

Új utakon: termolitikus hulladékhasznosítás az iparban

Németh Zsolt¹

Bevezetés

Az emberiség által termelt hulladék mennyisége mára elérte a napi kb. 4 millió tonnát (HOORNWEG–BHADA-TATA 2012). Ennek a hatalmas mennyiségnek sajnos csak rendkívül kis részét hasznosítjuk újra nyersanyagként, így a maradék kikerülve a gazdasági körforgásból, legtöbbször a természeti környezetet szennyezi. Jó példa erre a műanyag-hulladék, amelyből becslések szerint évente mintegy 8-10 millió tonnányi jut a tengerekbe (LE GUERN 2019). A környezet mind nagyobb hulladékterhelése beláthatatlan ökológiai folyamatokat indított el bolygónkon. Még a biológiailag nem bontható hulladékokban, például a gumiban vagy más polimerekben is található szerves és szervetlen komponensek egy része is kioldódik a változó kémiai környezet (például a talaj, az állatok emésztőrendszere stb.), a fotodegradáció hatására és más fizikai-kémiai behatásokra, részecskéik pedig a levegővel messzire szállva bejutnak légutainkba, a csapadékvízzel bekerülnek a talajba és a táplálékláncba. Számos faj és a tápláléklánc csúcsán lévő ember is egyre növekvő dózisban van kitéve toxikus hatásoknak, amelyek részben a környezetbe került nehézfémeknek, hormonhatású anyagoknak (például gyógyszermaradványok, műanyag- és gumiadalekok, biszfenolok, ftalátok stb.) vagy más, az evolúció által eddig nem ismert géntoxikus vagy mutagén anyagoknak (például PAH, PCB, DDT, növényvédőszeres stb.) köszönhető.

A civilizáltabb országokban már évtizedek óta észlelhető a törekvés legalább a hulladékok okozta környezeti kár csökkentésére, emellett a közegészségügyi állapotok is megkövetelik a gyűjtést és „ártalmatlanítást”, azonban a gazdasági érdekek, a politika és jog alkotta szövevényes problémahalmazra érdemi megoldást mindeddig nem sikerült megvalósítani. Hazánkban is csak 2012-ben, sokéves készülődés után sikerült megszavazni a CLXXXV sz. „hulladéktörvényt”, amely a hatálybalépése óta eltelt 5 év során 26 alkalommal került módosításra, több mint 360 pontban és hiányosságaiból fakadóan máig sem szabályozza kielégítően a hazai hulladékmenedzsment egészét.

¹ Tudományos főmunkatárs, Nemzeti Közszerológiai Egyetem, Vízstudományi Kar, Fenntartható Fejlődés Tanulmányok Intézet. E-mail: Nemeth.Zsolt@vtki.uni-nke.hu



A szilárd hulladékok kisebb részét képező, ún. kommunális szilárd hulladékok „ártalmatlanításának” eddig főleg két módja nyert teret a civilizált országokban: a deponálás és az égetés. Előbbi egy tömörített állapotban történő lerakást jelent, amelynek során a hulladék anyagai átmenetileg kikerülnek az anyagforgalomból, viszont megőrződnek a jövő számára mint nyersanyagforrás. Utóbbi a hulladékok anyagában tárolt kémiai energia viszonylag rossz hatásfokú kinyerésével és az anyagok fizikai-kémiai szerkezetének megsemmisítésével jelentős térfogatsökkenést, ugyanakkor energetikai hasznosítást valósít meg.

