

# Poli(butilén adipát-ko-tereftalát) mechanikai tulajdonságainak változása fröccsöntéssel végrehajtott többszöri újrahasznosítás hatására

## Effect of repeated injection molding recycling on the mechanical properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)

JAKAB Sándor Kálmán<sup>1,2</sup>, LENDVAI László<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudomány és Gépszerkezettan Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1., jakab.sandor.kalman@sze.hu, lendvai.laszlo@sze.hu

<sup>2</sup>Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Fenntartható Polimerek és Polimer Technológiák Kutatócsoport, 9026 Győr, Egyetem tér 1.

### Abstract

*In this study, the recycling of poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT) was simulated through repeated processing by injection molding. Twelve consecutive recycling steps were carried out by repeated grinding and reprocessing of the PBAT. The effect of recycling was evaluated by tensile testing and hardness measurements. The results indicate that the yield strength, tensile modulus, and hardness remained unchanged, while the elongation at break exhibited a slight increase.*

### Kivonat

*A kutatás keretében fröccsöntéssel történő többszöri feldolgozás útján szimuláltuk a poli(butilén-adipát-ko-tereftalát) (PBAT) újrahasznosítását. A PBAT-on tizenkét egymást követő újrahasznosítási ciklust hajtottunk végre az alapanyag ismételt ledarálása és újrafeldolgozása révén, majd szakítóvizsgálattal és keménységméréssel vizsgáltuk az újrahasznosítás hatását. Az eredmények alapján a folyási feszültség, a húzó rugalmassági modulus és keménység nem változott, míg a nyúlás kismértékben megnőtt.*

**Kulcsszavak:** poli(butilén-adipát-ko-tereftalát), PBAT, biopolimer, újrahasznosítás, mechanikai tulajdonságok

## 1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A csomagolóipar által termelt hulladék mennyisége napjainkra kritikus mértéket kezd elérni. Egy 2025 áprilisában végzett, harminc napos kórházi felmérés [1] során megállapították, hogy a megrendelt eszközök – például katéterek, kötszerek, mikroszálak és egyéb neurointervenciók eszközök – össztömege 455,17 kg volt, amelynek 26%-át (118,31 kg) kizárólag csomagolóanyagok tették ki. Egyes esetekben a csomagolás tömege meghaladta a benne található termékét, miközben az eszközök közel 45%-a egyszer használatos volt. További aggályokat vet fel a gazdasági válságok által előidézett áremelkedés és az ún. „zsugorfláció” (*shrinkflation*) jelensége. Ez a gyakorlat nem csupán a fogyasztók megtévesztéséhez vezet, de a csomagolás hatékonyságának romlását és a keletkező hulladék mennyiségének növekedését is eredményezi [2].

A kissűrűségű polietilén (LDPE) az egyik leggyakrabban alkalmazott csomagolóanyag, mivel megfelelő rugalmassággal és szilárdsággal rendelkezik különböző – többek közt élelmiszerek és egyéb ipari – csomagolásokhoz [3], ugyanakkor általában egyutas csomagolóanyagként alkalmazzák, ami rendkívül pazarló felhasználása a műanyagnak. Bár újrahasznosítása lehetséges és bizonyítottan csökkenti a környezetterhelését, ez gyakran égetés útján történik (energetikai újrahasznosítás), vagy mechanikai újrafeldolgozást követően a regranolatumból a szűz anyaghoz képest nagyobb mennyiség szükséges azonos mechanikai tulajdonságok eléréséhez, ami jelentősen növeli a termék előállítás költségeit. Alternatív megoldást jelenthet egy olyan polimer alkalmazása, amely hasznos élettartamát követően viszonylag rövid idő alatt képes lebomlani anélkül, hogy károsítaná a környezetét. Az ilyen anyagokat általában a biopolimerek csoportjába sorolják.

