a cső első fele előmelegítőként szolgált). A levegő áramlási sebessége 4 l/min volt. Ahogy a minták (a legtöbb esetben) elgőzölögtek, diffúziós láng alakult ki a csónak felett. A két kemence között további 2 ml/min levegőáramot vezettek a rendszerbe. A keveredés elősegítésére az első kemence kilépő nyílásához egy Venturi-keverőt helyeztek el. A beáramló további levegőt a kemencefalnál 100 °C-kal alacsonyabb hőmérsékletre melegítették elő. Modellszámítások megerősítették, hogy az adott konfigurációban a primer gázáram és a további levegő jól keveredett egymással. Az első kemence falát 600 vagy 900 °C-ra fűtötték fel, a második kemence falát állandóan 1000 °C-on tartották. Láng hiányában a mért gázhőmérsékletek meglehetősen állandónak bizonyultak, mintegy 25 °C-kal voltak alacsonyabbak a falhőmérsékletnél. A két kemence közötti szakaszon a gázhőmérséklet 250–300 °C-ra csökkent. Az első kemence után a gázáram fele egy mintavevőbe került, a másik fele továbbment az utóégető kemencébe. A szekunder kemence kiemeneténél egy méhsejtes szerkezetű SiC kerámiaszűrőt helyeztek a kvarc-

csőbe. A szűrő nem tartalmazott katalizátort. Az ilyen típusú szűrők a korábbiakban igen hatékony részecske-visszatartónak bizonyultak (97% hatásfok a μm alatti koromrészecskék kiszűrésében). A dízelkorom szemcséi nagyon finomak (mintegy 30 nm átmérőjűek), míg az agglomerált koromszemcsék aerodinamikai effektív átmérője 1 μm körül van. A SiC szűrők akár 2000 °C-ot is elviselnek, de itt erre nincs szükség, mert a koromrészecskék már 600 °C-on elégnak. A gyártó adatai szerint a szűrők vegyileg nem érzékenyek sem a korom, sem az esetlegesen képződő illékonyabb fémek (pl. Zn) jelenlétére – ennek ellenére a mérések között ellenáramú impulzussal tisztították a szűrőket.



2. ábra A kétlépcsős, lamináris áramlású reaktor vázlatos felépítése az utóégető kimeneténél elhelyezett SiC szűrővel

A policiklusos aromás vegyületek (PAH), a CO, a CO₂, a szemcsés és kondenzálódó anyagok (oligomerek, kátrány) mennyiségét mindkét kemence-kimenetnél csapdázás után mérték, külön a gázban és a kondenzált frakcióban. A mintavételre mindkét kemence után a kijövő áramok felét használták fel. A mintavétel előtt a kijövő gázokat 2 l/min áramlási sebességű nitrogénnel keverték. Ezután jött egy szűrő, majd egy Supelco XAD-4 adszorbens, amely a gázfázisú PAH molekulákat kötötte meg. A szemcsés anyagokat Fischer típusú papírszűrőn fogták meg, amelynek névleges pórusátmérője 0,45 μm volt. A szemcsés anyagok mennyiségét gravimetriásan határozták meg. A gázmin-ták szénhidrogén-tartalmát gázkromatográfval analizálták. A CO/CO₂-tartalmat szárítás után infravörös detektorral, az O₂-tartalmat paramágneses detektorral

mérték. A gázanalizátorok jeleit folyamatosan követték, és parciális nyomás értékekké alakították át, majd integrálással kapták a tömegértékeket. A PAH komponenseket nagy (kb. 3,5 MPa) nyomás alatt metilén-kloriddal extrahálták. Az extraktumot vákuum alatt töményítették be, majd géppermeációs kromatográffal és tömegspektrométerrel (GC-MS módszerrel) vizsgálták (EPA 8270A módszer, SW846 analitikai módszer, korlátozottan illékony anyagokra beállított eljárás).

