

Többrétegű italos kartondoboz hulladék alkalmazása műanyag alapú energiaelnyelő szendvicsszerkezetekben

Incorporation of multi-layer beverage carton waste in energy-absorbing composite sandwich structures

NAGY Róbert^{1,2}, Dr. TÓTH Csenge¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3, Tel: 06-1-463-2003, 06-1-463-1527, pt@pt.bme.hu, <https://www.pt.bme.hu>
²HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., 06-1-463-2003, 06-1-463-1527, <https://www.pt.bme.hu/kutato/index.php?l=m>
robertnagy@edu.bme.hu

Abstract

The recycling of multi-layer beverage cartons presents significant challenges and is often only feasible with substantial environmental impact. In this study, we present a mechanical recycling process in which beverage carton waste is directly incorporated as core filler into lightweight, 3D printed sandwich structures without prior separation of components. Charpy impact bending tests revealed that waste-filled sandwich structures exhibit substantially higher energy absorption capacity compared to unfilled lattice structures, with performance values approximately equivalent to those of samples produced solely from beverage carton pulp.

Keywords: packaging, paper pulp, sandwich structure, impact testing, energy absorption

Kivonat

A többrétegű italos kartondobozok újrahasznosítása jelentős kihívás, és sokszor csak jelentős környezeti terhelés mellett valósítható meg. Tanulmányunkban egy mechanikai újrahasznosítási eljárást mutatunk be, amelyben az italos kartondoboz hulladékot közvetlenül könnyű, 3D nyomtatott szendvics-szerkezet magjába töltjük be az összetevők szétválasztása nélkül. A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat kimutatta, hogy a hulladékkal töltött szendvics-szerkezetek jelentősen nagyobb energia-elnyelési kapacitást mutatnak az üres rácsos szerkezethez képest, értékei körülbelül azonosak a csak italos kartondoboz pépből készült mintákéval.

Kulcsszavak: csomagolás, papírpép, szendvics szerkezet, ütővizsgálat, energiaelnyelés

1. BEVEZETÉS

A fenntarthatóság és az energiahatékonyság ma már elengedhetetlen a mindennapi életünkben. A Föld erőforrásai korlátozottak, ezért kulcsfontosságú a hatékony körforgásos gazdaságok és technológiák fejlesztése, támogatása. Emellett elengedhetetlen a környezetszennyezés csökkentése, amelyben a megfelelő hulladékgazdálkodás kiemelkedő szerepet játszik. Az Európai Unió (EU) hulladékgazdálkodási politikája az erőforrás-hatékonyság növelésére és a körforgásos gazdaság megvalósítására törekszik. Az EU célkitűzései közé tartozik, hogy 2030-ra az összes települési hulladék legalább 60%-át újrahasznosítsák, 2035-re pedig ez az arány elérje a 65%-ot [1].

Bizonyos hulladékok több komponensből állnak, pl. fémből, műanyagból és papírból. Ilyenek a többrétegű fóliák, italos kartonok vagy elektronikai hulladékok. Ezek újrahasznosítása – főként a komponensek szétválasztásának nehézsége miatt – komoly kihívást jelent az iparág számára. A különböző hulladékok termoplasztikus műanyagokban töltőanyagként való felhasználása újszerű megközelítés, amely csökkenti a primer alapanyagok igényét, így elősegíti a fenntarthatóságot. Tóth és társai [2] összefoglalója szerint többféle hulladék felhasználása lehetséges, például mezőgazdasági melléktermékek (például rizshéj, búzaszalma vagy biomasszából készülő bioszén), ipari melléktermékek (például pernye, salak vagy újrahasznosított üveg) és polimer, illetve kompozit hulladékok (például elektronikai hulladék, őrölt gumiabroncs). Számos további forrás foglalkozik még összetett hulladékok újrahasznosításával [3-7].

A csomagolóiparban számos megoldással találkozunk, ahol polimer anyagot papírral vagy fémmel kombinálnak különböző célokból. Erre a legközismertebb példa az italos kartondoboz, amelybe például tejtermékeket és gyümölcsleveket töltenek. Az aszeptikus, tehát alumínium réteget tartalmazó, italos kartondobozok jellemző összetétele: 75% kartonpapír, 20% polietilén (PE) és 5% alumínium (Al). Szabó és társa [8] vizsgálta a többrétegű italskartonok újrahasznosítását. Ennek során megmérték az 1 literes aszeptikus és nem aszeptikus Tetra Pak doboz anyagösszetételét tömegméréses módszerrel. Az eredményeik szerint az alumíniumot tartalmazó doboznak a PE tartalma átlagosan 16,61% és 5,61% alumínium van benne, míg az alumínium-mentesben átlagban 11,43% a PE tartalom.

