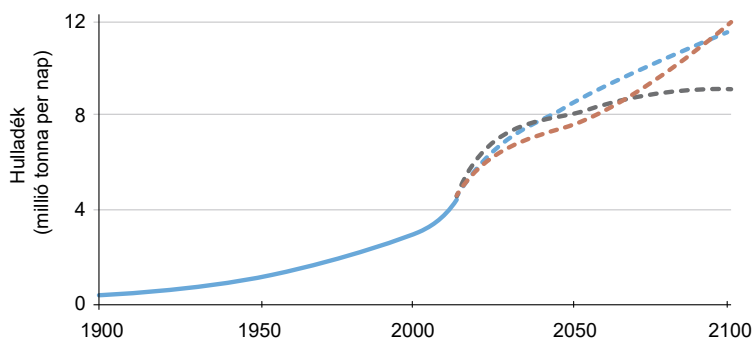


Hulladék = Energia + Nyersanyag

Németh Zsolt

Bevezető

Az elmúlt évszázadokban az emberiség létszáma közel exponenciálisan növekedett. Ezzel párhuzamosan nőtt a városi lakosság lélekszáma: míg 1950-ben mindössze nyolc város lakosság száma érte el az öt milliót, addig 2010-re már 56 ilyen város volt a Földön (World Urbanization Prospects). Az egyre gyorsuló urbanizációs folyamat eredményeképpen manapság már *hetente* mintegy 1,5 millió fővel növekszik a városok lakosság száma (Price-waterhouseCoopers).



1. ábra

Az emberiség hulladéktermelésének szimulációi

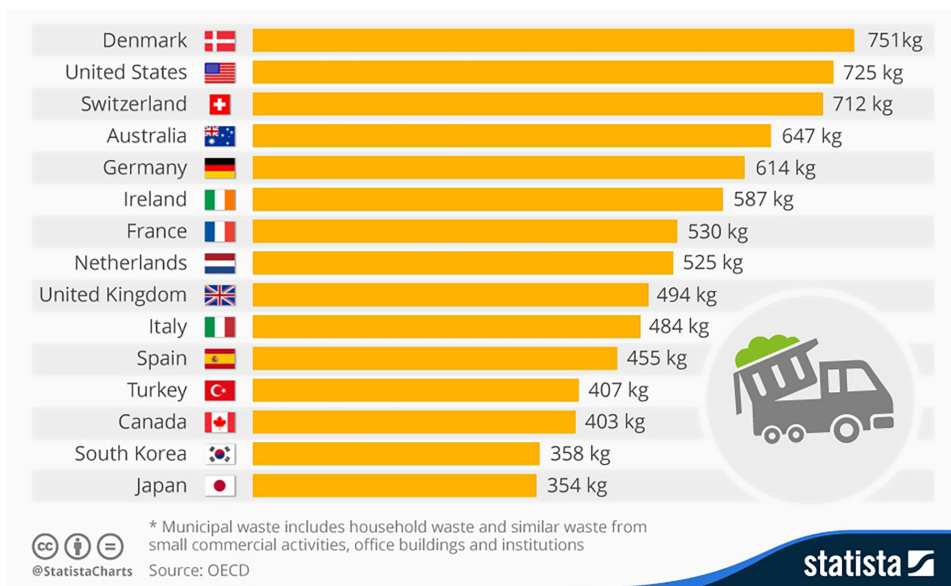
Forrás: HOORNWEG–BHADA-TATA 2012

A városi lakosság civilizációs életmódja, termelési- és fogyasztási szokásai ugyanakkor egyre több hulladékot eredményez, amelynek elhelyezése, újrahasználatát illetve visszaforgatása a természetbe mára szinte megoldhatatlan kihívások elé állította az emberiséget.

Az 1. ábrán az emberiség teljes hulladéktermelése, illetve annak három, a jövőre vonatkozó szimulációja látható. A szürke szaggatott vonal optimista feltételei: 7 milliárdos össznépesség, amelynek 90%-a urbanizált, a fosszilis energiaforrások fogyasztása minimalizálva, környezettudatos életforma. A kék szaggatott vonal feltételei: 9,5 milliárdos népesség, amelynek 80%-a urbanizált, és a jelenlegi életforma nem változik jelentősen (business as usual). A piros szaggatott vonal feltételei pedig: a 13,5 milliárdos lakosság

70%-a él városokban, nagy gazdasági különbségek mellett a szegényebb országok erőteljes lakosságszám-növekedésével. Az ábrából látható, hogy a 21. század végére a jelenlegi, napi kb. 4 millió tonna hulladéknak még az optimista Szenárió megvalósulása mellett is több mint duplája, mintegy 9 millió tonna hulladék keletkezése várható.

