

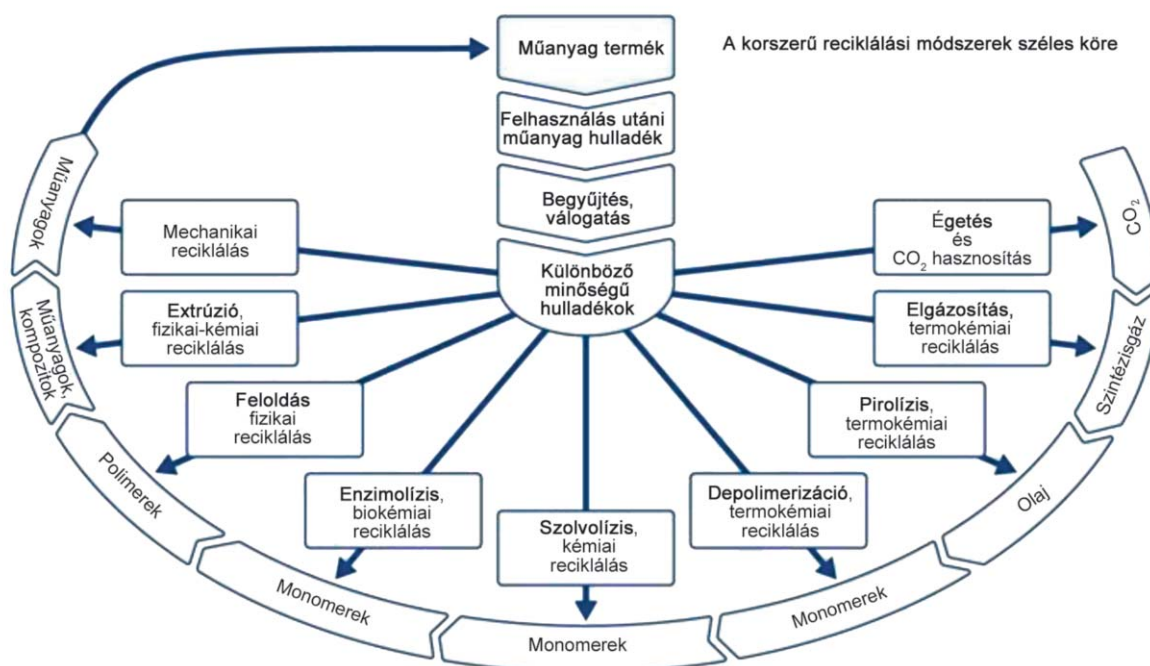
Új kémiai reciklálási módszerek kevert műanyag hulladék hasznosítására

A közleményben olyan kémiai reciklálási módszereket ismertetünk, amelyek túllépnek az egyszerű pirolízisen, és közvetlenül hasznosítható, kismolekulás vegyipari termékeket szolgáltatnak, amelyekből a kiinduló anyaggal azonos minőségű műanyagot lehet előállítani.

Tárgyszavak: kémiai és biológiai depolimerizáció, mikrohullámú lebontás, katalitikus eljárás, kevert műanyag hulladék

Túllépni a pirolízis lehetőségein

A világszerte, de különösen az EU-ban egyre szigorúbbá váló környezetvédelmi rendelkezések arra készítetik a műanyag gyártókat, de a műanyag csomagolást használó vállalatokat is (elsősorban az FMGC vállalatokat, amelyek „gyorsan forgó” használati cikkeket gyártanak), hogy a mechanikai reciklálás mellett egyre többet foglalkozzanak (mintegy annak kiegészítéseként) olyan kémiai módszerekkel, amelyek túllépnek a pirolízisen. A pirolízis ugyan majdnem univerzálisan alkalmazható, de energiatakarékosnak nem nevezhető és számos elválasztási műveletre van szükség ahhoz, hogy specifikus termékek legyenek előállíthatók a bomlástermékekből. Az 1. ábra számos korszerű reciklálási módszert mutat be. Az előírt reciklátum tartalom nem mindig eléghető ki pusztán a mechanikai reciklálással. Ahhoz azonban, hogy tovább lehessen lépni, pontosan tájékozódni kell, hogy a jelenlegi és a közeljövőben várható szabályozás milyen tömegarányban fogad el kémiailag reciklált anyagokat a termékekben. Jelenleg a legnagyobb kapacitással működő üzemek pirolízisre, depolimerizációra vagy egyéb elgázosításra vannak berendezkedve, amelyek termokémiai módszerek. A módszerek fejlettségét és a működő üzemek méretét tekintve