A poli(butilén adipát-ko-tereftalát) (PBAT) egy alifás-aromás kopolimészter, amely az LDPE-hez hasonló rugalmasságáról és szakadási nyúlásáról ismert, viszont az LDPE-vel ellentétben megfelelő környezetben elhelyezve záros határidőn belül lebomlik [4]. Viszonylag alacsony szakítószilárdsága (14-35 MPa) magas szakadási nyúlással párosul (500-800%) a gyártástechnológiától és anyagminőségtől függően [5]. Ru-

galmassági modulusa  $\sim 90$  MPa [6], amely nagyfokú rugalmasságára utal. Shore D keménysége jellemzően alacsony, 28-45 közötti [7]. Alkalmazását tekintve a csomagolóiparban egyre nagyobb mértékben hasznosítják, azonban viszonylag magas előállítási költsége (3,14 USD/kg – 2024) [8] korlátozza a széles körű elterjedését, különösen egyutas termékek esetén.

A polimerek újrahasznosítási technológiái három fő csoportba sorolhatók: mechanikai, kémiai és energetikai hasznosítás. Egy átfogó tanulmány szerint [9] a 2022-ben felhasznált polimerek mindössze 9%-a került anyagában újrahasznosításra. Kémiai újrahasznosítás – például pirolízis, hidrokrakkolás vagy szolvólízis – során a polimer molekulaláncainak felbontása történik. Az így kapott komponensekből új polimerláncok állíthatók elő. Ez egy hatékony, de rendkívül költséges módja az újrahasznosításnak. Energetikai hasznosítás során energia nyerhető, különösen nagy fűtőértékű polimerek (pl. polipropilén, nagysűrűségű polietilén) esetében, amelyek fűtőértéke elérheti a 46–47 MJ/kg-ot [10]. Megjegyzendő, hogy ez a módszer nem illeszthető bele a körforgásos gazdaság rendszerébe. A mechanikai újrahasznosítás a legegyszerűbb és legköltséghatékonyabb megoldás, azonban számolni kell az anyag degradációjával és a szelektív begyűjtés kihívásaival [11].

A biopolimerek újrahasznosítása jelenleg korlátozott, mivel alacsony piaci részesedésük miatt nem áll rendelkezésre elegendő mennyiségű hulladék az ipari léptékű feldolgozáshoz, továbbá szelektív gyűjtésük sem megoldott. Emellett biodegradációjuk következtében az élelciklus végén gyakran nem állnak rendelkezésre újrafeldolgozható formában [12].

Jelen kutatásban kereskedelmi forgalomban kapható PBAT zárláncú újrahasznosítása került szimulálásra laboratóriumi körülmények között fröccsöntéses technológiával. Az alapanyag az elsődleges gyártási lépést követően tizenkét alkalommal került újrahasznosításra olyan módon, hogy az első, harmadik, ötödik, hetedik, tizedik és tizenkettedik ciklust követően a mechanikai tulajdonságai minősítve lettek. A minősítés alapja a darabok szakító mechanikai tulajdonságai és keménysége volt. A szakítóvizsgálatok során a rugalmassági modulus, a folyási feszültség és a szakadási nyúlás került meghatározásra, a keménységmérés során pedig a Shore D keménység. Az eredmények statisztikai összehasonlítása Tukey HSD próba alkalmazásával történt, amely lehetővé tette az újrahasznosítás hatására bekövetkező tulajdonságváltozások szignifikanciájának meghatározását.

## 2. ALAPANYAG, FELDOLGOZÁSI- ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

### 2.1. Alapanyag

A kutatáshoz felhasznált alapanyag a BASF (Ludwigshafen, Németország) által gyártott Biopolyester Purge típusú PBAT granulátum volt. Gyártói adatlapja szerint a sűrűsége 1,25-1,27 g/cm<sup>3</sup>, folyásindexe 2,7-4,9 g/10perc (190 °C, 2,16 kg), kristályolvadási hőmérséklete pedig 110-120 °C.