A korszerű hulladékmenedzsment kiépítése ugyanakkor már napjainkban is komoly kihívás elé állítja még a legfejlettebb országok közigazgatását is, számos megoldatlan technológiai, gazdasági és jogi kérdést hagyva például az üveghulladékok, ötvözetek, kis koncentrációjú ritka fémek, műanyag hulladékok, gumiabroncsok, radioaktív hulladékok stb. tekintetében.



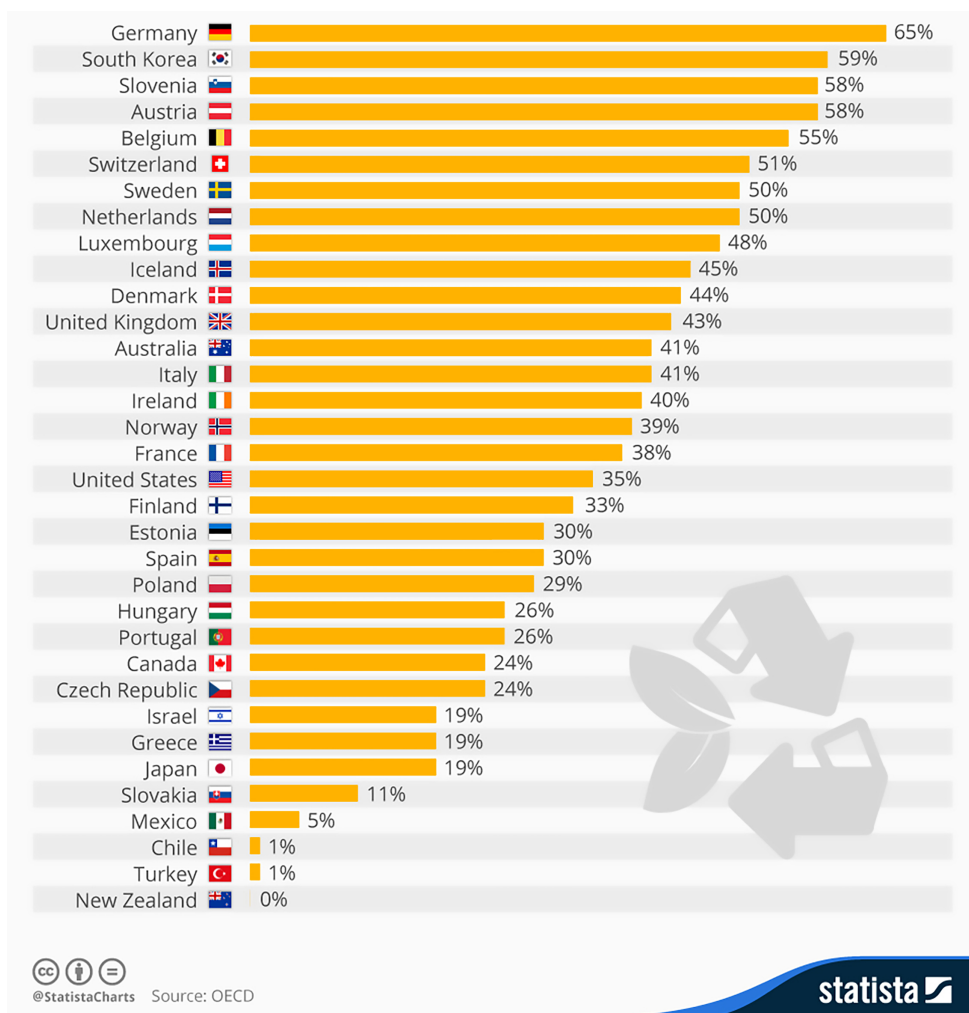
2. ábra

Hulladéktermelés az egyes országokban

Forrás: OECD 2015

Az OECD-felmérésből látható, hogy egy ország „civilizáltsági” és urbanizációs foka jól korrelál a fajlagos hulladéktermeléssel, ugyanakkor kitűnik, hogy ez a korreláció a technikai fejlettség tekintetében már sokkal gyengébb, és a társadalmi szokások is számítanak.

