

Hibrid habosító rendszer alkalmazhatóságának vizsgálata vegyes műanyag hulladék mátrixban

Investigation of the Applicability of a Hybrid Foaming System in a Mixed Plastic Waste Matrix

SZABÓ Veronika Anna¹, Prof. Dr. habil DOGOSSY Gábor²

¹ Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Audi Hungaria Járóműmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, Egyetem tér 1, H-9026 Győr, Magyarország, +3696 /503400 szabo.veronika.anna@ga.sze.hu

² Járóműgyártási Tanszék, Audi Hungaria Járóműmérnöki Kar, Széchenyi István Egyetem, Egyetem tér 1, H-9026 Győr, Magyarország, +3696 /503400 dogossy@ga.sze.hu

Abstract

In our research, we investigated the chemical foaming of mixed plastic waste granulate (VMHD) using a combination of endothermic and exothermic foaming agents. We found that increasing the exothermic foaming agent improved cell distribution but reduced flexibility and impact resistance. The highest porosity (30.04%) was achieved with 0.5% endothermic and 3.5% exothermic foaming agents. Our results indicate that the proper ratio of foaming agents is crucial for optimizing the morphological properties of the material.

Keywords: Hybrid Foaming, Porosity Optimization, Recycled Polymer Composites

Kivonat

Kutatásunkban vegyes műanyag hulladék darálék (VMHD) kémiai habosítását vizsgáltuk endoterm és exoterm habosítószer kombinálásával. Megállapítottuk, hogy az exoterm habosítószer növelése javítja a cellaeloszlást, de csökkenti a rugalmasságot és az ütésállóságot. A legnagyobb porozitást (30,04%) a 0,5% endoterm és 3,5% exoterm habosítószerrel értük el. Eredményeink alapján a megfelelő habosítószer-arány kulcsfontosságú az anyag morfológiai tulajdonságainak optimalizálásában.

Kulcsszavak: Hibrid Habosítás, Porozitás Optimalizálás, Újrahasznosított Polimer Kompozitok

1. IRODALOM

A műanyagszennyezés napjaink egyik legsúlyosabb környezeti problémája, amely évente 300 millió tonna hulladékot eredményez világszerte, de ennek csupán 9%-át hasznosítják újra [1, 2]. A fennmaradó műanyag jelentős része lerakókba kerül vagy a természetben halmozódik fel, súlyosan károsítva az ökoszisztémákat. Különösen aggasztó a tengeri hulladék növekedése: például a Csendes-óceánon található szemétsziget kiterjedése eléri az 1,6 millió négyzetkilométert, és legalább 79 ezer tonna műanyagot tartalmaz [3]. A probléma sürgős beavatkozást igényel a hulladékgazdálkodás fejlesztésével és a szabályozások szigorításával.

Az Európai Unió több lépést tett a műanyaghasználat csökkentésére és az újrahasznosítás növelésére. Az Átfogó Hulladékgazdálkodási Irányelv célja, hogy 2025-re az EU-tagállamok 55%-os újrahasznosítási arányt érjenek el, amelyet 2035-re tovább kell növelni. Az Európai Bizottság 2018-ban elfogadott műanyagstratégiája szerint 2030-ra minden műanyag csomagolásnak újrahasznosíthatónak kell lennie [3].

Jelen kutatásunkban az egyre nagyobb mennyiségben keletkező vegyes műanyag hulladék darálék (VMHD) újrahasznosítására teszünk kísérletet. A VHMD különböző polimerekből álló, aprított műanyag

keverék, amely újrahasznosításra készül. Összetétele heterogén, ami megnehezíti az egységes minőségű alapanyag előállítását. A kutatás alapja a kémiai habosítás.

A polimerhabok olyan kétfázisú rendszerek, amelyekben a különböző méretű gázbuborékok találhatók a polimer mátrixban. Számos hőre lágyuló polimer és bizonyos hőre keményedő polimerek is alkalmasak habosításra. A habosítási technológiák három fő kategóriába sorolhatók: mechanikai, fizikai és kémiai módszerek. A kémiai habosítás során a hozzáadott habosítószer lebomlásával nagy mennyiségű gáz keletkezik, amely létrehozza a szerkezetben a gázbuborékokat. A kémiai habosítószer fajtájától függően különböző gázok (pl. CO, CO₂, N₂, NH₃) szabadulnak fel [4].