### 2.2. Feldolgozás

Az alapanyag 80 °C-on 4 órán keresztül volt szárítva egy DEGA 2500 jelzésű (DEGA S.p.A., Corte Franca, Olaszország) szárítósilóban a feldolgozást megelőzően. A gyártás egy Arburg Allrounder 420C (Lossburg, Németország) fröccsöntő berendezéssel történt. A feldolgozás során használt fontosabb paraméterek az 1. táblázatban vannak összefoglalva. A fröccsöntőgép segítségével ISO 527-2 szabvány szerinti 1A típusú piskótapróbatestek lettek gyártva. A mechanikai újrahasznosítás szimulálásához a fröccsöntött darabok egy Flli Virginio Ac 4360 típusú laboratóriumi aprítógép (Gambellara, Olaszország) segítségével lettek ledarálva majd újból feldolgozva fröccsöntés útján. Ez a folyamat tizenkét alkalommal került megismétlésre. A létrehozott minták jelölésére egy kétkarakterből álló jelölésrendszer került bevezetésre, amelyben a szám az újrahasznosítási ciklusok számára utal. Ennek megfelelően a „7x” jelölésű minta a hét alkalommal újrahasznosított darabot jelzi, míg a „0x” az eredeti, szűz anyagból gyártott próbatestet.

A darabok feldolgozása során alkalmazott fröccsöntési paraméterek

1. táblázat

Beállított paraméter [mértékegység]	Érték
Csiga átmérő [mm]	35
Fúvóka hőmérséklet [°C]	150
Befröccsöntési sebesség [cm <sup>3</sup> /s]	50
Utónyomás [bar]	900
Szerszámhőmérséklet [°C]	30

### 2.3. Vizsgálati módszerek

A vizsgálatokat megelőzően a próbatestek az ISO 291 szabványnak megfelelően legalább 88 órán keresztül 23 °C-on, 50%-os páratartalom mellett voltak tárolva exszikkátorokban, a kondicionálást követően pedig különböző mechanikai vizsgálatoknak lettek alávetve.

A szakítóvizsgálatok az ISO 527 szabvány szerint egy 10 kN-os erőmérő cellával felszerelt Instron 5582 (Norwood, MA, USA) szakítógépen lettek végrehajtva, amelynek során a próbatestek befogási hossza 115 mm volt, a húzás kezdeti sebessége 1 mm/perc volt a húzó rugalmassági modulusz (Young modulusz) meghatározásának céljából, majd 0,3% nyúlást követően 500 mm/perc sebesség volt alkalmazva egészen a szakadásig. A keménységmérés egy HDD 100 Shore D keménységmérő (Sauter, Balingen, Németország) segítségével lett végrehajtva az ISO 868 szabványt követve.

Az összes vizsgálati eredmény varianciaanalízis (ANOVA) révén, majd azt követő Tukey HSD szignifikancia teszten keresztül lett elemezve annak ellenőrzése céljából, hogy van-e szignifikáns különbség a különböző számú újrahasznosítási cikluson átesett minták tulajdonságai közt.