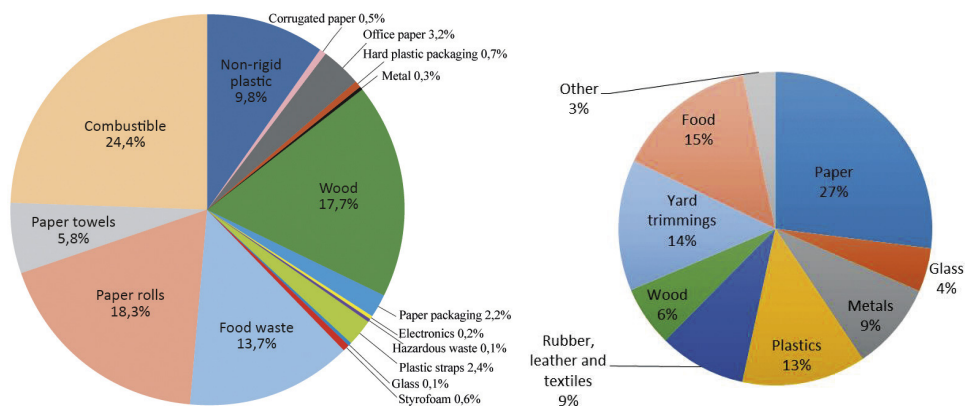
A deponálás, főleg sűrűn lakott területek, például nagyvárosok környezetében helyhiány miatt nem folytatható tetszőleges ideig, emellett számos más probléma forrása. A lerakó a területének vízelvezetését, vízháztartását komolyan megváltoztatja, a keletkezett, rendkívül szennyező csurgalékvizeket folyamatosan és költségesen kezelni kell, valamint a biológiailag bomló komponensek anaerob folyamatai lerakott hulladék m^3 -enként átlagosan 2-3 m^3 metánt termelnek, amelynek tűzveszélyessége mellett rendkívül erős üvegházhatása is van.

Az égetés okozta kb. 90%-os térfogatsökkenés sokszor megoldást jelent a helyproblémára, azonban rengeteg oxigént fogyaszt, széndioxidot és más, többnyire mérgező gázokat termel, amelyek közömbösítése csak rendkívül költségesen megoldható. A hulladékégetők okozta környezeti kár, főleg a légszennyezésből és a szállításból adódó nagy ökológiai lábnyom miatt hatalmas. Mindennek ellenére a prompt energiaigénynek, a helyhiánynak és sokszor a sikeres lobbitevékenységnek köszönhetően az égetés egyre terjed a gazdaságilag fejlettebb országokban, de feltűnnek új technológiák is, mint a plazmatechnológia, illetve az anaerob hőbontás. Ezek már nemcsak energia kinyerését teszik lehetővé a hulladékból, hanem olyan termékekkel tudnak szolgálni, amelyek alapanyagként hasznosíthatók újra az iparban, közelebb lépve a körkörös gazdaság modelljéhez.

Az anaerob hőbontási technológia egyes megvalósításai, több évtizedes fejlesztések után napjainkra kezdi elérni a piacképességet. Ez nemcsak a technológiával szemben támasztott környezetvédelmi követelmények tekintetében szükséges, hanem a gazdaságos üzemelés kritériumainak is meg kell felelni. Egyik sem egyszerű, hiszen a termolitikus hőbontás vagy pirolízis során képződő köztes termékek rengeteg toxikus anyagot tartalmaznak (HALL–WILLIAMS 2006) amelyek semlegesítése komoly technikai kihívást jelent a tervezőknek, illetve az alkalmazott technológiák ára és működési költsége tetemes, a nagy kapacitású hulladékégetők viszonylag alacsony fajlagos költségeivel kell, hogy versenyezzen.

Szerencsére sokéves fejlesztőmunka során néhány csapatnak sikerült áttörni eme kettős „falat”, és olyan technológiát tudtak megvalósítani, amely nem csupán teljesíti a szigorú uniós környezetvédelmi kritériumokat, hanem kis kapacitások, mindössze 10-20 ezer t/év hulladék feldolgozása mellett is gazdaságosan működtethető.