A kémiai habosítószeres szerves vagy szervetlen szilárd vegyületek, amelyek magas hőmérséklet hatására bomlanak le az ömledékben. A habosítószer bomlásának következtében gócpontok jelennek meg, majd ezeken a pontokon gázbuborékok alakulnak ki. A gázbuborékok megszilárdulását követően létrejön a cellaszerkezet az anyagban. A kialakuló cellák különállóak, a cellasűrűség pedig egyre inkább nő a mag felé haladva, ezzel kialakítva az integrál abszorbát [5].

A habosítási eljárások közül a kémiai habosítószerekkel történő eljárás különösen hatékony hőre lágyuló polimereknél, mivel a habosítás hőreakción alapuló (endoterm vagy exoterm) habosítószer segítségével történik. Ez a módszer fröccsöntés során is alkalmazható [6].

A megfelelő habosítás érdekében a fröccsöntött termék térfogata növelhető a légzőszerszám-technika alkalmazásával [7]. Ennél az eljárásnál a habosítószert tartalmazó polimert a szerszámüregbe injektálják, ahol a hűlés során először egy kompakt felületi réteg képződik. Ezt követően a szerszám kissé kinyílik, növelve a rendelkezésre álló teret és csökkentve a nyomást. Mivel a termék belsejében a polimer még ömledék állapotú, a belső gázbuborékok tovább tudnak tágulni.

Az endoterm és exoterm habosítószeres együttes alkalmazása egy innovatív megközelítés [8, 9]. Ez a módszer javítja a cellaeloszlás egyenletességét és növeli a cellák számát a két komponens specifikus kölcsönhatásának köszönhetően. A hibrid habosítás során az exoterm habosítószer hőtermelése és az endoterm összetevő hőelnyelése egyensúlyt teremt a polimer mátrixban, ezáltal optimalizálva a abszorbát kialakulását. Továbbá, az endoterm habosítószer góképző hatású is lehet, amely hatékonyabb és gazdaságosabb habgyártást tesz lehetővé [10].

Korábbi kutatásunkban [11] az endoterm és exoterm hibrid habosítás hatását vizsgáltuk az újrahasznosított PET (rPET) habok morfológiai tulajdonságaira. Eredményeink alapján a hibrid habosítás jelentősen javította a cellaszerkezet homogenitását és növelte a cellaszámot, amely hozzájárult a habok sűrűségének csökkenéséhez. A kizárólag endoterm habosítószert tartalmazó minták ezzel szemben kevésbé homogén cellaszerkezetet mutattak. Az exoterm habosítószer hozzáadása már 0,5%-os koncentrációban is jelentős javulást eredményezett a cellák egyenletes eloszlásában, míg 1%-os exoterm habosítószer mellett a porozitás növekedett. Ezzel szemben a magasabb exoterm habosítószerkoncentráció már negatívan befolyásolta mind a cellaszerkezetet, mind a porozitást.

Jelen cikkünkben a hibrid habosítás alkalmazhatóságát kívánjuk tesztelni vegyes műanyag hulladék darálékon. A gyártás követően megvizsgáltuk a gyártott minták CT felvételeit.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kutatás során felhasznált vegyes műanyag hulladék darálékot a Jasz-Plasztik Kft. biztosította (Jászberény, Magyarország). Ennek hozzávetőleges összetétele 75-85% HDPE és 15-25% PP a gyártó vizsgálatai alapján.

A habosítás a Tramaco (Tornesch, Németország) termékeivel történt. Az első habosítószerünk a Tracel IM 7200 endoterm vegyület volt, amely 120 mL/g gázkibocsátással, 70%-os habosítószer-tartalommal, és 220 °C-os bomlási hőmérséklettel rendelkezett. A második habosítószerünk, a Tracel IM 3170 MS exoterm vegyület, 50 mL/g gázkibocsátást és 170 °C-os bomlási hőmérsékletet mutatott. A két habosítószer kombinációjának célja a cellaszerkezet homogenitásának növelése volt, különös tekintettel a abszorbát és a cellaméret egyensúlyára. A különböző minták anyagösszetételét az 1. táblázat tartalmazza.

