

Repceszalma őrleménnyel társított biopolimer keverékek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

Mechanical properties of rapeseed straw-filled biopolymer blends

JAKAB Sándor Kálmán^{1,2}, LENDVAI László^{1,2}

¹Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járóműmérnöki Kar, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1.

²Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járóműmérnöki Kar, Fenntartható Polimerek és Polimer Technológiák Kutatócsoport, 9026 Győr, Egyetem tér 1.

Abstract

In this research, poly(lactic acid)/polybutylene adipate-co-terephthalate blends were paired with a third component, rapeseed straw, in order to study its potential strengthening effect. The rapeseed straw and the two polymers were mixed at different weight ratios to prepare biopolymer-based composites. The fabricated biocomposite specimens were subjected to different mechanical test (tensile, flexural, impact) in order to investigate their resistance against different types of loads.

Keywords: biopolymer, biocomposite, sustainability, natural fiber, mechanical properties

Kivonat

Jelen kutatásban politejsav/polibutilén-adipát-ko-tereftalát keverékhez egy harmadik komponens, repceszalma őrlemény került adalékolásra annak lehetséges erősítőhatásának megvizsgálása céljából. A repceszalmát és a két biopolimert különböző arányban társítva biokompozitok lettek létrehozva. Az előállított próbatesteken mechanikai vizsgálatok (szakítóvizsgálat, hajlítóvizsgálat, ütvehajlító vizsgálat) lettek elvégezve a kompozitok különböző igénybevételekkel szembeni ellenálló képességének feltérképezése céljából.

Kulcsszavak: biopolimer, biokompozit, fenntarthatóság, természetes szál, mechanikai tulajdonságok

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A fenntarthatóság jegyében folyamatos kutatások folynak a megújuló erőforrásból származó nyersanyagokkal kapcsolatban, ezzel csökkentve a véges készletekkel rendelkező természeti kincsektől való függőségét. Polimer alapú többkomponensű mérnöki anyagok területén fenntarthatóság szempontjából az egyik legnagyobb veszélyt jelenleg a kompozit termékek jelentik, amelyeket csak rendkívül nehezen, vagy egyáltalán nem lehet újrahasznosítani, így nagyban hozzájárulnak a világ egyre nagyobb – mostanra évi háromszázezer tonnára növekedett – műanyag hulladék-termeléséhez [1]. Mivel a kompozitok alkotóelemeire való bontása alig kivitelezhető, így olyan anyagokat célszerű használni, amelyek természetes összetevőkből származnak és rövid időn belül képesek lebomlani. A polimereket származásuk és lebonthatóságuk szerint két-két (összesen négy) csoportba lehet besorolni [2]. Eredetük szerint természetes erőforrásokból származó, illetve fosszilis erőforrásokból származó polimerekről beszélhetünk, lebonthatóságuk szerint pedig a lebomló és a nem lebomló. A szakirodalom általánosságban a biopolimerek közé sorolja mindazokat az anyagokat, amelyek természetes erőforrásból származnak és/vagy képesek rövid időn belül lebomlani. Az elmúlt években a biopolimerek egyre nagyobb térhódítása figyelhető meg a piacon. 2023-ban a globális biopolimer piac 14,3 milliárd dollárra volt becsülve, amely 2030-ra az előrejelzések alapján akár 38,5 milliárd dollárra is növekedhet [3]. A biopolimerek területén folyó kutatások is nagymértékben megnövekedtek az utóbbi időben [4], éppen ezért ezen anyagok kutatása kulcskérdés a mai világban.

A biopolimerek egyik legelterjedtebb képviselője a politejsav (PLA) [5]. Az additív gyártástechnológiában, a csomagolóiparban illetve az orvostudományban rendkívül népszerű biopolimer

monomerjét – a tejsavat – természetes úton, fermentáció útján hozzák létre, majd polimerizációs úton (pl. gyűrűfelnyitás) politejsavvá alakítják. Hátrányai között meg szokták említeni a nagyfokú ridegségét, illetve költséges előállítását, amely akár háromszorosa is lehet a hagyományos műanyagokénak. A polibutilén-adipát-ko-tereftalát (PBAT) egy szintén a biopolimerek csoportjába tartozó műanyag, ám a PLA-val ellentétben előállítása nem kizárólag természetes anyagokból valósul meg. Gyártása adipinsav és tereftálsav észterifikációja útján történik [6]. A PBAT-ot elsősorban a csomagolóiparban használják, rendkívüli nyúlóképességgel rendelkezik, ám magas előállítási költsége miatt gyakran társítják más anyaggal.