Ez a megoldás egyre vonzóbb mind az ipari-, mezőgazdasági (KALTSCHMITT 2009) üzemek, mind pedig a kommunális hulladéktelepek számára, hiszen minimális szállítási-, kezelési- és raktározási költség mellett teszi lehetővé a hulladék anyagában történő vagy energetikai hasznosítását kisebb települések környezetében is. Míg az átlagos cégektől származó ipari hulladék több mint 90%-a szerves anyag, és mintegy 84%-a újrahasznosítható, a mezőgazdasági hulladék majdnem 100%-a hasznosítható energetikailag, vagy közvetlenül visszaforgatható a mezőgazdaságba (Envir).



1. ábra

15 ipari vállalat hulladékának (bal oldalon) és az USA kommunális hulladékának (jobb oldalon) összetétele

Forrás: Envir; Geoengineer

A kevert anyagok kémiai átalakításának, homogenizálásának kézenfekvő módja az égetés vagy az anaerob termolízis. Ezek általános ismérveit, valamint egy sikeres anaerob technológia vázlatát a következőkben mutatjuk be.

1. Hulladékégetés

Egyszerűen kiszámolható, hogy a szerves anyag teljes oxidálása, vagyis égetése során hatalmas mennyiségű füstgáz keletkezik: minden kg szénből 3,67 kg széndioxid, keverve a +20% légfölösleggel. Ez nagyjából azt jelenti, hogy 1 tonna, kb. 80% szerves anyagot tartalmazó (száraz) hulladék elégetésekor kb. 3,6 tonna légnemű égéstermék szennyezi a légkört, amelynek legnagyobb része üvegházhatású gáz. A primer füstgázokban a jogszabályok által megkövetelt alacsony égési hőmérséklet (800 °C) miatt ráadásul jelentős mennyiségben vannak jelen nagy termikus stabilitású és magas rekombinációs rátájú toxikus komponensek (pl. dioxinok és furánok), amelyeknek nemcsak az eltávolítása, hanem még a mérése is rendkívül költséges, technológiai szempontból sok tekintetben vitatható, ezért összességében is problémás.

Az égetés során keletkező hatalmas mennyiségű füstgáz tisztításának problémáját csak magas beruházással, bonyolult és költségesen üzemeltethető gáztisztító rendszerek helyes üzemeltetésével oldható meg, ami ezen technikai feladat korrekt és hosszú távú kezelését feltételezi. Az égetőművek bekerülési és üzemköltségeinek mintegy 70-80%-át ezért a gáztisztítás teszi ki. A magas üzemköltség alapvetően ellentétben áll az üzemeltető cégek gazdasági érdekeivel, egy bonyolult rendszer üzemeltetésénél pedig mindig előtérbe kerül az ún. emberi tényező is, ezért érthető az égetőművek létesítésével szemben gyakorta tapasztalt lakossági ellenállás.

A hatalmas mennyiségű, rendkívül szennyezett füstgáz tisztításának és az üzem járulékos technológiáinak korrekt üzemeltetése egészséges gazdasági környezetben általában hosszú távon veszteségesse teszi a hulladékégetőket, sokszor még a képződő hő időszakos eladása mellett is. A gőzturbinás rendszer a bemenő, kb. 20-35%-os nedvességtartalmú, 8-13 MJ/kg égéshőjű kommunális hulladékkal fűtve még a legmodernebb, áramtermelésre optimalizált németországi üzemekben sem lépi túl a 21%-os hatásfokot, átlagban pedig 14% alatti (Umweltbundesamt 2006). Az égetés továbbá megszünteti az anyagok újrahasznosításának lehetőségét, valamint csak egy bizonyos kapacitás fölött (évi 60-80 ezer tonna) működtethető még tolerálható veszteséggel, vagyis csak nagyobb hulladékforrások, városok környezetében indokolt. Magyarországon jelenleg csupán Budapest környékére lenne észszerű ilyen égető telepítése, amely jelenleg szerepel is a kormány tervei között HUHA 2. elnevezéssel. Kisebb városokban nem képződik egy égetőhöz elegendő, energetikailag hasznosítható frakció, a hulladék nagyobb távolságról ($d > 30$ km) való odaszállítása pedig irreális költséget és komoly környezeti kárt jelent. Ipari és mezőgazdasági üzemek kis méretükből kifolyólag pedig általában nem is gondolhatnak hulladékégető létesítésére és üzemeltetésére, hiszen a valamelyest gazdaságos üzemhez szükséges évi 70-80 ezer tonnánál jóval kevesebb hulladékot termelnek.

