

## Szuperkritikus vízzel történő műanyagbontás teheti hatékonyabbá a kémiai újrahasznosítást

A szuperkritikus víz nagyfokú reakcióképességének köszönhetően a hagyományos pirolízisnél hatékonyabb lebontási folyamatok érhetők el, amelyek eredményesen alkalmazhatók műanyag hulladékok kémiai hasznosításánál. Az anyagában történő hasznosítás szempontjából problémásnak számító szennyezettebb, vagy többkomponensű hulladékok esetében az új hidrotermikus eljárás kedvező alternatíva lehet.

*Tárgyszavak: műanyag hulladék, szuperkritikus víz, hidrotermikus eljárás, körkörös gazdaság*

A szuperkritikus állapotú vizet manapság egyre gyakrabban használják ipari eljárásokban: például vegyipari hulladékok, mérgek és robbanószerkezetek oxidatív ártalmatlanítására. A víz 373 °C hőmérséklet és 221 bar nyomás felett kerül szuperkritikus állapotba. Ekkor a magas hőmérséklet miatt a molekulák mozgási energiája jelentősen növekszik, aminek következtében a közöttük lévő hidrogénkötések nagyrésze felbomlik. A magányos molekulákból álló közeg tulajdonságai megváltoznak, így az nem feleltethető meg egyértelműen sem folyadék, sem gáz halmazállapotúnak, leginkább „folyadékszerű gázként” írható le. Az 1. táblázat a különböző halmazállapotú közegek néhány tulajdonságát, a sűrűségük, a viszkozitásuk és a diffúziós együtthatójuk tipikus értéktartományát hasonlítja össze. A hidrogénhidak szuperkritikus állapotban történő felszakadásának fontos következménye, hogy a közeg reakcióképessége rendkívüli mértékben növekszik, ezért nagyon sokféle szerves anyag oldására alkalmas lehet, beleértve a műanyagokat is.

1. táblázat.

Gázok, folyadékok és szuperkritikus folyadékok viszkozitása, sűrűsége és diffúziós együtthatója

Közeg	Sűrűség [g·cm <sup>-3</sup> ]	Viszkozitás [Pa·s]	Diffúziós együttható [cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Gáz	(0,6–2,0)·10 <sup>-3</sup>	(1,0–3,0)·10 <sup>-5</sup>	0,1–1,0
Szuperkritikus folyadék	0,2–0,9	(1,0–3,0)·10 <sup>-4</sup>	(0,1–5,0)·10 <sup>-4</sup>
Folyadék	0,6–1,6	(0,2–3,0)·10 <sup>-3</sup>	(0,2–3,0)·10 <sup>-5</sup>

Az Egyesült Királyság Birminghami Egyetemének kutatói új módszert fejlesztettek a műanyag hulladékok kezelésére, kihasználva a szuperkritikus közeg gázszerű behatolási képességét az anyagokba, aminek segítségével hatékony lebontás érhető el. A folyamat során minimális a károsanyag kibocsátás, nincsenek oldószermaradványok, és az eredményül kapott termékek új műanyagok gyártásához használhatók. A fejlesztésbe a **Stopford** vállalatot is bevonták, azzal a céllal, hogy dolgozzanak ki a kevert műanyag csomagolási hulladékok hasznosítására alkalmas méretnövelt technológiát. A „CircuPlast” névre keresztelt hidrotermikus eljárás során a más módon gazdaságosan már nem újrahasznosítható műanyag hulladékból értékes vegyipari alapanyagok előállítását tervezik. Ez tehát olyan környezetbarát technológia lesz, amely ipari

oldószerek helyett „szuperkritikus” vizet használ a műanyag hulladék újrahasznosítására, a körkörös gazdaság szempontjait figyelembe véve. A technológia fenntartható alternatívát kínál majd a fosszilis olajból származó benzinnel jellegű alapanyagok kiváltására, járulékos szén-dioxid-kibocsátás nélkül. A 10 000 tonna/év kapacitású modulokban tervezett „CircuPlast” technológia a meglévő hulladékkezelési infrastruktúrák mellé helyezhető, lehetővé téve nagy értékű vegyi anyagok előállítását alacsony értékű hulladékokból.