A hulladéktátrásba került anyagok hatalmas tömegének azonban jelenleg csak töredékét használják fel valamilyen módon, és ebbe sokszor a rendkívül rossz hatásfokú, sőt környezetszennyező hulladékgépetést is beleértik.



3. ábra

Újrahasznosított hulladék aránya az egyes országokban

Forrás: OECD 2015

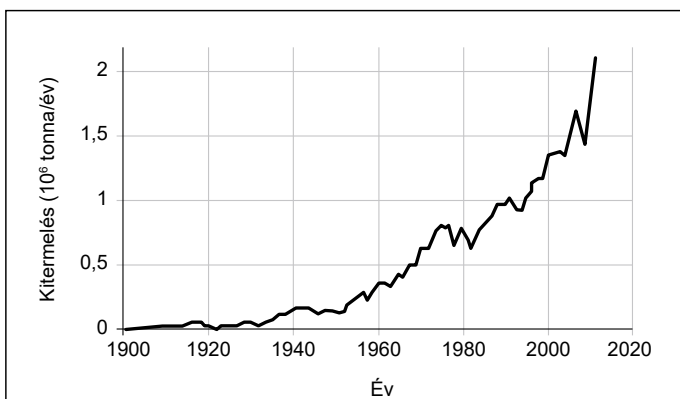
A hulladék újrahasznosítási arányainak 2015-ös adatai (OECD 2015) azt mutatják, hogy a világ majd kétszáz országából csak hétben hasznosítják újra a kommunális hulladéknak legalább felét, és mintegy 170 országban az 5%-ot sem éri el az újrahasznosítási arány.

A legegyszerűbb lenne a biológiailag bontható hulladékok hasznosítása, irányított biokémiai folyamatok, például anaerob fermentáció és komposztálás után a mezőgazdaságban kellene hasznosítani az értékes szerves anyagot az intenzív, műtrágyahasználatból pusztuló

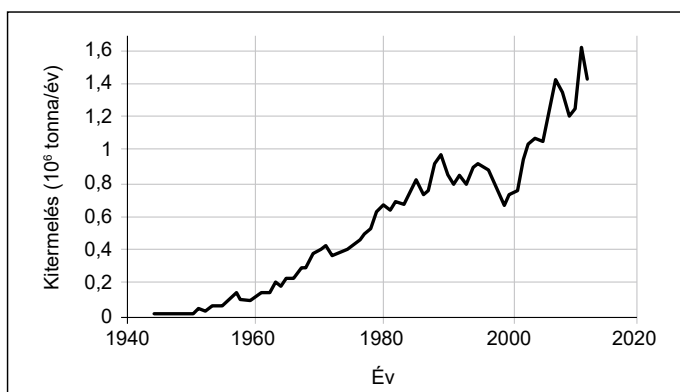
talajok humusztartalmának növelése érdekében, azonban sokszor még ezt is gátolják a gazdasági és lobbierdekek, a jóval drágább és környezetkárosítóbb égetést preferálva.

A biológiai nem bontható anyagoknak pedig szétválogatásuk utáni, lehetőleg anyagukban való újrahasznosítása lenne kívánatos. Így ugyanis vissza lehetne őket juttatni az ipari anyaggazdálkodás körforgásába. Ez manapság a legtöbb nyersanyag tekintetében még nem gazdaságos, de néhány éven, évtizeden belül bizonyosan az lesz, ugyanis vészesen fogynak a Föld ásványi tartalékai.

Az alábbi ábrák a világ nikkel- (Ni) és cirkóniumkitermelésének (Zr) változását mutatják az utóbbi évszázadban (Mineral Resources Program), de a többi fém és sok ásvány tekintetében is hasonló görbéket láthatunk.



4. ábra

*A világ nikkelkitermelése**Forrás: a szerző szerkesztése*

5. ábra

*A világ cirkóniumkitermelése**Forrás: a szerző szerkesztése*

Még ha a politika, a jogalkotás és a közigazgatás eddig szinte példátlanul tudatos és konzisztens cselekvése által megvalósul is egyes országokban a hulladékgazdálkodásnak az a kívánatos és logikus alapelve, amely szerint a gyártók csak bizonyos, anyagukat tekintve könnyen újrafelhasználható alapanyagokból állíthatnak elő egyes termékeket (például egységesen adalékolt polietilén fóliák, amelyek jól szervezett begyűjtés után kis ráfordítással szennyező melléktermékek nélkül reggranulálhatók), akkor is a következő generációkra marad a 20–21. század során elásott, több milliárd tonnányi, zavarbaejtően változatos anyagminőségű hulladék újrafeldolgozásának feladata.