A vizsgált műanyagokkal kapott eredmények

A PS, PE és PVC mintákból 0,25 és 0,5 g-os mennyiségeket égettek el, de a PVC-ből 1,25 g-os mintákat is vizsgáltak, mert így volt (a klórtól eltekintve) azonos mennyiségű szén és hidrogén a 0,5 g-os PS és az 1,25 g-os PVC mintákban. Két PS-PVC keveréket is elégettek; az egyikben 0,375 g PS és 0,125 g PVC (75–25% teljes tömegre számítva), a másikban 0,375 g PS és 0,3 g PVC volt (75–25% az égethető anyagra nézve, vagyis a klór kizárásával). Az adott körülmények között a pirolizátumok meggyulladtak, láng jelent meg a minta felett. A fő termékek (CO, CO₂) időben két csúcsot mutattak, ami szekvenciális bomlásra és oxidációra utal (különösen a PS és a PVC esetében). Az égés időtartama 1–2 perc volt, és az időtartam nőtt a minta tömegével. 900 °C-on rövidebb volt az égési idő, mint 600 °C-on, kivéve a PVC mintát. Ezt azzal magyarázható, hogy az égés kezdeti szakaszában a klór nagy mennyiségben van jelen az égésgázokban, és inhibitorként hat. Az elégetett anyag mennyiségéből és az égés időtartamából (a fogyott oxigénből) ki lehetett számítani az ún. *globális ekvivalenciahányadot* (φ), amely azt jelzi, hogy az égés során az égethető anyag sztöchiometriai értelemben túl kevés ($\varphi < 1$) vagy feleslegben ($\varphi > 1$) van. Az égés adatai a 2. táblázatban láthatók. Néhány kivételtől eltekintve a levegőfelesleg érvényesült. Ennek ellenére a kimenetnél mért minimális oxigénkoncentrációk (7–20%) elég nagyok voltak, ami azonban a Venturi-keverőben hozzáadott többletlevégőnek tulajdonítható. Az oxigén parciális nyomása csökkent a második kemence kimeneténél az elsőhöz képest, ami arra utal, hogy az utóégetés hatékony volt. Az oxigén parciális nyomáskülönbsége annál nagyobb volt a két kemence között, minél több polimert égettek, vagyis az első kemencében egyre több el nem égett illékony termék képződött, ami csak a második lépésben tudott oxidálódni. Mivel a PVC tömegének több mint a fele éghetetlen klór, az oxigén parciális nyomása a kimenetnél jóval nagyobb volt, mint a többi polimer esetében. Érdekes módon az általános égetési hatások jobbak voltak 600 °C-os primer kemencével, mint 900 °C hőmérsékletével.

A CO-emisszió a PE>PS>PVC sorrendben változott. Ez a PE égési mechanizmusával van kapcsolatban, azzal, hogy lökészerűen bocsátja ki magából a szerves anyagokat, amelyek nem tudnak teljesen elégni. Ezzel magyarázható az is, hogy a 600 °C-os primer kemence-hőmérséklet kedvezőbb az

oxidációs hatásokra nézve, hiszen ilyenkor lassabban fejlődnek az illékony szerves anyagok, és lokálisan sem alakul ki tüzelőanyag-felesleg. Illékony szénhidrogének is legnagyobb mennyiségben a PE-ből keletkeznek, de ezek mennyisége jelentősen csökken az utóégetés hatására a második kemence után.

2. táblázat

Az égetési kísérletekben észlelt égési idők és az átlagos globális ekvivalenciahányadosok (φ , magyarázatot lásd a szövegben)

Tömeg	Hőmérséklet	PS		PE		PVC		Keverék	
	°C	égési idő, s	φ	égési idő, s	φ	égési idő s	φ	égési idő, s	φ
0,25 g	900	61	0,68	60	0,77	67	0,26		
	600	74	0,56	111	0,41	55	0,31		
0,5 g	900	63	1,31	67	1,37	65	0,53		
	600	87	0,95	127	0,72	56	0,61		
1,25 g	900					82	1,05		
	600					110	0,78		
0,375 g PS +0,125 g PVC	900							90	0,72
	600							82	0,79
0,375 g PS +0,3 g PVC	900							86	1,01
	600							118	0,74

A policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) és a szemcsés frakció mennyiségének csökkentése

A PAH komponensek többsége nem mutagén, de karcinogén (rákkeltő) hatást mutat, közülük azonban némelyek egysejtű szervezetekben mutációt is okoznak. A legtöbb PAH a PS égésekor figyelhető meg, kevesebb ilyen égéstermék képződik a PE és legkevesebb a PVC elégetésekor. A PAH mennyisége általában emelkedett, ha nőtt a primer kemence hőmérséklete. A PE-ből és a PVC-ből a legnagyobb arányban naftalin képződik, a PS égéstermékeiben a fenantrén is jelentős arányban mutatható ki. Ez azzal lehet összefüggésben, hogy PS-ből nagyobb mennyiségű fenacetilén képződik, amely a fenantrén prekursora. Az utóégetés és a szűrő csökkentette a PAH-kibocsátást – legalábbis 600 °C-os primer kemence-hőmérsékleten. 900 °C-nál jóval kevésbé meggyőzőek az adatok.