Az italos kartonok újrahasznosítására két jellemző mód van. Az egyik során nem választják szét az összetevőkre, azokat együtt hasznosítják, míg a másik, gyakoribb, módszer szerint egy pépesítő eljárással (hidropulping) a cellulózt eltávolítják a polimer és alumínium rétegtől. Robertson összefoglalója [9] szerint a legelterjedtebb módszer a hidropulperes feldolgozás, amellyel a karton súlyának körülbelül 75%-át kitevő papírszalakat nyerik vissza. Ennek a technológiának jelentős a vízigénye, ezért nem mindenhol alkalmazható. Többrétegű italskarton hulladék anyagában való újrahasznosításával további források is foglalkoznak [10-12].

A korábban ismertetett információkra alapozva a kutatásunknak az alábbi céljai voltak:

- Italos kartondoboz hulladék teljes, anyagában való újrahasznosítása.
- Értéknövelt, funkcionális termék létrehozása, egyszerű és környezetkímélő technológiákkal.

2. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK

A kísérletekhez a tanszéken és otthon gyűjtött, különböző márkájú (TetraPak, Elopak) 1 literes tejesdobozokat használtuk fel. Az egyszerűbb feldolgozás érdekében eltávolítottuk a műanyag kupakokat és rögzítéseiket. Egy teljes doboz átlagos tömege 34,3 gramm volt, ebből a kupak és rögzítése (ha volt) 3 grammot tett ki. Ennek az alapanyagának a további, fontosabb jellemzőit az irodalomkutatásban ismertettük.

A 3D nyomtatáshoz a Ingeo 4043D jelű PLA-ból készült filamentet használtunk. Ennek a fontosabb adatait és ajánlott feldolgozási paramétereit a 1. táblázat foglalja össze. A gyártói adatlap szerint ez a biopolimer kifejezetten alkalmas 3D nyomtatásra mivel jól tapad a munkaterületre és a zsugorodáskor fellépő deformáció is alacsony.

Az Ingeo 4043D PLA fontosabb adatai

1. táblázat

Fizikai paraméterek	Ingeo 4043D PLA	Vizsgálati eljárás
Olvasási hőmérséklet tartomány (°C)	145-160	D3418
Üvegesedési hőm. tart. (°C)	55-60	D3418
Sűrűség (g/cm ³)	1,24	D792
Ajánlott ömledékhőmérséklet (°C)	210	-

A próbatestek alsó- és felsőrétegét, a mag rácsát, valamint a referencia PLA próbatestek részeit a tanszéki laboratóriumi CraftBot Plus 3D nyomtatókkal állítottuk elő. A G-code fájlokat UltiMaker Cura szoftverrel generáltuk. A nyomtató jellemzőit a 2. táblázat foglalja össze. A szélső lemezek és a magrácsok mind 158 mm x 158 mm területűnek nyomtattam, hogy a préskeretekbe könnyen be lehessen helyezni azokat. A felső és az alsó lemezek 1 mm vastagok voltak és 50%-os kitöltöttséggel nyomtattam, míg a magrácsok rendre: 2, 3, 4, 6 és 8 mm vastagságúak és 10%-os kitöltöttségűek. Minden nyomtatásnál a triangles, avagy háromszöges rácsgeometriájú kitöltést alkalmaztam. A töltetlen referencia próbatestek esetén az egyszerűbb gyártás és a kevesebb anyagvesztés érdekében a nyomtatás során már a mérésekhez szükséges, vastagságtól függő, méretű előgyártmányokat nyomtattam. További egyszerűsítés volt, hogy az felsőréteget és a magot egyben nyomtattam ki és csak az alsó réteget kellett így rápréselni az előgyártmányokra. Az alsó és felső rétegek így csak 0,5 milliméter vastagok voltak, de 100%-os kitöltéssel rendelkeztek, míg a mag rész nem változott.