A PLA és PBAT társítása egy széles körben kutatott terület, amelynek elsődleges célja a két anyag előnyös tulajdonságainak ötvözése. Nagyarányú PBAT és megfelelő típusú kompatibilizálószer alkalmazása mellett el lehet érni, hogy a PLA viszonylag magas szakítószilárdsága nagymértékű – akár 200%-nál nagyobb – nyúlással társuljon [7]. Peng Li és társai [8] 80/20 tömegarányban kevert PLA/PBAT blendeket hoztak létre ún. vibrációs fröccsöntéses technológiával. A fajlagos ütemmunka $3,45 \text{ kJ/m}^2$ -ről $20,24 \text{ kJ/m}^2$ -re növekedett a társítatlan PLA-hoz képest. Xin Wang és munkatársai [9] PLA és PBAT kombinációjával kísérleteztek 0-40 m% PBAT aránnyal, illetve ugyanezen mintákat vizsgálták láncnövelőszer alkalmazásával is. Eredményeik szerint a PLA szakadási nyúlása (8%) a PBAT hozzáadásával 483%-os értékre nő a legmagasabb PBAT arány mellett, amely 580%-ra emelkedik $0,75 \text{ m.}\%$ láncnövelő adagolásával.

A polimerek növényi szemcsékkel történő társítása egy feltörekvő terület, amely a fenntarthatósági szempontokat előtérbe helyezi. Számos ma is létező műanyagipari termék készül növényi szemcsével társított műanyagból [10]. A növényi szemcsék használhatók, mint töltőanyagok, csökkentve ezzel az alapanyagköltséget. Bizonyos esetekben pedig akár a mechanikai tulajdonságokat is javítva erősítőanyagként viselkednek. A visszanyerhető energia mennyisége a növényi szemcsével társított műanyagok esetén szemben a szintetikus szálakkal akár ötszörös is lehet, mivel ezek könnyebben éghetők [11]. Mindemellett alacsony sűrűségüknek köszönhetően az ezekből az anyagokból gyártott termékek súlycsökkenése is elérhető.

A nagymennyiségű mezőgazdasági melléktermék keletkezése okán számos kísérletet végeztek polimerekkel való társításuk kapcsán [12]. Jacek Andrzejewski és kutatótársai [13] PLA, PLA/PBAT, PLA/PBAT/láncnövelő, PLA/PBAT/láncnövelő/hajdina maghéj anyagból készült minták mechanikai tulajdonságait hasonlították össze. Eredményeik alapján a társítatlan PLA-nak a 30 m% PBAT és $0,5 \text{ pph}$ láncnövelő hatására $2,1$ -ről $11,2 \text{ kJ/m}^2$ -re növekedett az ütemmunkája, míg a szakító és hajlító mechanikai tulajdonságok romlottak. Jianan Feng és társai [14] négy különböző, 30 m% növényi szállal társított PLA/PBAT-alapú kompozitot hasonlítottak össze 1% maleinsavval ojtott PLA adalékolása mellett, amelyek közül a legjobban a szójabab szalmával társított polimer kompozit teljesített a legjobban $\sim 14 \text{ MPa}$ szakítószilárdsággal, $\sim 19 \text{ MPa}$ hajlítószilárdsággal és $3,2 \text{ kJ/m}^2$ ütemmunkával, indoklásuk szerint a szójabab szalma magas cellulóz tartalmának köszönhetően.

Jelen kutatás célja PLA/PBAT polimer keverék társítása 2,5, 5, 10 és 20 tömegszázalék repceszalma őrléménnyel, mint hazánkban nagy mennyiségben termelődő mezőgazdasági melléktermékkel. A kísérletek során az extrúziós úton kompaundált, majd fröccsöntött kompozitok mechanikai vizsgálatoknak (szakító-, hajlító-, ütvehajlító vizsgálatok) lettek alávetve a tulajdonságaik feltérképezése céljából.

2. ALAPANYAGOK, FELDOLGOZÁSI- ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

2.1. Alapanyagok

A biokompozitok gyártásához elsődleges alapanyagként használt politejsav a Natureworks LLC cég (Plymouth, MN, USA) által forgalmazott Ingeo 3052D jelzésű granulátuma, míg a polibutilén-adipát-ko-tereftalát a BASF (Ludwigshafen, Németország) által gyártott Ecoflex F Blend C1200 típusú granulátum. A kísérletekhez használt repceszalma (R) őrlémény a Mikó Stroh Borotai-Laska Kft. (Baja, Hungary) adományaként került beszerzésre. A PLA sűrűsége a gyártói adatlap szerint $1,24 \text{ g/cm}^3$, folyásindexe 14 g/10perc (210°C , $2,16 \text{ kg}$), üvegesedési hőmérséklete 55 - 60°C , míg kristályolvadási hőmérséklete 145 - 160°C között van. A PBAT sűrűsége $1,25$ - $1,27 \text{ g/cm}^3$, folyásindexe $2,7$ - $4,9 \text{ g/10perc}$ (190°C , $2,16 \text{ kg}$), kristályolvadási hőmérséklete pedig 110 - 120°C között van. A repceszalma $0,25 \text{ mm}$ -nél kisebb átmérőjű szál formájában lett alkalmazva, amely egy Matest A059 rázószita (Treviso, Olaszország) által lett szortírozva.