Mindezen problémák igen kívánatosak teszik egy már kis kapacitás mellett is nyereségesen üzemeltethető, jó hatásfokú, környezetbarát technológia kifejlesztését, amely a bekerülő hulladék legalább részbeni, anyagában való újrahasznosítását lehetővé teszi. Ebbe az irányba mutatnak az anaerob hőbontási technológiák.

2. Anaerob hőbontás, elgázosítás, pirolízis

Pirolízisnek vagy anaerob termolízisnek általában a szerves anyag levegőtől legalább részben elzárt térben való hevítését nevezzük. A 20. század első felében kifejlesztett ún. „fa pirolízis” során ugyanis szabályozott levegőbevitel mellett a fából magas hőmérséklet ($T \sim 800-1000$ °C) mellett kilépő gázok – főleg a CO – teljes oxidálása történt CO_2 -vé, majd ennek redukciója a forró faszénrétegben szolgáltatva a motor hajtásához szükséges CO-t. A modernebb pirolízis-verziókban a hevítés a levegő teljes kizárása mellett történik. Ugyan a reakcióterben lévő anyag oxigéntartalmát soha nem lehet kiküszöbölni, ez sztöchiometriailag mégis elenyésző a szerves anyag mennyiségéhez képest, így a termikus degradáció alapvetően nem oxidatív.



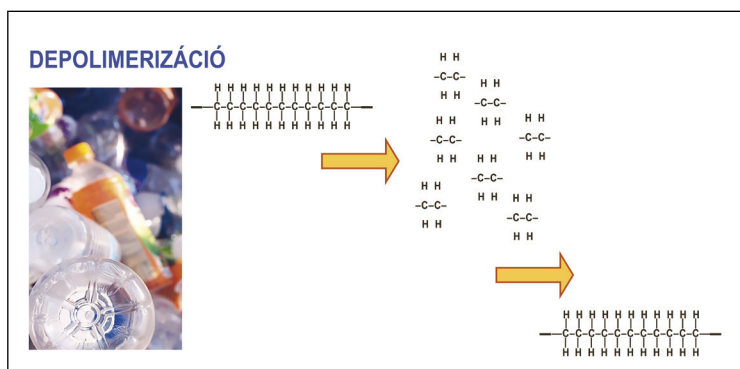
2. ábra

Kínai pirolízisreaktor

Forrás: What energy is used to heat the pyrolysis reactor?

A szerves anyag hevítése a tartályban történik, a keletkezett gázokat és gőzöket a csatlakozó csöveken (kék, zöld) vezetik el.

A pirolitikus eljárások kémiai alapja, hogy a szerves anyag nagy molekuláinak kötései a 200-900 °C hőmérsékleti tartományban felbomlanak, és belőlük oxigén hiányában kisebb molekulák alakulnak ki, amelyek akár szobahőmérsékleten is gáz- vagy folyékony halmazállapotúak lehetnek. Az égetéssel és elgázosítással szembeni fő különbség abban áll, hogy itt némileg alacsonyabb hőmérsékleten, oxigén hiányában történik a hőbomlás, ezért végtermékként nem kizárólag nagy mennyiségű CO, illetve CO₂ képződik. Ha a kiindulási anyag (például fa) jelentős mennyiségű oxigént tartalmaz, akkor a szén oxidált állapotait természetesen nem lehet kizárni a végtermékek közül, azonban mennyiségük az elgázosításnál vagy égetésnél kapott CO, illetve CO₂ mennyiségéhez képest elenyészőnek mondható.