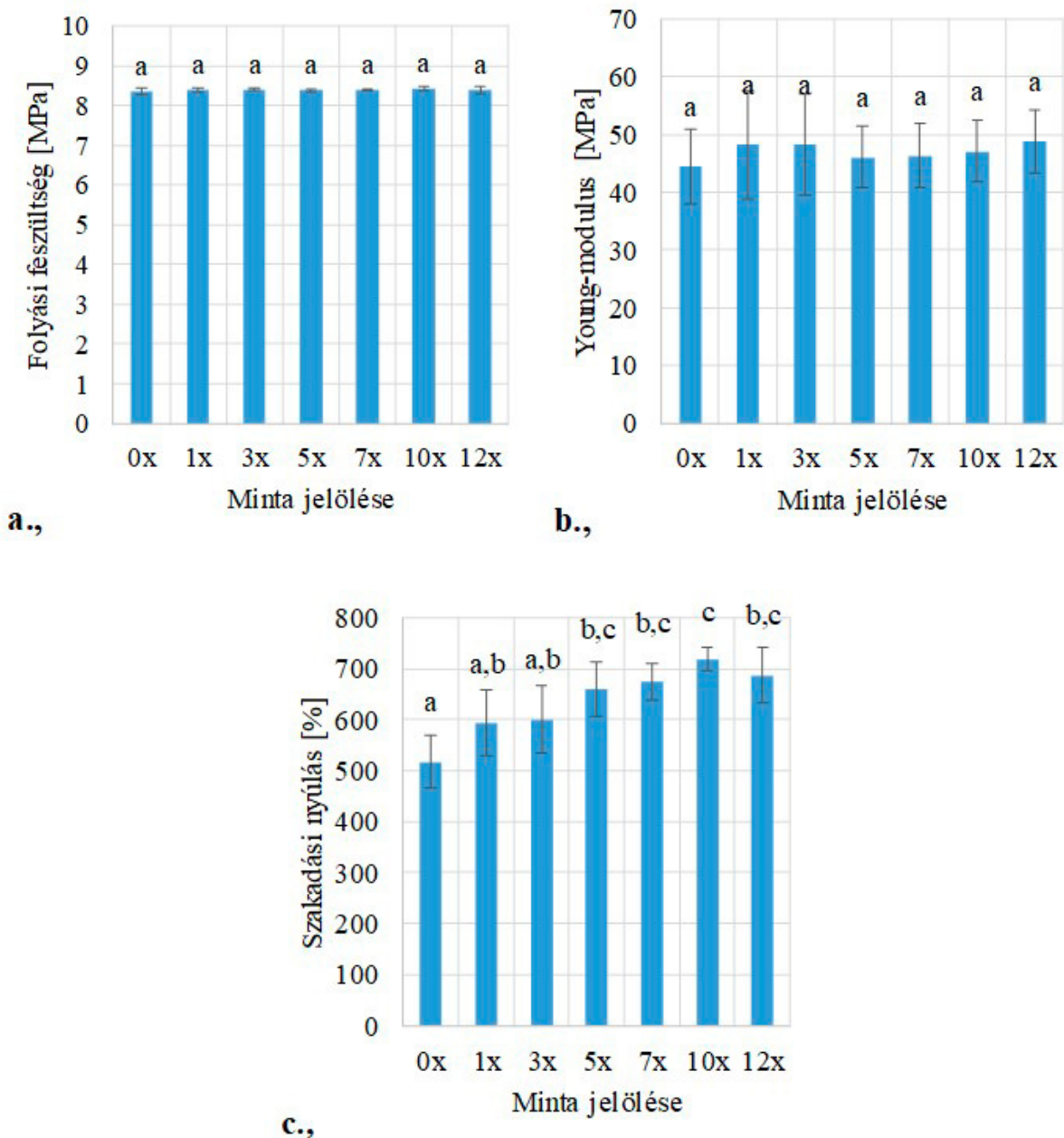
## 3. EREDMÉNYEK

### 3.1. Szakítóvizsgálatok

A szakítóvizsgálatok eredményei az 1. ábrán láthatók. A folyási feszültség alakulását az újrahasznosítási ciklusok számának függvényében az 1/a ábra mutatja. Látható, hogy a többszöri újrahasznosítás nem volt érdemi hatással az anyag szilárdságára, az minden minta esetében a szűknek mondható 8,3-8,4 MPa tartományban mozgott, a statisztikai kiértékelés alapján pedig a különbségek nem tekinthetők szignifikánsnak. Hasonló tendencia figyelhető meg a húzó rugalmassági modulus esetében is (1/b ábra), amely a 44,4-48,7 MPa tartományban volt. Bár az újrahasznosított darabok mindegyike nagyobb Young-modulusszal rendelkezett a 0x mintánál (44,4 MPa), az ANOVA-analízis alapján a különbségek nem voltak szignifikánsak. Kiemelendő, hogy már az első újrahasznosítási lépés után 48,1 MPa lett a PBAT Young-modulusa, tehát az anyagszerkezetben bekövetkező esetleges változások már kismértékű nyírási- és hőterhelést követően bekövetkeznek, amit követően további terhelés már nem okoz érdemi különbséget. A merevség növekedésének hátterében az anyag degradációjához köthető molekulatömeg csökkenés állhat, amely a feldolgozás során lejátszódó hűtéssel párhuzamosan intenzívebb kristályosodást tehet lehetővé. Ezen elmélet bizonyítására a jövőben a kristályos szerkezet minősítésére alkalmas differenciál pásztázó kalorimetriás (DSC) mérések elvégzése lehet indokolt.