A szendvicsszerkezetek és a referencia próbatestek gyártásához a tanszéki laborban található Teach-Line Platen Press 200E hidraulikus prést használtuk. Ennek a berendezésnek:

- a maximális nyomása: 150 bar,
- a maximális hőmérséklete: 300°C.

A használt keretek 160 mm x 160 mm területűek voltak, illetve 2, 3, 4, 6 és 8 mm volt a vastagságuk.

A CraftBot Plus 3D nyomtató tulajdonságai	
Gyártó	CraftUnique Kft., Magyarország
Modelltér méret	250 x 200 x 200 mm
Rétegvastagság	0,2 mm
Nyomatási sebesség	30-60 mm/s
Kitöltési minta	Triangles (háromszögek)
Kitöltés	10, 50 %
Nyomatószál átmérő	1,75 mm
Fúvóka átmérő	0,4 mm

A préseléssel legyártott, majd körfűrészsel ISO 179 szabvány alapján (3. táblázat) méretre vágott és egyszer bemetszett próbatesteken Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot végeztünk a Ceast Resil Impact Junior ütvehajlító berendezéssel 2 J-os kalapáccsal. Az alátámasztási távolság a próbatest névleges vastagságának 16-szorosa volt. A berendezés méretei miatt nem tudtam szabványos méréseket végezni a 2 mm-es próbatesteken. Minden esetben 5 vizsgálatot végeztem.

Az optikai mikroszkópos vizsgálatokat az egyetemen található Keyence VHX-5000 mikroszkóppal végeztük el.

A különböző vastagságú próbatestek szabványos méretei

3. táblázat

Névleges vastagság (mm)	hosszúság (mm)	szélesség (mm)
2	40	25
3	60	25
4	80	10
6	120	15
8	160	15

3. VIZSGÁLATI MINTÁK ELŐÁLLÍTÁSA

A tanszéken, valamint otthon gyűjtött italoskartondobozokat élei mentén felnyitottuk, és amennyiben volt kupak azt és a rögzítő műanyag elemeket eltávolítottuk. Ezután langyos vízzel átmostuk a belső részt a maradék penészes, tejes szennyeződések eltávolítása érdekében. A lapokat ezután egy irodai papírvágóval kb. 2x2 cm négyzetekre vágtuk, majd kávédarálóval tíz másodpercig daráltuk. A ledarált italos kartondobozból álló felbolyhosodott anyagot a szükséges töltöttség szerint tömeg alapján kiadagoltuk dobozokba és egy éjszakára beáztattuk csapvízzel. A jobb tölthetőség érdekében az anyagot egy konyhai turmix géppel 30 másodpercig tovább pépesítettük.

A kész, 3D nyomtatott rácsokra öntöttük a kiadagolt masszát, kézzel egyenletesen eloszlatva, amennyire lehetett a cellákba préselve és közben a vizet kinyomva. Ezt követően több réteg papírtörölt tettünk rá, majd préslemez és kb. 7–8 kg-os súlyt helyeztünk fölé. A magokat így kb. 10 percig hagytuk állni, majd eltávolítottuk a súlyt, lemezt és nedves törülközt; a töltött magokat új papírtörölkre helyezve egy napig levegőn szárítottuk. Préselés előtt a péppel megtöltött rácsokat négy órán át 80 °C-on szárítottam a Yamato-DKN600 típusú szárítószekrényben.

A préselést, a töltött és csak italoskartonhulladék minták esetén, a PLA ajánlott feldolgozási paramétereit alapján 200°C-on végeztem, a préslemez és a kereteket a préselés előtt 2 percig előhevítettem a présben. Levegő buborékok elkerülése érdekében kigázosítást végeztem (3-4. lépés).

A töltött szendvicsszerkezetek préselése:

1. Előhevítés: 2 percig.
2. Az előgyártmányok rétegezése (alsó réteg + mag + felső réteg) a keretbe és behelyezése a présbe.
3. Zárás 0 bar nyomással 30 másodpercig.
4. Nyitás, majd gyorsan zárás 100 bar nyomással 30 másodpercig.