3. ábra

Depolimerizáció

Forrás: a szerző szerkesztése

Az eljárást gyakran nevezik még szárazdesztillációnak, svélezésnek, illetve kigázosításnak is.

Az elgázosítás ezen eljárásnak egy másik, attól kissé eltérő változata, amelynek során a szerves anyaghoz pontosan meghatározott arányban gázképzőt vezetünk (például vízgőzt, levegőt vagy oxigént) olyan mennyiségben, hogy minél több CO és minél kevesebb CO₂ képződjön. A folyamat során az összes szenet igyekszünk gázfázisba vinni, ennek megfelelően csak hamu marad hátra.

Pirolízisnek nevezik ezzel szemben szűkebb értelemben azt a folyamatot, amelynek során gázképző adalék bevezetése nem vagy csak kisebb mértékben történik, így a maradékban is fellelhető a szén nem oxidált formában (pirolíziskoksz).

3. A sikeres anaerob technológiák általános ismérvei

Az utóbbi évtizedben a sikeres és gazdaságosan, mégis környezetbarát módon működtethető megoldásokat általában folyamatos üzemű, több lépéses kémiai technológiák képviselik. Ennek fő okai a következők:

A szakaszos üzemű reaktorok megtöltés utáni külső felfűtése és lehűtése a termikus degradáció során még folyamatos keverés mellett is hatalmas hőmérsékleti grádiensekhez vezet a reaktor belsejében, így jórészt toxikus kémiai termékek igen széles, egymástól a későbbiekben nem vagy csak nagyon nagy ráfordítással és rossz hatásokkal szeparálható spektruma jelentkezik a végtermékekben, ami erősen korlátozza felhasználhatóságukat, és fokozott kockázatot jelent a környezet élővilágára (HALL–WILLIAMS 2006).

Az egy-, két- vagy háromlépéses anaerob technológiák a plazmától eltekintve nem képesek megfelelően szeparálni a hulladékok termikus bomlástermékeit, ezért a végtermékekben káros szennyezők nagy mennyiségben lesznek jelen.

RT (min)	SI (%)	CAS	Vegyület	Koncentráció (%)
GC-FID only		107-13-1	acrylonitrile	2.7
GC-FID only		71-43-2	benzene	21.9
GC-FID only		108-88-3	toluene	1.3
9.1	99	100-41-4	ethylbenzene	4.9
11.3	97	100-42-5	styrene	13.4
15.1	97	98-82-8	cumene	0.6
20.3	92	98-83-9	R-methylstyrene	0.1
21.4	97	108-95-2	phenol	0.5
21.7	93	4013-34-7	(1-methoxyethyl)benzene	0.1
22.5	92	300-57-2	2-propenylbenzene	0.1
22.6	94	611-15-4	2-methylstyrene	0.1
25.1	92	1572-52-7	R-methyleneglutaronitrile	0.1
25.9	91	1120-21-4	undecane	0.1
27.5	94	140-29-4	benzyl nitrile	0.1
28.4	96	1823-91-2	R-methyl-benzeneacetonitrile	0.1
28.7	94	91-20-3	naphthalene	0.2
28.9	94	1885-38-7	trans-3-phenylpropenenitrile	0.1
29.1	91	112-41-4	1-dodecene	<0.1
30.5	98	99-89-8	4-isopropylphenol	0.5
32.7	95	90-12-0	1-methylnaphthalene	0.2
33.5	98	2046-18-6	benzenebutanenitrile	5.9
33.9	91	5590-14-7	cyclopropanecarbonitrile	0.1
34.9	94	13360-61-7	1-pentadecene	0.1
37.3	90	644-08-6	4-methyldiphenyl	0.1
37.6	96	613-46-7	2-naphthalenecarbonitrile	0.2
38.2	92	103-29-7	bibenzyl	0.1
39.9	91	74339-50-7	dodecyl trichloroacetate	0.1
41.3	97	1081-75-0	1,3-diphenylpropane	2.3
41.4	93	132-75-2	1-naphthaleneacetonitrile	0.6
42.6	94	103-30-0	1,2-diphenylethene	0.2
44.3	96	6362-80-7	2,4-diphenyl-4-methyl-1-pentene	3.3
44.6	91	7614-93-9	1,3-diphenyl-1-butene	0.8
45.2	94	22768-22-5	2,4-diphenyl-4-methyl-2(E)-pentene	2.3