Hasonló fejlesztésen dolgozik **LG Chem**, a dél-koreai **LG Group** vegyipari egysége is, akik 20 000 tonna éves kapacitású műanyag-újrahasznosító üzemét építik, szuperkritikus vízzel működtetett pirolízis technológiára alapozva. A **Mura Technology** brit vállalattal együttműködve 2024-re szeretnék felépíteni a gyárukat a Szöultól mintegy 80 kilométerre délnyugatra fekvő Dangjinben. Az új pirolízis üzemben a műanyagok lebontása sokkal gyorsabban megy majd végbe, mint a hagyományos, magas hőmérsékletű technológiánál, ahol az 500–800 °C között történő hőbontás időigénye jelentősnek számít. A tervek szerint a gyárban tíz tonna műanyag-hulladék feldolgozása esetén kilenc tonna újrahasznosított olajat nyerhetnek. A Mura Technology több más nagy alapanyaggyártóval is stratégiai megállapodást kötött az általuk fejlesztett *HydroPR* (Hydrothermal Plastic Recycling Solution – Hidrotermikus műanyag újrahasznosítás) technológia hasznosítására. A **Dow** vállalattal együttműködve több, egyenként akár 120 000 tonna kapacitású újrahasznosító létesítményt építését is tervezik az Egyesült Államokban és Európában – együttesen mintegy 600 000 tonna éves kapacitással. A világ első, a Mura HydroPR folyamatát alkalmazó üzeme Teesside-ban (Egyesült Királyság) található, s várhatóan 2023-ban fog működésképp lépni évi 20 000 tonnás gyártóssal, ami 100%-ban újrahasznosított alapanyaggal látja majd el a Dow-t.

A különböző műanyag típusok bomlási folyamatai eltérőek a szuperkritikus vízzel végzett pirolízis során. A polipropilén a folyamat első szakaszában rövid időn belül (<0,5 óra) oligomerekké bomlik. Ezután a telítetlen alifás anyagok többsége ciklizációval ciklikus vegyületekké alakul, kis részükből pedig telített alifás (paraffin), illetve aromás anyagok is keletkezhetnek. A PVC hidrotermikus kezelésénél a depolimerizáció első lépése a hidrogén-klorid cipzár-szerű eliminációja a molekulalánchról, amivel egyidejűleg a PVC láncokban konjugált poliének képződnek. A keletkező hidrogén-klorid eltávolítható, mivel vízben jól oldódik, így megakadályozható a szerves klórvegyületek képződése. A második lépés a polimer lánchasadás, végül pedig aromás molekulák képződnek a lánctörések rekombinációjával. A PET-hulladék szuperkritikus víz közegben végbemenő hidrolízise során elsődleges terméként tereftálsav (TPA) keletkezik. Ez víztiszta PET-hulladék esetén kb. 90%, zöld PET hulladék esetén pedig kb. 85%. A PET-hulladékból nyert TPA tisztasága közel 100%. A folyamat során másodlagos termékek is megjelennek, például benzoészav, 1,4-dioxán, acetaldehid, izoftálsav (IPA) és szén-dioxid.

A szuperkritikus folyadékokkal történő lebontás az elektronikai hulladékok kezelésénél is ígéretes megoldásnak tűnik. A mérgező vegyületek alkalmazását mellőző technológia előnye – a gyorsasága mellett – az, hogy használatával a fémeket is vissza lehet nyerni, továbbá a degradáció során nem keletkeznek nitrogén-oxidok, dioxinok, illetve korom. Az eljáráshoz – alacsony költségük miatt – elsősorban szuperkritikus vizet, illetve szuperkritikus széndioxidot használnak, de kísérleteztek már szuperkritikus alkoholokkal és egyéb oldószerekkel is. Ezek a közegek a folyamat során 90%-ban visszanyerhetők és újrahasznosíthatók. Ezzel a technológiával olyan nehezen kezelhető e-hulladékok, mint a nyomtatott áramköri lapok, kondenzátorok vagy a közvetlen hozzáférésű memóriák (random access memory – RAM) hasznosítása is megvalósítható. Az ilyen típusú hulladékok sokszor nagyrésztben hőre nem lágyuló fenol- vagy epoxigyantából

készülnek, számos esetben brómozott, égésgátolt kivitelben. A szuperkritikus vízzel történő bon-tás során az alkatrészek fémtartalma (arany, alumínium, réz, tantál) 99%-ban visszanyerhető, illetve a debrómózás is megvalósul, a brómszármazékok nagyrésze a visszamarad a vízben.

Összeállította: dr. Ronkay Ferenc

Sherman L. M.: A New ‘Supercritical Water’ Approach to Recycling Plastic Packaging Waste = *Plastics Technology*, 2022.

<https://www.ptonline.com/blog/post/a-new-supercritical-water-approach-to-recycling-plastic-packaging-waste>

Sae-Jin P: LG Chem to build supercritical pyrolysis plant to recycle plastic waste = *Aju*.

<https://www.ajudaily.com/view/20220118104041771>

Colnik M., Knez Z, Skerget M.: Sub- and supercritical water for chemical recycling of polyethylene terephthalate waste = *Chemical Engineering Science* 233, 2021, 116389.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116389>

Damayanti D., Saputri D.R., David Marpaung D.S.S., Yusupandi D., Sanjaya A., Simbolon Y.N., Asmarani W., Ulfa M., Wu H-S.: Current Prospects for Plastic Waste Treatment = *Polymers*, 2022, évf. 14, 3133.

<https://doi.org/10.3390/polym14153133>

Preetam A., Jadhao P.R., Naik S.N., Pant K.K., Kumar V.: Supercritical Fluid Technology – An Eco-friendly Approach for Resource Recovery from E-waste and Plastic waste: A Review = *Separation and Purification Technology*, 2023, évf. 304, 122314.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122314>