5. Nyitás, majd gyorsan zárás 200 bar nyomással 30 másodpercig.
6. Hűtés 25°C-ig nyomás alatt.
7. Nyitás, préselt lemez eltávolítása a keretből

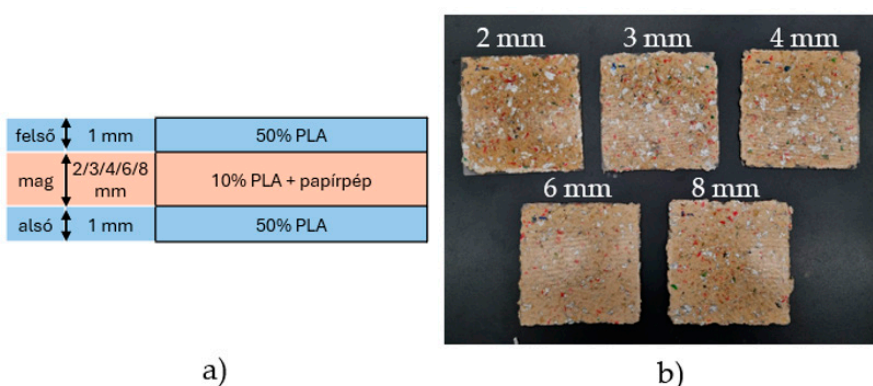
Az italoskarton hulladékkal töltött szendvicsszerkezet felépítését és az elkészült különböző magvastagságú préselt lemezeket az 1. ábra mutatja be.

A töltetlen maggal rendelkező, referencia próbatetek préselése során a felső szerszámfél nem volt fűtve, mivel ott a felső réteg és a mag már alapból egyben volt kinyomtatva. Az alsó szerszámfél 200°C-ra volt beállítva. Itt nem volt szükség kilélegeztetésre

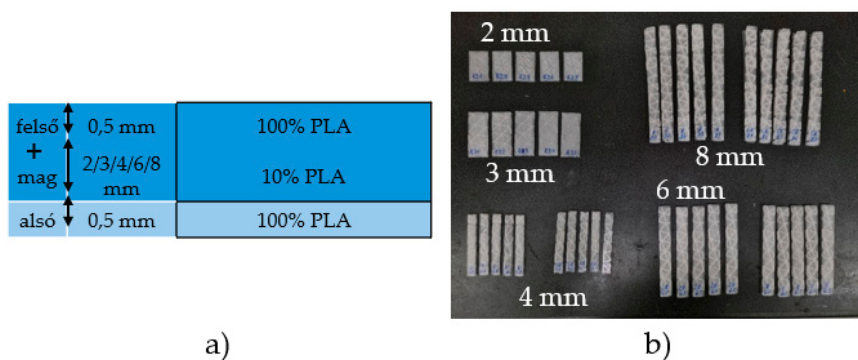
A referencia próbatetek préselése:

1. Előhevítés: 2 percig.
2. Az előgyártmányok rétegezése (alsó réteg + mag és felső réteg) a keretbe és behelyezése a présbe.
3. Zárás 50 bar nyomással 15 másodpercig.
4. Hűtés 25°C-ig nyomás alatt.
5. Nyitás, préselt próbatetek eltávolítása a keretből.

A töltetlen maggal rendelkező referencia próbatetek felépítését és az elkészült különböző magvastagságú préselt mintákat az alábbi, 2. ábra mutatja be.



1. ábra. Az a) ábra mutatja az italoskarton hulladékkal töltött szendvicsszerkezetek felépítését, a b)-n pedig a lepréselt szendvicsszerkezetű lemezek láthatóak.