1. ábra. A modern műanyag reciklálási módszerek tárháza. (Kép forrása: nova-institute GmbH)

a pirolízis vezet, amely leginkább poli-olefin hulladékokkal működik, és az eredeti műanyagokkal azonos minőségű termékek előállítását teszi lehetővé (2. ábra). A **nova insitute** által azonosított 60 pirolizáló üzem a technológia folytonos javításán és a karbon-lábnyom csökkentésén dolgozik. Ennek egyik kulcseleme az alacsonyabb hőmérsékletet lehetővé tevő katalizátorok kidolgozása. A pirolízis és az elgázosítás mellett a depolimerizációs (szolvólízis és enzimólízis), valamint az oldószeres (fizikai) reciklálás is számításba jön. A különböző eljárások jellemző vonásait hasonlítja össze az 1. táblázat. A kémiai recikláló üzemek befogadóképessége már meghaladja az évi 1 millió tonnát, és ebben nincs benne az üzemanyaggá átalakító üzemek kapacitása, és ez a jövőben tovább fog nőni. Noha a pirolízisen és elgázosításon kívüli üzemek kapacitása egyelőre nem túl nagy, de egyre többen foglalkoznak a depolimerizáció különböző módozataival. Az **Eastman** cég például 2025-re egy évi 160 000 tonna kapacitású depolimerizáló üzemet tervez indítani Franciaországban. Az új fejlesztések már hasznosítani (és elkerülni) kívánják a korábbi szakaszban begyűjtött negatív tapasztalatokat, és a technológiai fejlesztő cégeket nagy gyártók (is) finanszírozzák.

A pirolízises eljárások hagyományos hátránya a nagy kátránytartalom. A holland **TNO** kutatóintézetben kifejlesztett és a **Synova** tulajdonában levő technológia esetében nincs kátrány maradék. A 15 éven át fejlesztett, majd kísérleti üzemi léptékben kipróbált eljárás indirekt elgázosításra épül, amely kombinálja a fluidágyas technológiát, a pirolízist és a buborékoltató fluidágyas égetést – mindent egy berendezésben. A **Synova** eljárása szinte bármilyen műanyag hulladékra alkalmazható, akár biológiai eredetű szennyezőkkel, inert anyagokkal és akár 30% víztartalommal. A termékek hasonlóak ahhoz, mint amik gőzkrakkolásánál képződnek. Az egyik részegység eltávolítja a kátrány 99,5%-át, amelyet aztán egy elgázosító/krakkoló berendezésben feldolgoz. Ilyen módon a kátrány frakció is értékes termékké dolgozható fel.



2. ábra. A különböző módszerekkel dolgozó recikláló üzemek száma és maximális kapacitása. (Kép forrása: nova-institute GmbH)

1. táblázat. A különböző reciklási módszerek összehasonlítása. (Forrás: Sreeparna Das)

Reciklási technológia	Műanyag típus	Termék	Fő technológiai szolgáltatók
Nyersanyagá alakítás: pirolízis	Vegyes műanyag hulladék (főleg PE, PP)	Vlapvegyszerek (olaj frakciók, benzin, monomerek, szintézisgáz, kátrány, viaszok)	Neste, Ineos, Chevron Phillips, Versalis, Honeywell, Agilyx, Quantafuel, Brightmark stb.
Nyersanyagá alakítás: elgázosítás	Vegyes műanyag hulladék	Szintézisgáz	Enerkem, Olefy
Nyersanyagá alakítás: különleges	Különböző	Alapvegyszerek	Aduro Clean Technologies (vizes krakkolás) Mura Technology, Synova (fejlett termikus krakkolás)
Depolimerizáció: termikus	PET, PMMA, PS, PUR, PA, egyéb	Monomerek, dimerek, oligomerek	Eastman, Aquafil, IFP Energies Nouvelles (IFPEN), Gr3n, Loop Insutries, revalyu, Ioniqa
Depolimerizáció: enzimatikus			Carbios, Samsara
Depolimerizáció: különleges			Pyrowave, Microwave Chemical Co.
Oldószeres tisztítás	PE/PP, PET, PS, ABS, HIPS, PVC	Tiszta polimer	Polystyvert, Recycling Avenue

Az elgázosítás másik visszatérő problémája az alacsony kihozatal. A finn **VTT** műszaki inkubátorház *LaunchPad* technológiája 70%-os hatásfokkal képes eredeti minőségű műanyagot és kémiai nyersanyagokat kinyerni a műanyag hulladékból. Most kísérleti üzemi szinten működik az *Olefy* technológia, az ipari üzemet 2026-ban tervezik indítani.