Ebből ugyanis olyan értékes anyagok nyerhetők ki, amelyek bányászata már jóval nagyobb ráfordításokat igényelne, illetve az itt tárolt hulladék energiatartalma miatt válik értékessé.

A Magyarország mintegy 2500, jórészt lezárt hulladéklerakójában rendelkezésre álló anyag megfelelő energetikai hasznosítása becslések szerint több évre fedezetné az ország elektromos áram- és távhőigényét.

A kommunális hulladék mintegy 85-90%-a ugyanis szerves anyag, amely hő hatására elbomlik, és a keletkezett olajszerű, illetve gáznemű termékek jelentős energiatartalommal bírnak.

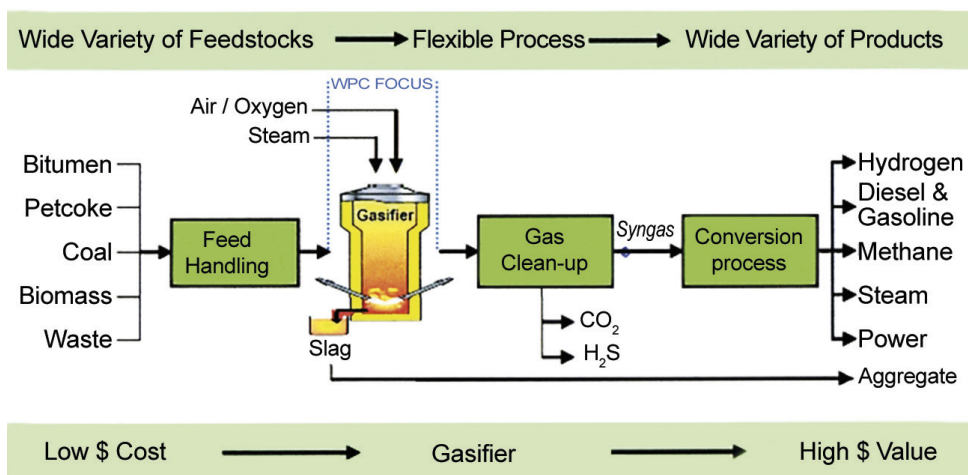
Az energetikai hasznosítás persze nem a hagyományos égetőművekben képzelhető el, hiszen ezekből hatalmas kapacitásuk miatt hazánkban csupán 2-3 lenne gazdaságosan üzemeltethető, ezek is jelentős szállítási ráfordításokkal. Olyan technológiákra van inkább szükség, amelyek alacsonyabb, évi 5-10 ezer tonnás kapacitással is gazdaságosan üzemeltethetők, és környezetkímélő, regionális megoldást kínálnak.

Ilyen technológiák lehetnek a következők: 1. Plazmatechnológia; 2. Alacsony hőmérsékletű ($T < 400\text{ °C}$) pirolitikus technológiák; 3. Közepes ($400\text{ °C} < T < 900\text{ °C}$) hőmérsékletű pirolitikus technológiák.

Az alábbiakban ezen technológiákba nyújtunk vázlatos betekintést.

1. Plazmatechnológiák

Ezen technológiákat főleg az USA-ban fejlesztették ki az 1980-as éveitől kezdve. Alkalmazásuk rendkívül sokoldalú, az ásványi szenek cseppfolyósításától a katonai célokig (WILLIAMS–JENKINS–NGUYEN 2003) Az eljárás lényege, hogy egy *anaerob*, zárt térben plazmaívvel termikusan degradálják a beadagolt hulladékot. Az ív hőmérséklete akár 13 ezer °C feletti is lehet, és az általa emittált nagy energiájú UV-fotonok kiszórják az anyagok kötési elektronjait, így az nagyrészt kisebb molekulákra, illetve atomokra esik szét. A folyamatot az olvasztótérben uralkodó $1600\text{--}1800\text{ °C}$ hőmérséklet is segíti, amelyben a szerves anyag főleg hidrogénre és szénmonoxidra esik szét. Ezen két gáz keverékét tisztítás után tiszta szénhidrogének, például CH_3OH , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, CH_4 stb. szintézisére használják (MESSERLE–USTIMENKO 2007)