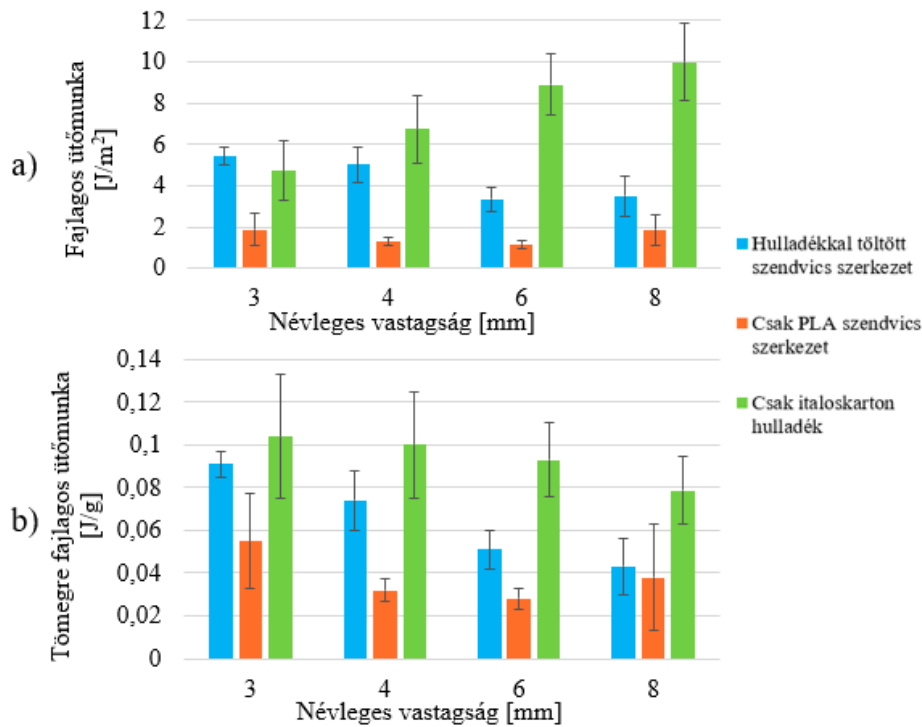


2. ábra. Az a) ábra mutatja a referencia próbatetek felépítését, a b)-n pedig a lepréselt referencia próbatetek láthatóak.

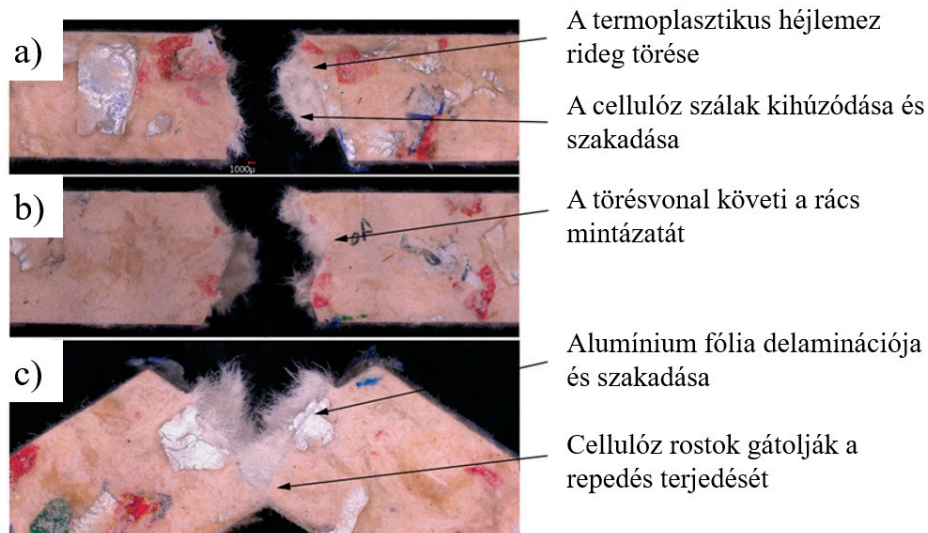
4. EREDMÉNYEK

Az 3. ábra a dinamikus terhelés alatt végzett vizsgálatok eredményeit mutatja. A fajlagos ütőmunka (3. ábra a)) a szerkezet hirtelen ütés során történő energiaelnyelő képességét jellemzi, amelyet felületre vetített energiaként lehet számítani. A jobb összehasonlíthatóság érdekében kiszámítottuk még a próbatetek tömegére fajlagosított ütőmunkát is (3. ábra b)). A hulladékkal töltött szendvicsszerkezetek nagyobb ütőszilárdságot mutatnak, amely kisebb vastagságoknál közelítőleg megegyezik az csak italoskarton-hulladékot tartalmazó minták mért értékével. Az italoskarton-hulladék túlnyomórészt papírból (70–80%) áll, amely rostos, pórusos anyag, és magas belső csillapítási képességgel rendelkezik.