A szakadási nyúlás (1/c ábra) kezdetben 517% volt, majd fokozatosan növekedve tíz újrahasznosítást követően érte el a maximumát (718%). A Tukey HSD próba szerint a minták szakadási nyúlása fokozatosan növekszik a 0x mintához képest. Bár az 1x és 3x minták nem mutatnak szignifikáns eltérést a szűz anyagból készült darabokhoz képest, értékük hasonló az 5x, 7x, 10x, illetve 12x mintákhoz, amik viszont szignifikánsan eltérnek a 0x mintától. Az újrahasznosítást követő nyúlásnövekedés bár nem általános hőre lágyuló polimerek esetén, de nem is példa nélküli. A nagy deformációt elviselni képes polimerek esetén a molekulatömeg még a feldolgozás okozta degradációt követően is kellően nagy ahhoz, hogy a molekulák összehurkolódása fennmaradjon és a belőlük gyártott darabok nagyfokú nyúlásra legyenek képesek tönkremenetelt megelőzően. Ezzel ellentétben a kevésbé duktilis polimerek molekulatömeg csökkenése könnyen rideg töréshez és a nyúlóképesség drasztikus csökkenéséhez vezethet. Jelen esetben a PBAT szakadási nyúlásának növekedése annak betudható, hogy a mérsékelt molekulatömeg-csökkenésből adódó nagyobb molekuláris mozgékonyosság elősegítette a plasztikus alakváltozást, amely stabilabb nyakképződést és egyenletesebb feszültségeloszlást tett lehetővé.

Nomadolo és társai [13] különböző polimerek, többek közt PBAT, LDPE, politejsav (PLA) és poli(butilén-szukcinát) (PBS) hét cikluson keresztül végzett mechanikai újrahasznosítását elemezte. Közleményükben a nagyfokú nyúlásra képes polimerek (PBAT, PBS, LDPE) esetén változatlan, vagy kismértékben növekvő szakadási nyúlásról számoltak be, ami jó összhangban áll az itt bemutatott eredményekkel. Jamnongkai és társai [14] szűz polipropilént társítottak újrahasznosítottal, eredményeik pedig szintén azt mutatták, hogy a növekvő arányú reciklátum javítja a polimer szakadásig elviselni képes nyúlásának az értékét.