A kanadai **Aduro Clean Technologies** is kifejlesztett egy érdekes nyersanyagot „termelő” reciklási technológiát, amelyet Hollandiában, a **Brightland Chemelot Campuson** levő **Chemelot Circular Hub** értékelt ki és arra a következtetésre jutott, hogy vannak előnyei a standard pirolízises eljárással szemben. A vízalapú (pontosabban kritikus állapotú vizet alkalmazó) eljárás 375 °C alatti hőmérsékleten működik, ami alacsonyabb a megszokott pirolízis hőmérsékletnél. A kiindulási anyagösszetétel szélesebb tartományban változtatható, jó a kitermelés, nem képződnek aromás termékek, a kiindulási anyagok és a katalizátorok nem drágák. Laboratóriumi léptékben nem volt szükség hidrogénezésre és más kezelésre, mielőtt krakkolásra került volna sor, és a várakozások szerint kisebbek lesznek a beruházási és működési költségek. A félüzemi léptékű reaktor a várakozások szerint tud majd kezelni külön PE, PP és PS hulladékot, majd a termékáramok keverhetők egymással. A többrétegű csomagolóanyagokban jelen levő papír, alumínium és egyéb szennyezések hatását is félüzemi léptékben vizsgálják. A napi 2 tonnát feldolgozni képes kereskedelmi változatot 2023 vége előtt helyezik üzembe. A **Mura Technologies** hidrottermális eljárása ugyancsak előnyöket kínál a hagyományos pirolízishez képest. A szuperkritikus víz alkalmazása gyors felfűtést tesz lehetővé, ami csökkenti az energiafelhasználást. A termék szénhidrogének elegye.

Az élettartam-analízis (LCA) alapján a monomerré történő visszaalakítás (depolimerizáció) kedvezőbb, mint a köolajipari alapanyaggá történő bontás, mert a ciklus rövidebb. Ehhez azonban tiszta hulladékáramokra van szükség, nem minden polimer esetében alkalmazható, a technológia fejlesztői (köztük az **Eastman**) is főleg csak a PET-re koncentrálnak. Az **Eastman** technológiája palackokat, szőnyegeket, de akár poliészter alapú szöveteket is képes monomerré alakítani. Az amerikai üzemükben glikolízist használnak, de a francia üzemben már metanolízist kívánnak bevezetni. A 2. táblázat a különböző korszerű PET feldolgozási módszerek jellemzőit hasonlítja össze.

Küszöbön áll a mikrohullámú lebontás ipari bevezetése is. A kanadai **Pyrowave** szabadalmaztatott egy eljárást PS mikrohullámú lebontására és a licence első megvásárlójával, a **Michellin**nel együtt 2023-ban nyitják első demonstrációs üzemüket. A kihozatal közel 98%-os, a monomer tisztasága megközelíti az iparilag előállított új monomerét (99,8%). A cég tervezi, hogy az eljárást más műanyagokra is kiterjeszti. A japán **Microwave Chemical Co. Ltd.** poli(metil-metakrilát) és poliuretánok depolimerizációját célozta meg, de kísérleteznek olyan összetett hulladékáramok feldolgozásával is, mint a zúzott autóiipari hulladék (shredder), amelyben sok a PP komponens, valamint a poliészter alapú préselt lemezek (SMC).

A PET kémiai depolimerizációja mellett komoly fejlesztési erőfeszítéseket tesznek a biológiai (enzimatikus) lebontásra is. A **Carbios** cég demonstrációs üzeme mellett 2025 végéig egy évi 50 000 tonnás kapacitású üzem felépítését tervezi. A **Samsara** cégnek már van kísérleti üzeme és egy évi 20 000 tonnás üzem készül építeni. Mindkét cég keresi a módszer kiterjesztését más műanyagokra, mint a poliamidok, poliolefinok, polkarbonát, poliuretánok stb.