A kiszűrt szemcsék anyaga korom, vagyis szén volt, jelentős mennyiségű extrahálható PAH-tartalommal. A korom és a PAH-képződés mértéke a poli-

merfajára jellemző, vagyis a PS-ből képződik a legtöbb korom. A PS-ből képződő korom agglomerátumokat képez, de finom szemcsés. A szemcsék harmada $2\ \mu\text{m}$ átmérőjű vagy kisebb, az elemi szemcsék átmérője $0,05\text{--}2\ \mu\text{m}$. A PE-ből finomabb szemcsék képződnek, a részecskék háromnegyede $<2\ \mu\text{m}$, az elemi szemcsék mérete tipikusan $0,1\text{--}0,2\ \mu\text{m}$. A PVC-ből képződött a legkevesebb szilárd részecske, elég széles méreteloszlással. A részecskék kevesebb mint egyharmada $<2\ \mu\text{m}$. A CO és a PAH mennyiségéhez hasonlóan a részecskéké is nőtt, ha növelték a primer kemence hőmérsékletét. Az utóégetés és a szűrő együttes alkalmazása erőteljesen csökkenti a részecskeemissziót, különösen akkor, ha az első kemence $600\ \text{°C}$ -os. A koromképződés és az oxidáció kinetikája nagyon bonyolult, nem lehet egy paraméterrel leírni, de leginkább a pirolízis során fellépő hőmérséklet időbeli alakulása befolyásolja. A diffúziós lángokban korábbi megfigyelések szerint annál több korom képződik, minél magasabb a láng hőmérséklete. Az égetett anyag szerkezete nagy hatással van a gyűrűs vegyületek képződési hajlamára, a részecskekoncentráció pedig az összes korom mennyiségével arányos.

Az alkalmazott szűrő ilyen körülmények között öntisztító jellegű, mert a lerakódó korom elég benne, az esetleges hamutól pedig ellenáramú öblítéssel meg lehet szabadulni. A szűrés hatékonysága a 3. táblázatból becsülhető meg, amely a káros égéstermékek emisszióhányadosait mutatja a szűrővel felszerelt utóégető (2') és az első kemence kimenete (1), ill. a szűrővel felszerelt utóégető (2') és a szűrő nélküli utóégető (2) között. A táblázat adatait úgy vették fel, hogy a primer kemence $600\ \text{°C}$ -on vagy $900\ \text{°C}$ -on, az utóégető kemence $1000\ \text{°C}$ -on működött. A szűrő hatékonysága elsősorban annak köszönhető, hogy megnöveli a PAH és a koromszemcsék tartózkodási idejét a második kemencében.

Az elégetett anyag mennyiségének csökkentése nem csökkentette arányosan a károsanyag-kibocsátást, mert az átlagos oxigén/tüzelőanyag arány ugyan javult, de a lokális nem mindig, vagy nem arányosan. A CO-fejlődés erőteljesen mérséklődött, a koromkibocsátás legtöbb esetben ugyancsak csökkent, ha csökkentették az égetett anyag mennyiségét, de a PAH-kibocsátásra ez számos esetben nem volt hatással. Érdekes, de nem egészen váratlan módon a PVC PAH-kibocsátása volt viszonylag a legkisebb – annak ellenére, hogy a klór hidrogénelvonó jellege miatt több kondenzált aromás vegyület képződése volna várható. Itt azonban nem egyszerűen pirolízisről, hanem égésről van szó, és az égés első fázisában keletkező klór gyökfogó hatása miatt gátolja az égést. A PS és a PVC keverése valamelyest csökkentette az égéstermékek mennyiségét a tiszta PS-éhez képest.