RT (min)	SI (%)	CAS	Vegyület	Koncentráció (%)
46.5	91	629-79-8	hexadecanenitrile	0.3
46.6	91	86544-79-8	1,3-diphenyl-3-methylcyclopropene	0.3
47.0	96	112-39-0	methyl hexadecanoate	0.8
48.0	81	612-94-2	naphthalene, 2-phenyl-	0.7
49.8	96	4998-48-5	2-(2H-benzotriazol-2-yl)-5-methylphenol	0.5
50.8	96	112-61-8	methyl octadecanoate	1.4
51.7	74		1-phenyl-1(3-phenyl-3butenyl) cyclopropane	3.6
53.3	76		unknown	1.9
54.2	84	1889-67-4	benzene, 1,1'-(1,1,2,2-tetramethyl-1,2-ethanediyl)bis-	1.7
56.9	86	6362-80-7	2,4-diphenyl-4-methyl-1-pentene	2.5
57.8	85	6362-80-7	2,4-diphenyl-4-methyl-1-pentene	1.8
59.2	92	1889-67-4	2,3-dimethyl-2,3-diphenylbutane	0.4
			TOTAL	78.8

4. ábra

Számítástechnikai műanyagokból 500 °C hőmérsékleten felszabaduló vagy rekombinációval előálló vegyületek

Forrás: HALL–WILLIAMS 2006

A szakaszos üzemű és kevés lépésből álló technológiák csak a hulladékok igen szűk körét (például poliolefinok) képesek kielégítő tisztasággal és gazdaságosan kezelni, azonban ezek viszonylag egyszerűen anyagukban is újrahasznosíthatók, így ezek a kezdetleges eljárások mára az egészséges piaci versenyben elvesztették létjogosultságukat.

Egy egészséges jogi és gazdasági környezetben technológiailag – és ebből adódóan gazdaságilag is – sikeres módszer tehát csak többlépéses (6-9) és folyamatos üzemű technológia lehet.

Ezek a technológiák az elmúlt évtizedekben a fentiek következtében erőteljes fejlődésnek is indultak, és számtalan variációjuk alakult ki. A technológia szempontjából megkülönböztetünk alacsony ($T < 450\text{ °C}$), közepes ($450\text{ °C} < T < 650\text{ °C}$) és magas hőmérsékletű ($T > 650\text{ °C}$) eljárásokat. Utóbbiak külső fűtéssel általában $900\text{--}1000\text{ °C}$ hőmérsékletig üzemeltethetők. Az alkalmazott kémiai technológia lépései és főleg a gáztisztítási eljárások azonban döntőek az adott technológia gazdaságosságának és hatékonyságának tekintetében, amelyek egy egészséges piacon jó marketing mellett sikert hozhatnak.