6. ábra

Plazmatechnológia folyamatábrája

Forrás: <https://adoc.tips/zld-szintetikus-zemanyag-tiszta-szen-technologiaival.html>

A fenti folyamatábra az eljárás vázlatát mutatja. A plazmakohóból kikerülő, megszilárdulva üvegszerű salak főleg fém-oxidokat, szilícium-dioxidot és más, szervesetlen vegyületeket tartalmaz. Kellően anaerob folyamat esetén a fémek innen nyerhetők vissza, sűrűségük szerint rétegzett formában. Az eljárás előnyei:

Sokféle bemenő anyagra alkalmas, még veszélyes hulladékokra, kemikáliák, gyógyszerek (kis mennyiségben vagy átalakított formában) robbanóanyagok stb. feldolgozására is.

Kellően hatékony gáztisztítás esetén rendkívül tiszta végtermékeket kapunk, hiszen a magas hőmérséklet meggátolja az égési folyamatoknál gyakran előálló dioxinok, NO_x és furánok képződését. A gázok lehűtésekor azonban rekombinációval kis mennyiségben dioxinok képződnek.

Fémek és szervesetlen anyagok a salakból kinyerhetők, vagyis az anyagban való újrahasznosítás lehetősége technikailag adott. Kérdés, hogy mely anyagokra gazdaságos?

Az eljárás hátrányai:

- Jelentős investíciót igényel, egy napi kb. 50 t hulladékot feldolgozni képes rendszer jelenlegi piaci ára több tízmillió dollár. Ebből következően az amortizációs és karbantartási költség is releváns hányadot képvisel az üzemköltségek között.
- Magas az elektromos áramigénye, amely szintén csökkenti a nyereségességet. Ha elektromos áram által generált plazmával bontjuk fel ugyanis a kémiai kötéseket, és ezen túlmenően még az atomokat is gerjesztjük, akkor más, sok esetben azonos kötések létrejöttékor kinyerhető, főleg hőenergia a hőerőgépek gyenge elektromos hatásfoka miatt nem tud sokkal több elektromosságot termelni, mint amennyit felhasznál. Az eljárást főleg a veszélyes hulladék magas átvételi ára teszi nyereségessé néhány országban.

A fentiek miatt az eljárás hasznosításának főleg gazdasági akadályai vannak, illetve a plazmafáklyák gyártása rendkívül magas technológiai tudást igényel, amely a legtöbb országban nem áll rendelkezésre. A technológiát egyébként a Pentagon is használja Gerald R. Ford-osztályú repülőgép-anyahajóin, ahol a képződő kommunális hulladékból a repülőgépek üzemeltetéséhez szükséges szintetikus üzemanyagot állítja elő belőle.

A plazmatechnológia olcsóbbá válásával a nyersanyagok fokozódó szűkössége esetén a jövőben vonzó helyi megoldást jelenthet a hulladékhasznosításban. Tiszta végtermékeivel ugyan jelentős energiafelhasználás árán, de lehetővé teszi a hulladék bizonyos komponenseinek anyagukban való újrahasznosítását is.

2. Alacsony hőmérsékletű pirolízis

Pirolízisen általában a szerves anyag levegőtől részben vagy teljesen elzárt termikus degradációját értjük. A 20. század elején kifejlesztett ún. fapirolízis magas hőmérsékleten ($T \sim 800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) ment végbe a szén teljes eloxidálásával, az ennek során képződő CO_2 -t a még forró faszén rétegen átvezetve redukálták szén-monoxiddá. Ez képezte a motorok hajtóanyagát. A folyamatba csak annyi levegőt engedtek, amennyi a kigázosodó szén-monoxid teljes oxidációjához szükséges volt, az égetésnél szokásos „légfelesleg” itt káros lett volna a folyamatra. Ez a pirolízis tehát nem anaerob, szemben a teljesen zárt térben végzett hevítéssel. Utóbbi atmoszférája a bekerült anyagok oxigéntartalma miatt kis mértékben szintén oxidatív, az anyagmennyiségek miatt azonban itt mégsem az oxidáció dominál. A szénláncok a hőmozgás hatására felbomlanak, kisebb, szobahőmérsékleten folyékony vagy légnemű anyagok molekulái képződnek belőlük.