Új katalizátor kevert műanyag hulladék monomerekké bontására

Az amerikai **Oak Ridge Laboratory** bejelentette, hogy egy új katalitikus eljárást fejlesztett ki kevert műanyag hulladék újrafeldolgozására. Az új találmány előnye, hogy egyetlen, több célú katalizátort alkalmaz ahelyett, hogy minden műanyag típusra külön katalizátort dolgozna ki. Az összehasonlító vizsgálat szerint 94%-kal kisebb az energiafelhasználás, 95%-kal csökken kevesebb az üvegház hatású gázok kibocsátása, és 96%-kal csökken az üzemanyag felhasználás. Az új katalizátor elsősorban kondenzációs műanyagok lebontására alkalmas (polikarbonát, PET, poliuretán, poliamid), amelyek a globális termelés mintegy 30%-áért felelősek. A lebontás után keletkező monomereket desztillációval elválasztva az eredetivel megegyező minőségű műanyagok állíthatók elő. A lebontás hőmérséklete is fokozatosan emelkedik, a polikarbonát 130 °C-on, a PET 180 °C-on, a poliamidok 210 °C-on bomlanak a katalitikus

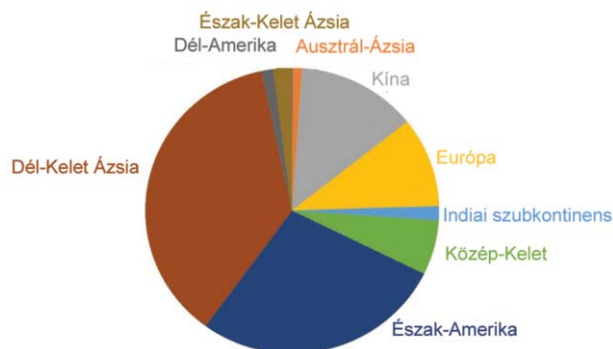
2. táblázat. Különböző korszerű PET depolimerizációs reciklási technológiák összehasonlítása. (Forrás: Sreeparna Das)

A technológia kidolgozója	Főbb jellemzők
Loop Industries ELJÁRÁS: metanolízis (katalitikus depolimerizáció) NYERSANYAG: PET hulladékáramok (vegyes színezett daralék, matt PET, irtelenített PET szál)	– Kombinálja a Loop saját tulajdonú technológiáját az Invista/Chemtex PET polimerizációs know-how-jával – Demonstrációs és ipari léptékű üzem Kanadában – 2025-re ipari üzem Franciaországban – 2030-ra a cél 4 üzem felépítés, a célszörzörök között szerepel Kína, Vietnam és Japán
Ioniqa ELJÁRÁS: katalitikusan gyorsított, glikolízis alapú depolimerizáció (mágneses katalizátor) NYERSANYAG: kisértékű PET hulladék (pl. színezett), amelynek jelenleg kb. 90%-a elégetésre kerül, vagy elföldelnek, vagy az óceánokba jut	– Az Eindhoveni Egyetem spinoff cége, amely az „intelligens” mágneses eljárások fejlesztésével foglalkozik – Az eljárást egy 10 000 tonnás üzembn demonstrálták (Brightlands Chemelot Campus) – Élelmiszeripari minőségű majonézes palackokat hozott létre (az Univer és az Indorama közreműködésével) fekete trikókból, hogy bizonyítsa: képes textil feldolgozására és élelmiszeripari minőségű termékek előállítására – További műanyag hulladékok feldolgozását is fejlesztik
revalyu HmbH ELJÁRÁS: alacsony hőmérsékletű glikolízis (oldószer: monoetilén glikol) NYERSANYAG: felhasználás utáni PET palackok	– Az indiai üzem napi 35 tonna újrahasonított PET-et termel – A termékből BOPET fóliát, PET palackot és egyéb termékeket lehetett gyártani – A Heraeus 2022-ben megszerezte a többségi tulajdont – A partnerek többsége a textiliparból kerül ki (Puma, H&M, Decathlon stb.) – 2025 végére évente 6 milliárd PET palack újrafeldolgozását tervezik
Gr3n ELJÁRÁS: alkalikus hídrolízis (mikrohullámú reaktorokkal) NYERSANYAG: felhasználás utáni vagy ipari PET-hulladék (palackok, színes vagy színtelen, átlátszó vagy matt), textilek, PET csomagolások	– A technológia kifejlesztését az EU DEMETO projektje finanszírozta – A mikrohullámú gerjesztés katalitikus hatású, a reakcióidő 3–5 órától 10 percre csökkenti, a feldolgozási hőmérséklet pedig 210–250 °C-ról 200 °C alá. Csökken a tisztítási eljárás bonyolultsága és javul a gazdaságosság (folyamatos technológia) – Demonstrációs üzem (500 tonna/év) Olaszországban – A lebontás összekapcsolható az új anyag előállításával.