2.2. Feldolgozás

Az alapanyagok 80 °C-on 4 órán keresztül voltak szárítva egy Faithful WGLL 125 BE (Cangzhou, China) szárítószekrényben a feldolgozást megelőzően. A referencia minta a 80/20 tömegarányban kevert PLA/PBAT blend volt. Ehhez lett hozzáadva a repceszalma őrlemény 2,5, 5, 10, és 20 m% arányban. A pontos összetételeket és a minták jelölését az 1. táblázat mutatja be.

A gyártott biopolimer kompozitok összetétele és megnevezése

1. táblázat

Megnevezés	PLA [m%]	PBAT [m%]	R [m%]
0R	80	20	0
2.5R	78,75	18,75	2,5
5R	77,5	17,5	5
10R	75	15	10
20R	70	10	20

A kompozitok előállítása egy LabTech Scientific LTE 20–44 (Samutprakarn, Thailand) ikercsigas extruderrel történt. A csiga sebessége 30 fordulat/perc volt, fűtőzónáinak hőmérséklete a garattól a szerszámgig 155-185 °C között volt. A szerszámból kiáramló olvadt műanyag szál vizes hűtőkádán keresztül vezetve lett lehűtve, majd egy Labtech LZ120 granuláló (Samutprakarn, Thailand) segítségével ledarálva. Az így kapott granulátum 4 órás 80 °C-on történő szárítás után egy Arburg Allrounder 420C (Lossburg, Germany) fröccsöntő berendezéssel került további feldolgozásra. A gyártás során használt fontosabb paraméterek a 2. táblázatban láthatók. A fröccsöntőgép segítségével ISO 527-2 szabványnak megfelelő A1 típusú vizsgálati próbatestek lettek gyártva.

Kompozit próbatest gyártásához használt fröccsöntési paraméterek

2. táblázat

Fröccsöntési paraméter [mértékegység]	Paraméter érték
Csiga átmérő [mm]	35
Fúvóka hőmérséklet [°C]	195
Befröccsöntési sebesség [cm ³ /s]	50
Utónyomás [bar]	900
Szerszámhőmérséklet [°C]	30

2.3. Vizsgálati módszerek

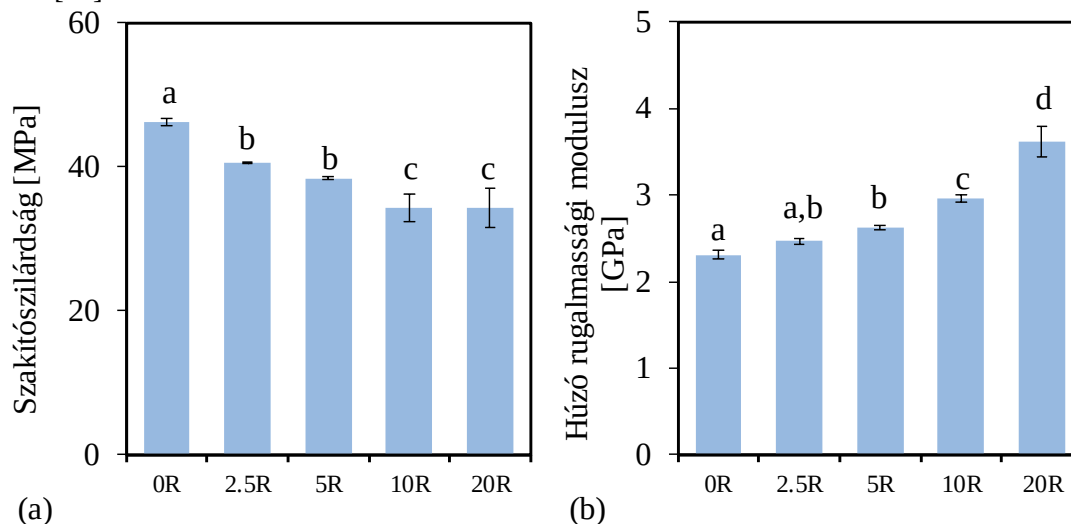
A próbatestek az ISO 291 szabványnak megfelelően minimum 88 órán keresztül 23 °C-on 50%-os páratartalom mellett voltak tárolva exsikkátorokban a vizsgálatokat megelőzően. Ezt követően a kondicionált próbatestek különböző mechanikai vizsgálatoknak lettek alávetve. A szakítóvizsgálatok az ISO 527 szabvány szerint egy Instron 5582 (Norwood, MA, USA) univerzális szakítóberendezésen lettek végrehajtva, amelynek során a próbatestek 115 mm-es kiindulási befogási hosszal, kezdetben 1 mm/perc sebességgel lettek terhelve a húzó rugalmassági modulusz (Young modulusz) meghatározásának céljából, majd 0,3% nyúlást követően 5 mm/perc sebesség volt alkalmazva egészen a szakadásig. Az ISO 178 szabvány szerint ugyanezen berendezésen 3-pontos hajlítóvizsgálat lett végrehajtva, amelynél 64 mm-es alátámasztási távolsággal és 5 mm/perc keresztfej elmozdulással lett meghatározva mind a hajlító rugalmassági modulusz, mind a hajlítószilárdság. Az ütvehajlító vizsgálatok az ISO 179 szabvány szerint történtek bemetszetlen próbatesteken egy Ceast 6545/000 ingás ütőművel (Torino, Olaszország), amelynél 62 mm-es megtámasztási távolság volt alkalmazva, valamint egy 15 J-os kalapács. Az összes vizsgálati