A bemenő anyagok függvényében sajnos az így képződő molekulák egy része rendkívül mérgező. A kommunális hulladékban található halogének (főleg a Cl és a Br) pedig a jelenlévő poliaromás és heterociklusos szénhidrogénekkel PAH-okat, dioxinokat, furánokat és más, az emberi egészségre és környezetre fokozottan veszélyes vegyületet képeznek. Két amerikai kutató kísérletet végzett számítástechnikai műanyagok anaerob termikus degradációjával $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten és a pirolízistermékekben rendkívül toxikus vegyületek százait találták (HALL–WILLIAMS 2006).

Mivel ezen toxikus vegyületek eltávolítása, illetve közömbösítése a végtermékekben a működési rentabilitást megakadályozó ráfordítást igényelne, próbálkozások történtek a szerves anyag olyan alacsony hőmérsékletű ($T \sim 360\text{--}390\text{ }^{\circ}\text{C}$) degradációjára, amelynek során a fenti toxikus anyagok még nem vagy csak kis koncentrációban állnak elő.

Egy ilyen rendszer kifejlesztője a cseh hadsereg egyik cége (Hedviga), amely jelentős befektetéssel, évek munkájának eredményeképpen létrehozott egy szakaszos üzemű anaerob pirolízisrendszert. Ez a rendszer 1200 liter térfogatú edényekbe töltött hulladék anaerob felmelegítésével a termelődő gőzöket és gázokat tisztítás és kondenzáció után speciálisan erre a célra kifejlesztett gázmotorokban hasznosítja (KOČI et al. 2017).

A hulladékot először $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ fokon szárítják, majd $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ fokon részben degradálják. Az alacsony hőmérséklet legfőbb előnye, hogy a mérgező komponensek koncentrációja kicsi marad, azonban a hulladéknak ezen a hőmérsékleten több óra elteltével is csak mintegy 30–35%-a degradálódik, vagyis tömegben és térfogatban csak kismértékű csökkenés történik.

A kép az alacsony hőmérsékletű rendszer egy nagyüzemi realizációját mutatja (Zimatechnik). A tartályokból a gőzöket és a gázt a rozsdamentes csövön keresztül szívják el. Az edényekhez mágnesesen csatlakozó elszívó illesztéseit nitrogénnel fűjják a robbanásveszély csökkentése érdekében.



7. ábra

Alacsony hőmérsékletű rendszer

Forrás: <http://zimatechnik.cz/waste-to-energy/>

A rendszer piaci ára 1 MW elektromos teljesítményre 2,5 millió euró feletti, ami ebben a mezőnyben közepesnek mondható.

A technológia előnyei:

- A hulladékok széles skálája kezelhető vele.
- Tiszta végtermékeket szolgáltat.

Hátrányai:

- A kezelt hulladék 65-70%-a megmarad, gyenge hatásfokú.
- Bonyolult rendszer, működtetésének költségei magasak.
- Szakaszos üzemű, hőmérsékleti inhomogenitások jellemzik, a melegítés és hűtés során kontrollálhatatlan köztes- és végtermékek keletkeznek.

3. Közepes hőmérsékletű pirolitikus technológiák

Mint a fentiekben már láttuk, a pirolízis során keletkező toxikus anyagok komoly környezeti és egészségügyi problémát jelenthetnek, eltávolításuk pedig a végtermékekből rendkívül költséges lenne. Ugyanakkor alacsony degradációs hőmérsékletet alkalmazva a hulladék nagy része megmarad, kívánatos lenne tehát magas hőmérsékleten elkerülni valahogy a toxikus anyagok képződését, ugyanakkor jelentősebb hulladék-tömegcsökkenést elérni.