Az égés és bomlás jellege miatt a PAH és a koromképződés nem kerülhető el teljes mértékben, de a további levegő hozzáadásával végzett utóégetés jelentősen csökkentheti mennyiségüket, különösen ha még szűrőt is alkalmaznak. Az elégetés tehát – legalábbis elvben – alkalmazható a műanyag-hulladékok környezetbarát ártalmatlanítására. Ahhoz azonban, hogy az égetés

körülményeit jól állítsák be, ismerni kell a különböző paraméterek hatását, a bejövő keverék összetételétől a hőmérsékleten keresztül a hozzáadott levegő mennyiségéig. Mivel az utóégetőben mindig jelentős mennyiségű oxigén megmarad, a tartózkodási idő növelése szükségképpen javítja az oxidáció hatásfokát. Tekintettel arra, hogy az utóégető vége felé már szinte egyáltalán nem fordulnak elő monomerek és oligomerek, amelyek a PAH és a koromképződés elővegyületei (prekurzorai) lehetnének, biztos, hogy hosszabb tartózkodási idő esetén az oxidáció dominál a más vegyi reakciókkal szemben. A modellszámításokhoz szükséges kinetikai adatokból sokhoz hozzá lehet férni. Az eredeti 0,7 s-os tartózkodási időtől egészen 20 s-ig szimulálták a PAH komponensek, ill. a korom képződését és eltűnését PE tüzelőanyag esetében. Azt kapták, hogy a PAH és a korommennyiség ugyan folyamatosan csökken, de még 5–10 s tartózkodási idő után sem tűnik el teljesen.

3. táblázat

A káros égéstermékek emissziójának csökkenése az utóégetőben elhelyezett kerámiaszűrő hatására. [A 2'/1 értékek a szűrővel ellátott második kemence és az első (primer égető) kemence kimeneténél mért emissziók hányadosát, a 2'/2 értékek pedig a kerámiaszűrővel ellátott és anélküli kétlépcsős kemencék emissziójának hányadosait jelölik.]

Anyag	PS				PE				PVC			
	600		900		600		900		600		900	
Hőmérséklet, °C	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2
Emisszió	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2	2'/1	2'/2
CO	0,84	0,31	5,12	1,19	0,66	0,26	2,27	2,26	0,00	0,00	0,10	0,44
CO ₂	1,77	1,09	2,18	1,55	1,42	1,22	1,74	1,58	4,57	1,90	1,52	1,89
Részecske	0,01	0,08	0,20	0,26	0,00	0,00	1,58	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Teljes PAH	0,40	0,76	0,43	0,47	0,46	0,54	1,57	0,43	0,63	0,65	0,83	1,08
Naftalin	0,91	0,98	0,70	0,50	0,72	0,58	1,07	0,50	0,91	0,68	1,01	0,98
Bifenil	0,04	0,27	0,10	0,31	0,08	0,25	0,94	0,32	0,04	0,34	0,16	0,67
Acenaftilén	0,06	0,09	0,98	0,21	0,04	0,21	2,15	0,28	0,19	0,12	0,22	0,76
Fluorén	0,00	0,04	0,05	0,26	0,02	0,07	1,61	0,26	0,00	0,04	0,05	0,05
Fenantrén	0,02	0,27	0,28	0,79	0,05	0,21	2,69	0,50	0,03	0,20	0,07	0,50
Antracén	0,00	0,07	0,23	0,56	0,01	0,07	1,66	0,36	0,00	0,04	0,00	0,00
Fluorantrén	0,02	0,14	1,63	0,61	0,02	0,07	4,80	0,57	0,02	0,02	0,03	0,41
Ciklopenta[cd]pirén	0,00	0,05	5,06	0,94	0,01	0,03	12,48	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Benzo[a]pirén	0,01	1,00	1,52	0,44	0,04	0,19	5,93	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00

A műanyag hulladék elégetésének és újrafeldolgozásának energiamérlege

A gazdaságossági elemzésben legjobban a visszaforgatás, a gyártás és az elégetés energetikai hatásait lehet felhasználni. Ez azért is jó, mert ezzel az elemzés függetlenné válik a mindenkori áráktól.