A vizsgált minták anyagösszetétele

1. táblázat

	VMHD [m%]	Tracel IM 7200 [m%]	Tracel IM 3170 MS [m%]
Ref	100	0	0
EN40EX0	96	4	0
EN35EX5	96	3,5	0,5
EN30EX10	96	3	1

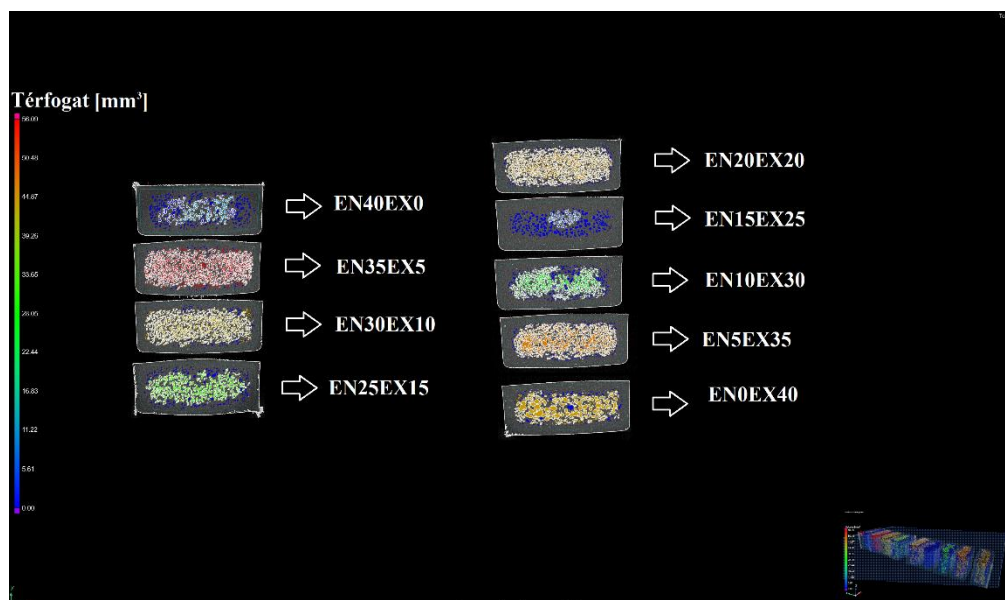
EN25EX15	96	2,5	1,5
EN20EX20	96	2	2
EN15EX25	96	1,5	2,5
EN10EX30	96	1	3
EN5EX35	96	0,5	3,5
EN0EX40	96	0	4

A minták belső szerkezetét ipari komputertomográfias (CT) berendezéssel vizsgáltuk. A VMHD hab elemzéséhez egy Nikon XT H 225 ST CT szkennert használtunk 6 μm -es felbontással. Az egyes vizsgálatok átlagosan 24 percig tartottak, és 1500 vetületet rögzítettünk képenként két expozíciós beállítással. A szkenneléshez 165 kV feszültséget és 65 μA áramerősséget alkalmaztunk. Az adatok elemzéséhez és vizualizálásához a VG Studio Max 2022/2220 szoftvercsomagot használtuk.

A CT-vizsgálattal részletes 3D képet generáltunk a mintákról, amely lehetővé tette a cellaszerkezetek vizsgálatát. A cellák térfogatát kivonva a teljes minta térfogatából, meghatároztuk a fennmaradó szilárd anyagmennyiség térfogatát. A minta sűrűségét úgy számítottuk ki, hogy a teljes anyagtömeget elosztottuk ezzel a korrigált térfogattal, így pontos értéket kaptunk a belső porozitás figyelembevételével.