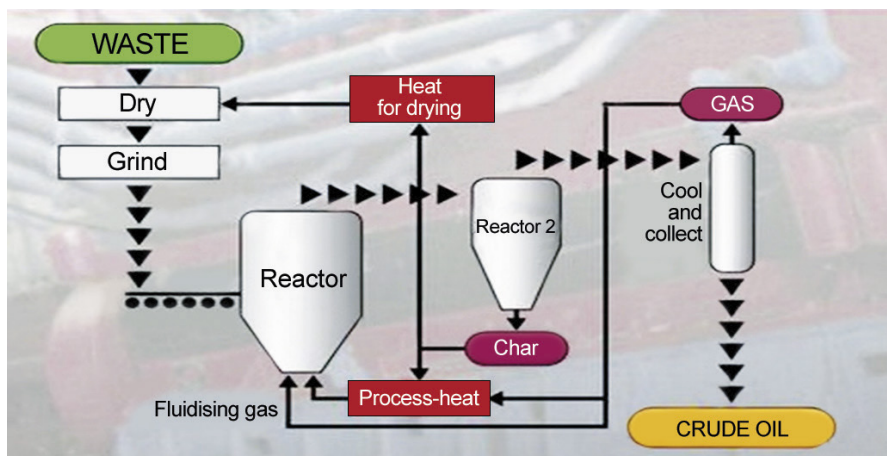
Ez csak úgy lehetséges, ha a rendszerbe jutó hulladékok körét erősen korlátozzuk, vagyis a halogéntartalmú részeket kiválogatjuk, illetve a pirolízisnél alkalmazott kémiai technológia lépései során ki tudjuk küszöbölni a mérgező vegyületek képződését. Utóbbi 100%-os hatásfokkal nyilván lehetetlen, mégis vannak módszerek, amelyekkel jelentősen és költséghatékonyan csökkenteni lehet ezen anyagok koncentrációit a végtermékekben.

A hulladékok kiválogatása további költséggel jár, ráadásul a termikusan legegyszerűbben degradálható és legtisztább végterméket adó poliolefinnek (főleg a PE és a PP) tisztítás után egyszerű reggranulálással is hasznosíthatók anyagukban, ezért piaci áruk eléri a 120-130 Ft/kg-ot is, tehát pirolitikus hasznosításuk – néhány kivételtől eltekintve – energiatermelés céljából gazdaságtalan, környezetterhelő és ezért értelmetlen.

A modern válogatók már 1% alatti hibával ki tudják szűrni a hulladékból a halogéntartalmú részeket és a jó minőségű SRF-, illetve RDF-frakciók remek alapanyagot szolgáltatnak a pirolízisnek. Ugyan az 1% halogéntartalmú komponens még így is komoly mennyiségű PAH, PCB stb. képződéséhez elég, hiszen a halogéntartalmú műanyagok jelentős része PVC, amelyben a klór tömegaránya 60% körüli, azonban megfelelő technológiai lépésekkel el lehet távolítani a maradék halogén mintegy 90%-át, így a végtermékekbe már csak kb. 1‰ halogén kerülne, ha a technológia további lépései nem csökkentenék ezt is még két nagyságrenddel.

Fontos kiemelni, hogy a technológia *folyamatos üzemű*. Szakaszos működésnél ugyanis a reaktorok felfűtése csak jelentős hőmérsékleti inhomogenitások kialakulásával lehetséges, amelyek még intenzív keverés ellenére is több órán át jelen vannak a reakcióterben. Ezen idő alatt a depolimerizáció és a mérgező köztestermékek keletkezésének folyamata teljesen kontrollálhatatlan. A jól kontrollált, nagy tisztaságú végtermékeket szolgáltató kémiai technológiák reakcióterének hőmérsékleti homogenitása és folyamatos üzeme – néhány ritka kivételtől eltekintve – több mint száz éve a technológiák elemi alapfeltétele.

Az alábbi ábrán a WTOE kft által kifejlesztett folyamatos üzemű magyar technológia vázlata látható.



8. ábra

Folyamatos üzemű technológia

Forrás: <https://www.bioenergyconsult.com/pyrolysis-of-municipal-waste/>

A hulladék szárítás és őrlés után egy hulladékhővel fűtött előrekatorba kerül, ahol alacsony hőmérsékleten kezelik, majd a főreaktorban degradálódik termikusan mintegy 420-450 °C hőmérsékleten. A képződött gázokat, gőzöket elvezetés után tisztítják, kondenzálják, és helyben használják fel belsőégésű motorok hajtására.

A képződött olaj minősége nagyjából megfelel az ásványolajénak, ezért ebből a megfelelő kőolajipari műveletek (például frakcionálás, stabilizálás) elvégzése után ismét nyersanyagot kapunk, amely sokoldalúan felhasználható például a vegyiparban. A képződő kokszt helyben fűtőanyagként használják fel, így a hulladék térfogat és tömegcsökkenése a folyamat során eléri a 90%-ot is!