A 4. ábra a) és b) a 3 mm, illetve 4 mm vastagságú, hulladékkal töltött próbatetek törésfelületeit mutatják. A termoplasztikus felső rétegek rideg törést mutatnak, míg a hulladéktöltőanyag száلكihúzóást mutat. A 6 mm vastagságú próbatetek esetében (4. ábra c)) részleges törés is megfigyelhető volt. Ebben az esetben a cellulóz szálak gátolták a repedés terjedését. Az alumíniumfólia delaminálódása és szakadása szintén megfigyelhető.



3. ábra. A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatból számított a) keresztmetszetre fajlagos ütőmunka és b) próbatetek tömegére fajlagos ütőmunka.



4. ábra. Törésminták az ütővizsgálat után; a) a termoplasztikus felső réteg rideg törése és a hulladéktöltőanyag száلكihúzóása $w=3$ mm névleges magvastagság esetén, b) a törésminta követi a magszerkezet rácsszerkezetét $w=4$ mm esetén, c) részleges törés $w=6$ mm esetén.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredmények azt mutatják, hogy az italoskartonhulladékból álló töltőanyag hatékonyan nyeli el az ütésenergiát, így a szendvicsszerkezetek potenciálisan alkalmasak lehetnek olyan alkalmazásokra, amelyek rezgéscsillapítást és ütésállóságot igényelnek, mint például a csomagolások, könnyűsúlyú panelek vagy védő elemek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem támogatása alapján valósult meg. A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-25-4-II-BME-214 kódszámú Egyetemi Kutatási Ösztöndíj programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) STARTING 153178 pályázata támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Európai Bizottság, *A new Circular Economy Action Plan*. EUR-Lex, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN> (2026.02.27.)
- [2] Tóth Cs., Molnár K., Virág Á.D., *Short fiber reinforcement in material extrusion 3D printing: A meta-analysis review with insights into sustainable alternatives*, Polymer Composites, Wiley Periodicals LLC, 2025, n/a, 1-39.
- [3] Gaikwad V., Ghose A., Cholake S., Rawal A., Iwato M., Sahajwalla V., *Transformation of E-Waste Plastics into Sustainable Filaments for 3D Printing*, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018., 6 (11), 14432–14440.
- [4] Spirio A., Arrigo R., Frache A., Tuccinardi L., Tuffi R., *Plastic waste recycling in additive manufacturing: Recovery of polypropylene from WEEE for the production of 3D printing filaments*, J Environ Chem Eng, 2024, 12, 112474.
- [5] Ezhilan J.J., Damodaran A., Ashok K.G., *Decentralized approach for incorporating waste wind turbine blades into 3D printing filaments using mechanical recycling*, Polymer Composites, 2025, 46, 2319–2332.
- [6] Rahimizadeh A., Kalman J., Fayazbakhsh K., Lessard L., *Mechanical and thermal study of 3D printing composite filaments from wind turbine waste*, Polymer Composites, 2021, 42, 2305–2316.
- [7] Wei B., Yang S., Wang Q., *Green recycling of aluminum plastic packaging waste by solid-state shear milling and 3D printing for thermal conductive composites*, Polym Adv Technol, 2021, 32, 2576–2587.
- [8] Szabó A.M., Koltai L., Fodor L., *Tetra Pak csomagolóanyagok újrahasznosítása mechanikai- és hőenergiával*, Papíripar, 2013, LVII, 8–14.
- [9] Robertson G.L., *Recycling of Aseptic Beverage Cartons: A Review*, Recycling, 2021, 6 (1), 20.
- [10] Bonadies I., Capuano R., Avolio R., Castaldo R., Cocca M., Gentile G., Errico M.: *Sustainable Cellulose-Aluminum-Plastic Composites from Beverage Cartons Scraps and Recycled Polyethylene*. Polymers, 2022, 14, 807.
- [11] Martínez-López M., Martínez-Barrera G., Barrera-Díaz C., Ureña-Núñez F., dos Reis J.M.L.: *Waste Tetra Pak particles from beverage containers as reinforcements in polymer mortar: Effect of gamma irradiation as an interfacial coupling factor*. Construction and Building Materials, 2016, 121, 1–8.
- [12] Koh-Dzul J.F., Carrillo J.G., Guillen-Mallete J., Flores-Johnson E.A.: *Low velocity impact behaviour and mechanical properties of sandwich panels with cores made from Tetra Pak waste*. Composite Structures, 2023, 304, 116380.