3. CT EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

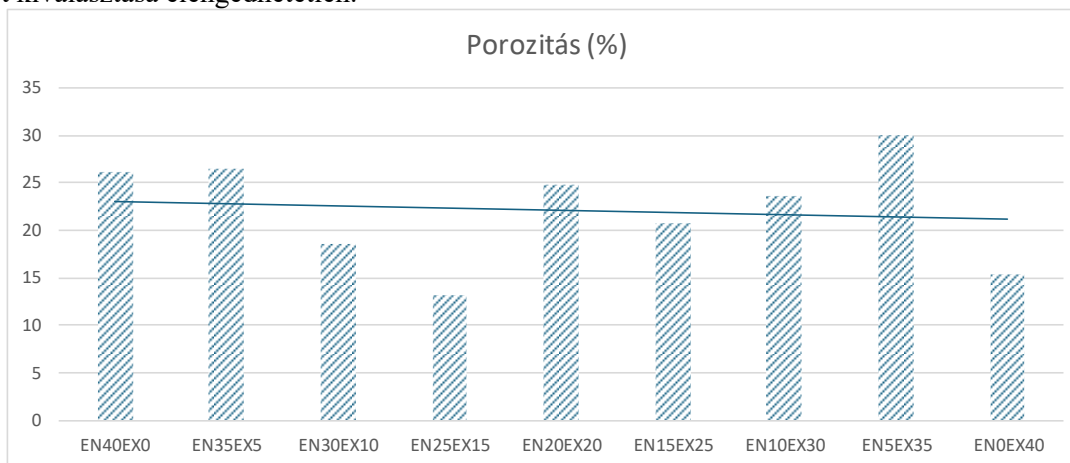
Az 1. ábrán a különböző anyagösszetétel mellett készített CT felvételek láthatók. A keresztmetszeti képek igen vegyes eredményeket mutatnak. Az endoterm és exoterm habosítók külön-külön sokkal kisebb mértékű és több összeomlott cellából álló habosodást értek el, mint a legtöbb kevert típus. Ez alátámasztja azt a felvetésünket, miszerint a hibrid enxoterm (exoterm-endoterm) habosítókkal jobb habosodást tudunk elérni. A legjobban habosodott keresztmetszetet az EN35EX5, EN30EX10, EN20EX20 és az EN5EX35 minták érték el. A többi minta esetén kisebb habosított mag jóval nagyobb cellákkal alakult ki. A képek alapján az rajzolódik ki, hogy a habosítók aránya nagyban befolyásolja a kialakuló cellák méretét és sűrűségét. H. A. Kharbas és társai termoplasztikus poliuretán habosítással foglalkoztak, amihez kémiai és fizikai habosítót alkalmaztak. Az eredményeik szerint a 3% kombinációja a mikrocellás és szuperkritikus folyadékos habosítás adta legsűrűbb habosított cellaszerkezetet [12].



1. Ábra: Keresztmetszeti CT felvételek a habosított mintákról

Az 2. ábrán a CT teszt eredményei alapján a porozitás látható. Az eredmények alapján a tiszta endoterm kémiai habosítóval készült próbatest, melynek porozitása 26%-os arányra adódott, ami jobbnak tűnik a tiszta exotermhez képest, ami 15,5% porozitást mutatott. Azonban minimálisan hozzáadott endoterm habosítóval az EN5EX35 minta elérte a 30%-os porozitást, a legnagyobb értéket a többi minta között, ami magán a CT felvételen is látható. Fordított esetben, a EN35EX5 esetén nem változott a porozitás a tiszta

endoterm habosítóhoz képest, viszont tovább növelve, a porozitás csökken 18 majd 13%-ra. Fele-fele endoterm-exoterm arány esetén a porozitás visszaugrik 24.5%-os arányra, de továbbra sem éri el a tiszta endoterm kémiai habosító szintjét, tovább növelve az exoterm arányt pedig 21, majd 24%-os porozitást kapunk. Az eredmények alátámasztják a megfelelő habosító arány kiválasztásának fontosságát, illetve kiemelik a jelentős különbséget a két habosítószer hatása közt. Kmetty és társai [13] Natureworks Ingeo 2003D politejsav habosításához összehasonlították endoterm és exoterm habosítószer hatását és arra a következtetésre jutottak, hogy az exoterm habosító segítségével nagyobb, 55%-os porozitást tudtak elérni, míg endoterm esetén ez csak 34% körüli volt. A nagy eltérés a feldolgozási hőmérséklettel indokolták, és ez tükrözi a mi eredményünket is, miszerint az endoterm habosító számára a megfelelő feldolgozási hőmérséklet kiválasztása elengedhetetlen.



2. Ábra A különböző habosított minták porozitása.