A következő elemzésben a lerakást nem vették figyelembe, bár az is energiaigényes a szállítás, a talajkezelés, a fenntartás és a monitorozás miatt. Az analízishez a következő mennyiségeket használták: E_{pi} az az energia-mennyiség, amely 1 tonna „i” műanyag megtermeléséhez szükséges, E_{ri} az „i” műanyag 1 tonnájának visszaforgatásához szükséges energia, E_{ii} pedig az az energia, amely 1 tonna „i” műanyag elégetésekor képződik. *1 tonna visszaforgatott műanyag felhasználásakor a nettó energianyereség:*

$$\Delta E_i = (E_{ri}) - (E_{pi})$$

amelyet százalékosan az 1 tonna műanyag előállításához szükséges energiával lehet összevetni:

$$\%RP = \frac{\Delta E_i}{E_p} 100$$

Az elégetés és a visszaforgatás összevetésekor figyelembe kell venni, hogy elégetés után ahhoz, hogy újra 1 tonna anyagot kapjanak, ismét elő kell állítani 1 tonna új műanyagot. A *nettó energianyereség* az alábbi képlet szerint számolható ki:

$$BE_i = E_{ri} - \sum E_{i-p} = E_{ri} - (E_{ii} + E_{pi}) = \Delta E_i - E_{ii},$$

ahol E_{i-p} az elégetés során nyert és az 1 tonna friss műanyag előállítása során befektetett energia különbségét jelöli. Az E_{ii} számítása során az égéshőből levonnak 10000 kJ/kg értéket, amivel azt veszik figyelembe, hogy a szilárd városi hulladékból ki is kell nyerni a műanyagot, mielőtt elégetik. Itt a mosás energiaszükségletét nem veszik figyelembe, mert annak égetés esetén nincs értelme. Az ilyen feltételezések mellett számított értékeket a *4. táblázat* tartalmazza. Az első három sorban a tiszta műanyagokra vonatkozó értékek találhatóak. A tiszta PET előállításakor és újrafeldolgozásakor felhasznált energia valamivel nagyobb, mint a poliolefineknél, de a nettó energiamegtakarítás hasonló. A relatív értékeket figyelembe véve a viszonylagos energiamegtakarítás poliolefineknél kb. 70%, PET-nél kb. 50%. Ha ezt az energianyereséget vetik össze az égetés során kapható energiával, nyilvánvaló, hogy a tiszta polimerek újrafeldolgozása mindig kedvezőbb az égetésnél. A táblázat utolsó sorá-

ban a kevert műanyagokra vonatkozó értékek láthatók, de itt már több megfontolást kell tenni a számítás során.

4. táblázat

A műanyagok égetése ill. visszaforgatása viszonylagos előnyeinek számításához használt energetikai adatok. (10^6 kJ/t egységben).
(A jelöléseket lásd a szövegben.)

Műanyag	E_p	E_r	ΔE	$(\Delta E / E_p)\%$	E_i	BE
PET	-107,15	-46,07	61,08	57	12,7	48,38
PE	-79,76	-19,94	59,82	75	36,3	23,52
PP	-76,42	-19,87	56,55	74	36,5	20,05
Műanyag-keverék	-85,64	-11,68	73,96	86	25,4	48,57

- A kevert műanyag előállításának energiaigénye (E_{pm}) kiszámítható az egyes műanyagokra vonatkozó adatokból és tömegtörtekből:

$$E_{pm} = \sum_i x_i E_{pi}$$

ahol X_i jelöli az „i”-edig komponens tömegtörtjét. Az összetételt illetően az 1. ábra adatai mérvadók. Mivel az „egyéb” kategóriába csak 1% műanyag tartozik, nem okoz nagy hibát, ha erre valamilyen átlagértéket használnak fel; ebben az esetben az E_{pm} értéke 85640 kJ/kg.

- A visszaforgatás és az elégetés energiamérlegének számításakor már több tényezőt kell figyelembe venni; ilyen a hulladék begyűjtése, tárolása és a műanyagnak a többi hulladéktól való elválasztása. Ezek energiaigényére kb. 6000 kJ/kg adódott.
- A kevert műanyagok égési energiája (E_{im}) egyszerűen kiszámítható az egyes műanyag típusok égéshőjéből és a móltörtekből:

$$E_{im} = \sum_i \Delta H_i y_i$$

ahol ΔH_i az égéshő, y_i a móltört. A móltörtek az 1. ábra összetételadataiból és az átlagos molekulatömegekből számíthatók. A számított értékeket az 5. táblázat tartalmazza. Az E_{im} értékre 25394 kJ/kg adódott.