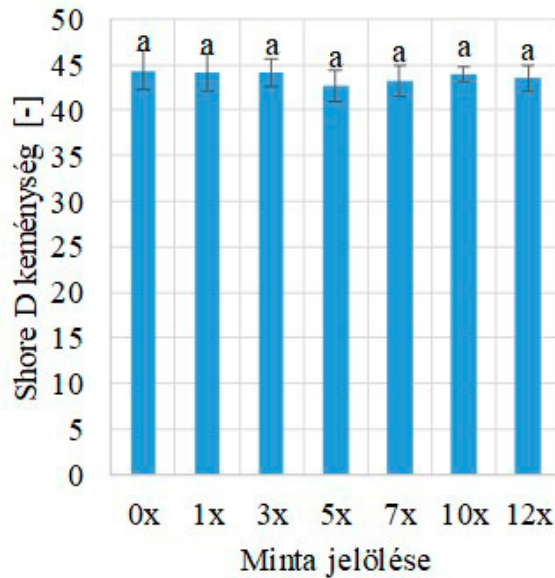
1. ábra

Többszöri újrahasznosítás hatása a PBAT (a) folyási feszültségére (b) Young-modulusára és (c) szakadási nyúlására (Az oszlopok feletti azonos betűvel (a, b, c) jelölt átlagértékek a Tukey HSD próba alapján nem különböznek szignifikánsan egymástól)

### 3.2. Keménységmérés

A keménységmérés során meghatározott értékek átlagát és szórását a 2. ábra szemlélteti. A Shore D keménységek statisztikai kiértékelése alapján az újrahasznosítás nem eredményezett szignifikáns változást. A legnagyobb keménysége a szűz PBAT-ból készült 0x mintának volt (44,4) míg a legalacsonyabb értéket (42,6) az ötször újrahasznosított darab produkálta. Bavasso és társai [15] extrúzióval és fröccsöntéssel végrehajtott újrahasznosítási kísérleteket végeztek Estabio típusú biopoliészteren.

Tapasztalataik alapján az anyag Shore D keménysége az első és a tizedik extrudálási ciklus között gyakorlatilag változatlan maradt. Megállapításaik összhangban állnak a jelen közleményben bemutatott eredményekkel olyan tekintetben, hogy a többszöri feldolgozás nem okozott érdemi változást a keménységben.



2. ábra

*Többszöri újrahasznosítás hatása a PBAT Shore D keménységére (Az oszlopok feletti azonos betűvel (a) jelölt átlagértékek a Tukey HSD próba alapján nem különböznek szignifikánsan egymástól)*

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen kutatás során fröccsöntéssel történő többszöri feldolgozás útján került szimulálásra a poli(butilén adipát-ko-tereftalát) újrahasznosítása. A vizsgálat célja a többszöri hő- és nyírási igénybevétel hatásának meghatározása volt az anyag szakító mechanikai tulajdonságaira és felületi keménységére. Az eredmények azt mutatták, hogy sem a folyási feszültség, sem a húzó rugalmassági modulus nem változott szignifikánsan az újrahasznosítási ciklusok során, azok a 8,3-8,4 MPa, illetve a 44,4-48,7 MPa tartományban mozogtak. A szakadási nyúlás esetén egyértelmű tendencia mutatkozott, miszerint az újrahasznosítási ciklusok számának növekedésével az anyag deformációs képessége is megnőtt. A keménység – hasonlóan a szilárdsághoz és a merevséghez – nem változott érdemben az ismételt feldolgozások során. Összességében elmondható, hogy a mechanikai újrahasznosítás csekély mértékben befolyásolja a PBAT szakító mechanikai tulajdonságait és keménységét, ami arra utal, hogy a többszöri mechanikai feldolgozás műszakilag megvalósítható lehet ezen biopolimer esetében. Bár jelen vizsgálat során biodegradációs vizsgálatok nem kerültek elvégzésre, azonban az eredmények alapján igazolható, hogy a mechanikai újrahasznosítás megfelelő alternatívát jelenthet, így nem feltétlenül szükséges az anyag azonnali komposztálása. Az újrahasznosítás során bekövetkező esetleges anyagszerkezeti változások mélyebb feltárása érdekében a jövőben differenciális pásztázó kalorimetriás mérések elvégzése tervezett.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal által támogatott STARTING 150339 azonosító-számú projekt keretében valósult meg.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Pfaff J. A. R., Schober M., Seethaler C., Oellerer A., Scheiber B., Liedtke I. L. Unpacking the problem—the hidden waste in neurointerventional procedures: quantifying packaging waste in neurointerventional supply chains, *Journal of NeuroInterventional Surgery*. 2025, 023785.
- [2] Kostic D., Hoffmann U., Fürtauer S., Fell T., Yilmaz C., Burth D., Sänglerlaub S. Packaging weight, filling ratio and filling efficiency of yogurt and relevant packagings depending on commercial packaging design, material, packaging type and filling quantity. *Dairy*, 2022, 3(3), 668–692
- [3] Avery E., Nduagu E., Vozzola E., Roux T. W., Auras R. Polyethylene packaging and alternative materials in the United States: A life cycle assessment. *Science of The Total Environment*. 2025, 961, 178359.
- [4] Wang R., Wang J., Xu M., Yan J., Guo G., Wang Y., Zhang J., Wu J. Biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) modified by 1,4-cyclohexanedimethanol. *Polymer*. 2024, 308, 127348.