A technológia pontos lépései nem nyilvánosak, de a kimenő anyagok tisztasága minden esetben alatta marad a megengedett emissziós határértékeknek. A technológia versenyképességét jelentősen fokozza, hogy ára 1 MW elektromos teljesítményre vetítve csupán 1,5 millió euró körüli, tehát alacsony beruházási, üzemeltetési és amortizációs költség mellett kínál gyors megtérülést.

A technológia előnyei:

- A hulladék térfogat- és tömegcsökkenése elérheti a 90%-ot is.
- Károsanyag-kibocsátása alacsony, tiszta végtermékeket ad.
- Jól kontrollálható, folyamatos üzemű technológia.
- A hulladékok széles osztályát be tudja fogadni (például kórházi veszélyes hulladékot is).
- Alacsony ára, üzemköltsége gazdaságilag vonzó.
- Mobil konténerekben telepíthető rendszer, már évi 10 ezer tonna hulladék feldolgozásánál is rentábilisan üzemeltethető, jó regionális megoldást képvisel.

Hátrányok:

- Kevés nagyüzemi referenciával rendelkezik.

Fontos tulajdonsága a könnyű telepíthetőség, ezért a fejlesztők 40 lábas konténerekbe épített rendszert kínálnak. Ezek nemcsak könnyen szállíthatók, hanem elhelyezésükhöz még szilárd burkolat és építési engedély sem szükséges. A rendszerrel ezért lehetővé válna például régi, problémássá vált hulladéklerakók gazdaságos feldolgozása is.

4. Összefoglalás

Áttekintésemben a hulladékok termikus hasznosításának egyes kérdéseit érintve három, különböző hőmérsékleti tartományban működő pirolitikus technológiát mutattam be vázlatosan. Mindhárom képes már évi 20 ezer tonna bemenőanyaggal – környezettől és fogadott hulladékoktól függően – rentábilis működésre, ezért jó megoldást jelenthet a regionális hulladékgazdálkodás számára.

A bemutatott technológiák piacérettek, jövőbeli elterjedésük eddigi sikereik és a körülöttük folyó intenzív fejlesztések biztató eredményei alapján valószínű. A pirolitikus technológiák a következő évszázadban a hulladékmenedzsment egyik fontos elemét fogják képezni, mert képesek a változatos összetételű hulladék nagy részéből anyagában újrahasz-

nosítható végterméket előállítani, és a hulladékégetőkkel szemben alacsony kapacitások mellett is rentábilisan üzemeltethetők.

Felhasznált irodalom

- 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.).
- KOČI, V. et al. eds. (2017): *Environmental Technology and Innovations*. Leiden, CRC Press/Balkema.
- MESSERLE, V. E. – USTIMENKO, A. B. (2007): Solid Fuel Plasma Gasification. In SYRED, Nick – KHALATOV, Artem eds.: *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies. Environmental Protection and Pollution Reductions*. Springer Netherlands. 141–156. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-1-4020-6515-6>
- Mineral Resources Program. Forrás: <https://minerals.usgs.gov/> (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).
- OECD (2015): *Environment at a glance*. Forrás: https://read.oecd-ilibrary.org/environment/environment-at-a-glance-2015_9789264235199-en#page13 (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.). DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/9789264235199-en>
- Pricewaterhouse Coopers: www.pwc.co.uk/issues/megatrends/rapid-urbanisation.html
- Seaframe – Carderock Division Publication, 2008 The Plasma Arc Waste Destruction System to Reduce Waste Aboard CVN-78, pg. 13 www.dtic.mil
- WILLIAMS, R. B. – JENKINS, B. M. – NGUYEN, D. (2003): *Solid Waste Conversion: A review and database of current and emerging technologies*. Davis, University of California. Forrás: <https://biomass.ucdavis.edu/wp-content/uploads/10-16-2013-2003-solid-waste-conversion-review-and-assessment.pdf> (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).
- World Urbanization Prospects: *The 2007 Revision Population Database*. Forrás: <https://web.archive.org/web/20100822053414/http://esa.un.org/unup/index.asp?panel=6> (A letöltés ideje: 2020. 02. 12.).