- A kevert műanyagok visszaforgatásának energiaigénye (E_{rm}) számításakor a már említetteken túl figyelembe kell venni a mosást, a szárítást, az őrlést, a megömlesztést, a kompatibilizálást és a granulálást. Az itt nem részletezett megfontolások alapján kapott értékeket a 6. tábl-

lázat foglalja össze, amelyből az E_{mr} értékre 11676 kJ/kg adódik. A visszaforgatás során fellépő energiamegtakarítás az új anyag előállításához képest:

$$\Delta E = E_{mv} - E_{mr} = 73964 \text{ kJ / kg ,}$$

ami az eredeti anyag előállításához képest 86%-os megtakarítást jelent, míg a visszaforgatás előnye az égetéshez képest:

$$BE_m = \Delta E_m - E_{im} = 48570 \text{ kJ / kg}$$

Ezek az értékek szerepelnek a 4. táblázat utolsó sorában.

5. táblázat

A kevert műanyag hulladékot alkotó különféle műanyagok adatai

Műanyag	Molekulatömeg, kJ/mol	Móltört	Égéshő, kJ/kg
PE-HD	180 900	0,15	46 300
PVC	90 000	0,18	17 500
PP	250 000	0,07	46 500
PET	62 000	0,12	22 700
PS	165 000	0,10	41 700
PE-LD	173 000	0,37	46 300
Egyebek	153 500	0,01	36 800

6. táblázat

A kevert műanyag hulladék visszaforgatási lépéseinek energiaigénye

Folyamat	Felhasznált energia, kJ/kg
Mosás és szárítás	540
Porítás	130
Kompatibilizálás	1 400
Keverés	3 000
Granulálás	606
Összesen	5 632
A folyamat kezdeti szakasza	6 000
Mindösszesen	11 632

A számításokból kiderül, hogy *a kevert anyagok újrafeldolgozása olcsóbb, mint a tiszta anyagoké, mert nem jelentkezik a válogatás költsége*, ami munkaigényes lépés. Ez a megtakarítás javítja az újraelőállításához képest mért százalékos nyereséget. *Energia szempontjából tehát a kevert műanyagok feldolgozása a legkedvezőbb.*

A számítások is azt mutatják, hogy a műanyagok elégetése csak akkor kedvezőbb a visszaforgatásnál, ha a műanyagok a többi hulladéktól vagy a szennyezőktől való elkülönítése aránytalanul nehéz és drága, egyébként a visszaforgatás mellett célszerű dönteni.

Dr. Bánhegyi György

Wang, Z.; Richter, H. stb.: Laboratory investigation of the products of the incomplete combustion of waste plastics and techniques for their minimization. = *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 43. k. 12. sz. 2004. jún. 9. p. 2873–2886.

Eulálio, A. C.; Capiati, N. J.; Barbosa, S. E.: Municipal plastic waste: Alternatives for recycling with profit. = *SPE Plastics Environmental Division*, www.spercycling.org/PDF%20Files/-0805.PDF

Röviden...

Nanotöltőanyagot tartalmazó új műanyag

A **PolyOne Corp** a **Nanocor** céggel, a nanoméretű agyagrészecskék gyártójával közösen kidolgozott egy hatékony módszert az agyaglemezek szétválasztására és elosztatására a mátrixban. A **PolyOne** cég *Nanoblend* nanokoncentrátumának továbbfejlesztett változata a *Maxxam LST*. Ez az anyag könnyű, szívós, általában meghaladja sok hőre lágyuló műszaki műanyag jellemzőit, feldolgozhatósága pedig hasonló a poliolefinééhoz. Kicsi a sűrűsége, vékony falú termékek is gyárthatók belőle, ezért alkalmazásával jelentős anyagmegtakarítás érhető el. Javasolható a magas követelményeket kielégítő termékekhez, valamint azoknak az anyagoknak a helyettesítésére, amelyek nem felelnek meg a szigorú előírásoknak, drágák vagy nehezen feldolgozhatók. További előnye, hogy a szokásoshoz képest kisebb üvegszál-tartalma következtében megjelenése tetszetősebb, nagyobb a vegyi ellenállása és újrafeldolgozható. Jó folyóképessége miatt alacsonyabb hőmérsékleten dolgozható fel, gyorsan lehűl, így a fröccsöntésnél rövidebb a ciklusidő, kisebb az anyagfelhasználás, kevesebb energia szükséges és olcsóbb a berendezés. Tipikus alkalmazási területei a szállítóipar, szerszámgépek, csomagolóanyagok, térhatárolók, konténerek, csövek, vezetékek, fittingek, épületek oromborításai és fogyasztási cikkek. (További információk: www.polyone.com)

(*Plastics Engineering*, 2004. máj. p. 6.)