- [5] Meng X., Qiu J., Zhang B., Sakai E., Zhang L., Feng H., Tang J. Optimizing mechanical and environmental degradation performance of polybutylene adipate terephthalate by adjusting polyvinyl alcohol content. *Materials Today Communications*. Elsevier, 2024, 41, 110786.
- [6] Bianchi M., Dorigato A., Morreale M., Pegoretti A. Evaluation of the physical and shape memory properties of fully biodegradable poly(lactic acid) (PLA)/poly(butylene adipate terephthalate) (PBAT) blends. *Polymers*. MDPI, 2023, 15(4), 881.
- [7] Freitas B. M. de, Razzino C. do A., Lisboa Filho P. N. Characterization of PBAT bioplastic with Brazil nut urchin particles. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. Associação Brasileira de Polímeros, 2025, 35(4), e20250013.
- [8] Aayanifard Z., Saffron C. M., Hamdani S. S., Elkholy H. M., Rabnawaz M. Technoeconomic analysis for biodegradable and recyclable paper coated with synthetic ionic PBAT for packaging application. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. American Chemical Society (ACS), 2024, 12(33), 12576–12583.
- [9] Foussini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*. Springer Nature, 2025, 6, 257
- [10] Mentés D., Nagy G., Szabó T. J., Hornyák-Mester E., Fiser B., Viskolcz B., Póliska C. Combustion behaviour of plastic waste – a case study of PP, HDPE, PET, and mixed PES-EL. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 2023, 402, 136850.
- [11] Jiang X., Bateer B. A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation. *Waste Management & Research*. SAGE, 2025, 43(8), 1159–1178.
- [12] Dolci G., Puricelli S., Cecere G., Tua C., Fava F., Rigamonti L., Grosso M. How does plastic compare with alternative materials in the packaging sector? A systematic review of LCA studies. *Waste Management & Research*. 2025, 43(3), 339–357.
- [13] Nomadolo N., Mtibe A., Ofosu O., Mekoa C., Letwaba J., Muniyasamy S. The effect of mechanical recycling on the thermal, mechanical, and chemical properties of Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS), Poly (Lactic Acid) (PLA), PBAT-PBS blend and PBAT-TPS biocomposite. *Journal of Polymers and the Environment*. 2024, 32(6), 2644–2659.
- [14] Jamnongkan T., Intraramongkol N., Samoechip W., Potiyaraj P., Mongkholrattanasit R., Jamnongkan P., Wongwachirakorn P., Sugimoto M., Ito H., Huang C.-F. Towards a circular economy: study of the mechanical, thermal, and electrical properties of recycled polypropylene and their composite materials. *Polymers*. MDPI, 2022, 14(24), 5482.
- [15] Bavasso I., Bracciale M. P., De Bellis G., Pantaleoni A., Tirillò J., Pastore G., Gabrielli S., Sarasini F. Recycling of a commercial biodegradable polymer blend: Influence of reprocessing cycles on rheological and thermo-mechanical properties. *Polymer Testing*. 2024, 134, 108418.