A plazmatechnológiák megjelenésével (SYEDA–HASSANPOUR 2017; GOMEZ et al. 2009) a belső, plazmafűtésű, magasabb hőmérsékletű ($1200\text{ °C} < T < 2100\text{ °C}$) reaktorok is részei lettek ilyen rendszereknek, ami megteremtette a szintézisgáz hulladékból való előállításának, a keletkezett hőstabil káros vegyületek (például dioxinok, furánok stb.) igen jó hatásfokú eliminálásának lehetőségét. A reaktor belsejében folyamatos, magas hőmérsékletű plazmaív gondoskodik a hőtánpótlásról és az UV-tartományban emittált fotonok jó hatásfokkal bontják fel a molekulák kötéseit a valenciaelektronok kiszórása által. A plazmatechnológiák így képesek a hulladékok rendkívül széles körét feldolgozni, a radioaktív hulladékok és a robbanóanyagok kivételével szinte mindenfajta veszélyes hulladékkal is üzemelnek. A plazmatechnológiák elterjedésének főleg magas investíciós és működési költségeik szabnak határt.

A két technológia – a plazma és a pirolízis – kombinációja új lépcsőfokot jelent a hulladék anaerob termikus hasznosításában. Míg az olcsóbb létesítésű és üzemköltségű piro-

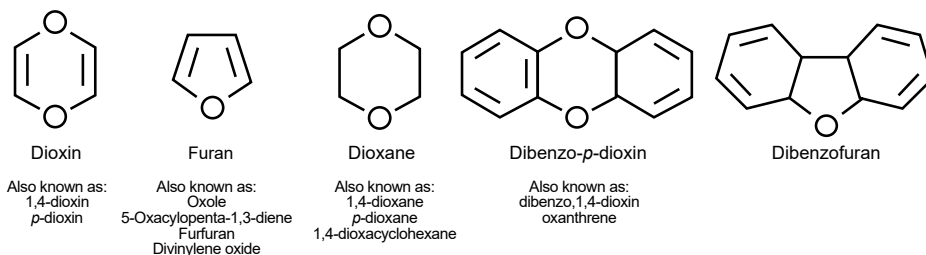
lízis a hulladékok nagyobb tömegű frakcióját képes termikusan gerjesztett állapotba hozni, az áramigényes plazma energiája jól hasznosulva csak a kisebb tömegű veszélyes hulladék eliminálására vagy a már termikusan gerjesztett molekulatöredékek további krakkolására fordítódik. A magas hőmérsékletű rész belső fűtése lehetővé teszi emellett a korróziós problémák részbeni megoldását is. A technológiák részletei természetesen nem nyilvánosak, a következőkben mégis bemutatjuk egy hazai fejlesztésű termolitikus eljárás vázlatát.

4. A WTOE-technológia

A WTOE-technológia a Waste to Energy Kft. fejlesztése, ahol évek óta kísérleteznek az anaerob termolitikus módszerekkel. A fejlesztés célja az RDF-hulladék környezetbarát termolízisének műszaki realizációja volt, hiszen a hazai hulladéktelepek ezen frakció gyártására alkalmas gépparkkal rendelkeznek.

A hulladék minősége megszabja a technológia szükséges lépéseit, ezért először a hazai kommunális hulladék összetételét kellett alaposabban megvizsgálni. A vizsgálat fontos eredménye a halogéntartalmú komponensek viszonylag magas (maximum 3m/m%) aránya, amelyre a kibocsátási határértékek betartása érdekében mindenképpen komoly súlyt kellett fektetni. A pirolízis köztes és végtermékei között ugyanis magas koncentrációban megtalálható toxikus anyagok a dioxinok és furánok, amelyek képződése már 300 °C körül elkezdődik, szétesésük pedig csak 1100 °C felett biztos.

A reaktortérbe kerülő anyag sokfélesége miatt sajnos szinte minden kémiai elem jelenlétét feltételezni kell, így a legfontosabb startégiai lépés egy olyan előkezelési eljárás kifejlesztése volt, amelynek során a halogéneket és a többi, fokozott korróziót is okozó, rendkívül affín elemet (például kén) jó határfokkal távolítja el a hulladékból.