Új anyagok rotációs öntéshez

Az utóbbi időben több kereskedelmi forgalomba kerülő vagy még kísérleti fázisban levő anyagot kínálnak rotációs öntéshez. Ezek szívósabbak, merevbbek és könnyebben feldolgozhatók, mint az eddig használt anyagok, ezért a játékoktól a nagy tartályokig számos célra alkalmazhatók.

A **Nova Chemicals** két új *Surpass* márkanévű polietilénje különleges fehérségével tűnik ki. Az új kétreaktoros, kioldósos *Advanced Sclairtech* technológiával szintetizálják őket, amihez nem metallocén katalizátort alkalmaznak. Az *EX-RMs539* oktán komonomerrel készített PE-MD típus, amelynek a folyási száma 5,1 g/10 min, sűrűsége 0,939 g/cm³. Az anyag kis viszkozitású, és különlegesen széles a feldolgozási tartománya. Szakítószilárdsága 19,9 MPa, hajlítómódulusa 805 MPa. A szupermerev *EX-RMs244* oktántartalmú PE-HD kopolimer, 1,7 g/10 min folyási számmal, 0,944 g/cm³ sűrűséggel. Alacsony hőmérsékleten is feldolgozható. Rugalmassági modulusa 977 MPa, húzószilárdsága 23 MPa.

Az **Atofina Chemicals** *Rilsan Roto 11* jelzésű poliamid 11 szinterezőpora alkalmas mezőgazdasági szállítóautók, fűnyírók vagy tengeri berendezések üzemanyag-, hűtő- és hidraulikafolyadék-tankjainak rotációs öntésére. Az átetsző tartályban látható a folyadék mindenkori szintje. Tetszőlegesen színezhető.

Jó a hőállósága és könnyen olvad a **Chroma Corp** *AG-9000 NA* jelzésű, ABS-alapú, rotációs öntéshez ajánlott terméke. Természetes színben kapható, folyási száma 6 g/10 min, sűrűsége 1,04 g/cm³, szakítószilárdsága 22 MPa, hajlítómódulusa 760 MPa.

A **Teknor Color** a saját *Tek Tuff CE PE-HD* anyagának továbbfejlesztett változatával jelentkezett. Ez 5–10%-kal olcsóbb, mint a korábbi típus. A jobb feldolgozhatóság mellett fokozottan UI-álló, külső felhasználásra is ajánlott. 3,0 g/10 min a folyási száma, 0,948 g/cm³ a sűrűsége, jók a mechanikai tulajdonságai; húzószilárdsága 20 MPa, nyúlása 460%, rugalmassági modulusa 898 MPa.

A **Jericho Plastics Industries** PE-LLD alapú, 50%-os színezékkoncentrátumokat kínál a rotációs öntéssel feldolgozható polimerek színezésére.

(*Plastics Technology*, 50. k. 5. sz. 2004. p. 51.)

EGYÉB IRODALOM

Große PE-Folienhersteller noch größer. Neue Studie zeigt Veränderungen unter den Top 50 der europäischen Produzenten. (A nagy fóliagyártók még nagyobbak lesznek. Egy tanulmány bemutatja az első 50 európai fóliagyártón belül várható változásokat.) = K-Zeitung, 2004. 16. sz. aug. 19. p. 2.