4. KONKLÚZIÓ

A jelen kutatás célja a hibrid endoterm–exoterm habosítás alkalmazhatóságának vizsgálata volt vegyes műanyag hulladék darálék (VMHD) újrahásznosításában. Az eredmények azt mutatták, hogy a megfelelő habosítószer-arány kulcsszerepet játszik a habszerkezet homogenitásának kialakításában. A CT-vizsgálatok alapján a legnagyobb porozitási értéket az EN5EX35 minta érte el, amely az endoterm és exoterm habosítás kombinációjának előnyeit kihasználva egyenletesebb cellaszerkezetet eredményezett. Az eredmények azt támasztják alá, hogy az optimálisan megválasztott endoterm–exoterm arány lehetővé teszi a magas porozitást, így a vegyes műanyag hulladék hatékony újrahásznosítását. A hibrid habosítás alkalmazása ígéretes megoldás lehet olyan könnyű habosított anyagok előállítására, amelyek potenciálisan felhasználhatók különböző ipari területeken.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk kifejezni őszinte hálánkat Ronkay Ferencnek és csapatának a Jász Plasztiknál az alapanyag biztosításért és a kiemelkedő szakmai támogatásukért.

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖP-24-3-I-SZE-20 KÓDSZÁMÚ EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] United Nations Environment Programme, International Solid Waste Association, Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning Rubbish into a Resource, 2024. Elérhető: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939> (Utolsó letöltés: 2024. február 25.).
- [2] Bremer, C., Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022. Elérhető: <https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2022/02/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.html> (Utolsó letöltés: 2024. február 25.).
- [3] Európai Parlament Kommunikációs Főigazgatóság, A műanyag hulladék mennyisége és újrahasznosítása az EU-ban (infografika), 2024. június 25. Elérhető: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hu/article/20181212STO21610/a-muanyag-hulladek-mennyisege-es-ujrahasznositasa-az-eu-ban-infografika> (Utolsó letöltés: 2024. február 25.).
- [4] Wypych, G., Handbook of Foaming and Blowing Agents, 2nd ed., ChemTec Publishing, Toronto, Canada, 2022, p. 299.
- [5] Dogossy, G., Polimer Habok. In: Fejezetek Nemfémek Anyagok Legújabb Járműipari Kutatási Területeiből; Zsoldos, I. (szerk.), Universitas Győr, Győr, 2015, pp. 212–265.
- [6] Czvikovszky, T., Nagy, P., Gaál, J., A Polimertechnika Alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000, p. 453.
- [7] Akkoyun, M., Badem, İ., Öztoksoy, M.E., Aslan, Y., Polypropylene/Chemical Blowing Agent Foams: Effect of the Injection Speed and Core Back Distance on Microstructure and Mechanical Properties, International Journal of Engineering Research and Development, 2020, 12(6), pp. 638–647.
- [8] Alipour, M., Saeb, M.R., Sadati Tilebon, S.M., Ataefard, M., Reactive extrusion foaming of poly(lactic acid): Tailoring foam properties through controlling in-process chemical reactions, Iranian Polymer Journal, 2024, 33, pp. 1031–1046.
- [9] Bledzki, A.K., Faruk, O., Effects of the chemical foaming agents, injection parameters, and melt-flow index on the microstructure and mechanical properties of microcellular injection-molded wood-fiber/polypropylene composites, Journal of Applied Polymer Science, 2005, 97, pp. 1090–1096.
- [10] Li, Q., Matuana, L.M., Foam extrusion of high-density polyethylene/wood-flour composites using chemical foaming agents, Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88, pp. 3139–3150.
- [11] Szabó, V.A., Fekete, G., Dogossy, G., Endothermic–Exothermic Hybrid Foaming of Recycled PET Blends, Journal of Composite Science, MDPI, 2024, 8(10), p. 383.
- [12] Kharbas, H. A., McNulty, J. D., Ellingham, T., Comparative study of chemical and physical foaming methods for injection-molded thermoplastic polyurethane, Journal of Cellular Plastics, Sage Publications, 2017, 53(4), 373–388.
- [13] Kmetty, Á., Litauszki, K., Réti, D., Characterization of Different Chemical Blowing Agents and Their Applicability to Produce Poly(Lactic Acid) Foams by Extrusion, Applied Sciences, MDPI, 2018, 8, 1960.