folyamatban. Az egyéb szennyezők (természetes szálak, csomagolóanyagok) változatlan állapotban visszamaradnak eltérő reaktivitásuk miatt. A bontás után létrejövő monomerek vízzoldhatók, ezért könnyen elválaszthatók a szilárd szennyezőktől, majd extrakcióval kivonhatók a vizes oldatból. A víz elpárologtatása után a katalizátor visszanyerhető és visszajuttatható a reciklási folyamatba.

A kémiai reciklási piac jellemzői egy változó környezetben

Az AMI (Applied Market Information Ltd.) piackutató cég 2022 októberében tett közzé egy széleskörű felmérést a műanyagok kémiai újrafeldolgozásának piacról, amelyben 181 cég 449 telephelye szerepel. A közölt adatok felölelik az akkori és 2030-ig tervezett kapacitásokat, a felhasznált technológiát, a feldolgozott műanyagok típusait, a nyersanyagforrásokat, bizonyos működési részleteket és a technológia termékeit. Az áttekintés előnye, hogy a cégek az értéklánc egészben vannak elhelyezve. Az olyan alapfogalmak, mint a tömegmérleg, a mechanikai hasznosításhoz képest vett jövedelmezőség és a nyersanyagbeszerzés lehetőségei is tárgyalásra



3. ábra. Az AMI cég kémiai feldolgozásra vonatkozó 2022-es éves jelentésének ismertetőjéből vett ábra, amely a regionális kapacitások eloszlását mutatja. (Forrás: AMI)

kerülnek. 10 globális régióra kiterjedő összehasonlítást kapunk a hulladékkezelésre, gyűjtésre és válogatásra vonatkozóan. A cég becslése szerint 2022-ben a kapacitás (az üzemanyaggá történő újrafeldolgozó üzemeket leszámítva) mintegy 1,2 millió tonna/év volt. A jelentés megírása idején Európa volt a legfejlettebb technológiai téren, de az észak-amerikai kontinens gyorsan zárkózik fel. 2022 fordulópontnak számított a technológia életében, mert sok, addig fejlesztés alatt álló üzem kezdte meg a működését. A 3. ábrán látható a feldolgozó kapacitások területi megoszlása földrajzi régiók szerint. Úgy tűnik, hogy a nagy műanyaggyártók alig várják, hogy a piacon megjelenő technológiák közötti verseny eldöntse, hogy melyik kapacitás mire képes, hatékonyság, jövedelmezőség és a karbonlábnyom csökkentés szempontjából. Várható, hogy ezeknek a beruházás-igényes technológiáknak a megjelenése valamelyest el fogja terelni a figyelmet a műanyag-felhasználás csökkentéséről. Ahhoz azonban, hogy ezek a technológiák elterjedjenek, be kell bizonyítaniuk a független vizsgáló szerve előtt, hogy valóban hozzájárulnak a körkörös gazdaság kiépítéséhez.

Összeállította: dr. Bánhegyi György

S. Das: Advanced Recycling: Beyond Pyrolysis, Plastics Technology Online, 2022 november,

<https://www.ptonline.com/articles/advanced-recycling-beyond-pyrolysis>

S. Einscütz: The Chemical recycling industry is at a pivotal point in a volatile market environment, AMI Press Release, Chemical Recycling, Global Status 2022, 2022. október

New Catalytic Recycling Process to Deconstruct Mixed Plastics into its Monomers, Omnexus, 2023 november,

<https://omnexus.specialchem.com/news/industry-news/recycling-mixed-plastics-into-monomers-000232287>