Grazban landolt a „földönkívüliek” űrhajója

A patinás osztrák várost Grazot – akár egy tudományos fantasztikus filmben – „elfoglalták a földönkívüliek”. A Mura folyó partján felépült látványos *Modern és Kortárs Művészetek Múzeuma* a „Barátságos Idegen” nevet kapta. Jellegzetessége a plexiüvegből, PMMA-ból készített külső héj. Az Európa-szerte meghirdetett pályázaton 102 jelentkező közül egyhangú döntéssel az angol Peter Cook és Colin Fournier nyert. Az egyik tervező szerint sokan gondolkodnak hajlított, szerves épületekben, de kevesen építenek ilyeneket. Számítógépes tervezéssel (CAD eljárással) a legkülönbözőbb alakzatok tervezhetők minden egyes plexilemezből. A 4800 m²-es héjszerkezethez több mint 1300 db 20 mm vastag lapot (Gyártja: **Röhm und Haas**, formázta: **Zeiler**, Radstadt) használtak fel.

Könnyűsége, átlátszósága, könnyű alakíthatósága és szerelhetősége miatt esett a választás a poli(metil-metakrilát) lemezre. A Röhm cég hangsúlyozta anyaguk kivételes szennytaszító képességét, amelynek kellő tisztításához általában elegendő az esőzés. Ez különösképpen fontos olyan szerkezeteknél, amelyek nehezen hozzáférhetők.

A külső kék burkolat alá 930 neoncsövet szereltek, így a héjszerkezet hatalmas filmvászonként borul az épület fölé, amelyre kis felbontású képeket és szövegeket lehet vetíteni. (*További információ: www.plexiglas.de*)

(Plastics Engineering EUROPE, 2. k. 2. sz. 2004. jún. p. 4.)

Többfunkciós nyomásmérő a műanyagipar számára

A német **Leitenberger** cég *DS 200* jelű multifunkcionális manométere kimenetként választhatóan a nyomással arányos feszültséget vagy áramjelet generál, relatív pontossága $\pm 9,25\%$ az IEC 60770 szerint. Használható elektronikus nyomáskapcsolóként is, amelyhez két PNP kapcsolókimenet áll rendelkezésre (maximális kapcsolóáram 125 mA). A programozás két fóliás nyomógomb segítségével végezhető. A működés egy PC Windows-ablakban megjelenő programmal szimulálható. Ha digitális manométerként üzemeltetik, négy digitális LED kijelzést tesz lehetővé.

(KunstStoffTrends, 2003. 3. sz. szept. p. 31.)

Parányi szivattyú műanyagból

Egy mainzi mikrotechnológiai vállalat, a **thinXXS** XXS2000 jelű mikro-szivattyúja nem nagyobb egy 1 eurós pénzéremnél. A 3 g tömegű berendezés alkatrészeit a **Ticona cég** Topas COC cikloolefin kopolimerjéből gyártják. A szivattyút több mint százmilliószor nyitó-záró COC rugó átmérője nem nagyobb egy emberi hajszálénál. A mini piezodiafragma-szivattyú a legkisebb mennyiségű gáz vagy folyadék szállítására képes. Elsősorban a diagnosztikában, a környezetvédelmi analitikában vagy a mobil szerkezetek energiacelláiban alkalmazzák. A kiválasztott polimert erősen agresszív vegyi anyagok sem károsítják. A COC jól hegeszthető, sterilizálható, kellő rugalmassággal rendelkezik és egyenletesen bevonható.

A **thinXXS** egy másik újdonsága a folyadék-mikroáramok kezelésére alkalmas eszközkészlet, amely több mikroalkatrészt tartalmaz: csöveket, keverőket, reakciókamrákat vagy lepárló oszlopokat. Ha a szükséges eszközöket összerakták egy adott feladat elvégzésére, az egész egység elhelyezhető egy COC műanyag csipben. *(További információk: www.ticona-eu.com)*

(Plastics Engineering EUROPE, 2. k. 2. sz. 2004. jún. p. 8.)

MŰANYAG ÉS GUMI

a Gépipari Tudományos Egyesület,
a Magyar Kémikusok Egyesülete
és a magyar műanyag- és gumiiipari vállalatok
havi műszaki folyóirata

A 2004. októberi tartalmából:

K 2004: jövőkép – innováció – üzlet II.

Polimerek az optikai távközlésben II.
Aktív komponensek

Bazaltszál-erősítésű fröccsöntött poliamid
zsugorodásának vizsgálata

Rétegek közötti szilárdság vizsgálata

Tervezési ajánlás csőszerű műanyag elemek bepattanó kötésére

Szerkesztőség: 1371 Budapest, Pf. 433.
Telefon: (36-1) 201-7819, 201-2011/1451
Telefax: (36-1) 202-0252