5. ábra

A dioxinok és furánok kémiai szerkezete

Forrás: <http://blog.chemistry-matters.com/dioxins-and-furans-101>

A hulladék ilyen előkezelése során az említett komponensek koncentrációit legalább egy nagyságrenddel sikerült csökkenteni. A kiszelektált halogénekből a technológia további lépéseiben a környezetre veszélytelen sókat képeznek, amelyek bepárolt állapotban a bemenő anyag tömegének mindössze 1-2%-át képezik, és újra felhasználhatók például síkosságmentesítésre.

A megtisztított alapanyag többlepcsős termikus degradáció után kerül utókrakkolásra, amelynek során az alifás komponensek lánchosszúságának eloszlásfüggvényét alakítják a kívánt alakúra, majd pedig frakcionálásra. A keletkezett gáznemű és hígabb folyékony frakciót kémiai összetételtől függően nyersanyagként újrahasznosítják (például a műanyag-iparban), vagy pedig erre a célra kifejlesztett, speciális motorokban elégetik.

A technológia igen jó hatásfokú hőhasznosítása és szárítási technikája lehetővé teszi, hogy a rendszer áramtermelés esetén – a bemenő hulladék magas, kb. 30-35%-os nedves-ségtartalma ellenére is – 25%-os elektromos hatásfokot érjen el.

Az anyagként való újrahasznosítás a bemenő hulladék minőségének és az alkalmazott technológia kontrollparamétereinek függvényben lehetséges különböző célokra. A pirólízis-kokszt újrahasznosítása is része a rendszernek, amelynek végén lehetővé válik a leggyakoribb fémek (például Al, Fe, Cu) jó hatásfokú visszanyerése. A technológia maradéka a hamu, amely a bemenő anyag tömegének általában mindössze 4-8%-át képviseli.

A technológia különböző méretekben, mobilan telepíthető konténerekbe szerelve áll rendelkezésre, 100 kW és 1 MW közötti kapacitású modulok formájában, amelyek akár építési engedély nélkül is szinte bárhol telepíthetők néhány nap alatt, ugyanis se vízforrást, se hálózatiáram-csatlakozást nem igényelnek. A technológia a bemenő hulladék minőségétől és a gazdasági-műszaki környezettől függően (például áramigény, hőigény a környéken, a hulladék szállítási költsége) már akár 10 ezer t/év kapacitástól is nyereségesen üzemeltethető, és alkalmas kórházi veszélyes hulladék feldolgozására is.

Felhasznált irodalom

Envir. Forrás: www.envir.se/en/industry/ (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).

Geoengineer. Forrás: www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/geoenvironmental-engineering/biodegradation-in-municipal-solid-waste-landfills?showall=&start=2 (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).

GOMEZ, E. et. al. (2009): Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 161. No. 2–3, 614–626.

HALL, W. J. – WILLIAMS, P. T. (2006): Fast Pyrolysis of Halogenated Plastics Recovered from Waste Computers. *Energy and Fuels*, Vol. 20. No. 4. 1536–1549.

HOORNWEG, D. – BHADA-TATA, P. (2012): *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Washington DC., World Bank. Forrás: https://siteresources.worldbank.org/INTURBAN-DEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).

KALTSCHMITT, M. – HARTMANN, H. – HOFBAUER, H. Hrsg. (2009): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin–Heidelberg, Springer Verlag.

LE GUERN, C. (2019): *When The Mermaids Cry: The Great Plastic Tide*. Forrás: <http://plastic-pollution.org/> (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.)

SYEDA, A. U. – HASSANPOUR, M. (2017): Plasma Technology and Waste Management. *Journal of Waste Recycling*, Vol. 2. No. 1.

Umweltbundesamt (2006): *Energie aus Abfall, ein bedeutender Beitrag zum Klimaschutz*. Forrás: www.ecologic.eu/sites/files/project/2013/201-38_zusammenfassung_endfassung.pdf (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).

What energy is used to heat the pyrolysis reactor? Forrás: www.wastetireoil.com/Pyrolysis_faq/Pyrolysis_Plant/waste_tire_pyrolysis_plant_259%7D.html (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).