eredmény ANOVA elemzésnek és azt követő Tukey szignifikancia tesztnek lett alávetve annak ellenőrzése céljából, hogy van-e szignifikáns különbség az egyes minták tulajdonságai közt.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Szakítóvizsgálat

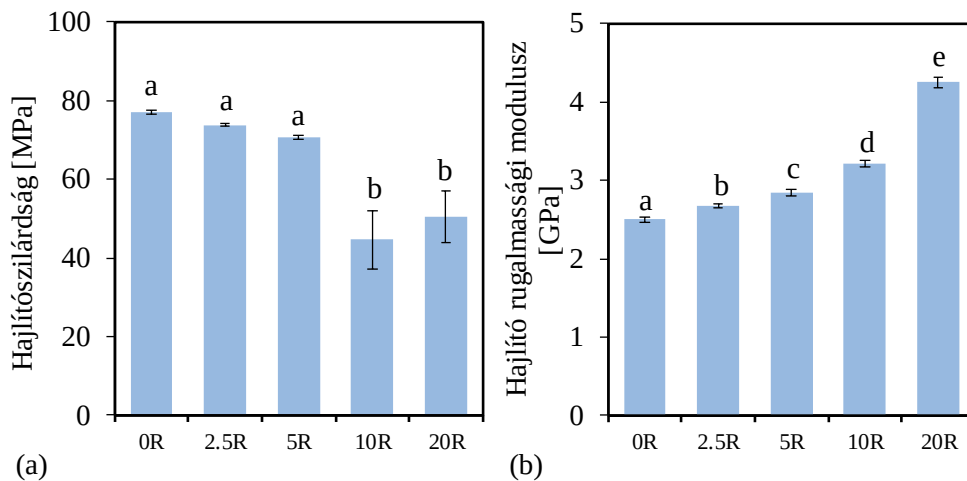
A szakítóvizsgálatok eredményei az 1. ábrán láthatók. Az 1a ábra mutatja be a szakítószilárdság értékeit, ahol a legmagasabb értéket, 46,2 MPa-t, a repceszalma nem tartalmazó PLA/PBAT keverék (0R) érte el. A szilárdság fokozatosan csökkent a repceszalma arányának növelésével. A 10R minta érte el a legalacsonyabb, 34,3 MPa szakítószilárdságot, ez csak kismértékben alacsonyabb, mint a 20R-é, a kettő közt nincs is szignifikáns különbség a Tukey teszt szerint. Ez alapján 10 m% repcetartalom felett a PLA/PBAT szilárdsága érdemben már nem változik. Hasonló csökkenést tapasztaltak Sudha és kollégái [15], akik 95/5 arányú PLA/PBAT keveréket társítottak juta szállal, amelynek során a szakítószilárdság ~50 MPa-ról ~44 MPa-ra csökkent 20 m% növényi szál tartalom mellett. A húzó rugalmassági modulusz a PLA/PBAT minta esetén 2,31 GPa eredményt mutatott és ez fokozatosan növekedett a repceszalma hozzáadásával egészen 3,60 GPa-ig (20R minta). A szignifikancia teszt alapján a 0R és 2.5R minták közt nincs jelentős eltérés, ahogy a 2.5R és 5R közt sincsen, de ennél nagyobb repceszalma tartalom esetén az eredmények szignifikáns eltérést mutatnak egymáshoz képest. Elmondható, hogy a repceszalma hozzáadásával a minták modulusza megnövekedett ami a hozzáadott növényi szemcse nagy merevségéből adódik. Ezzel párhuzamosan a szakítószilárdság lecsökkent, vélhetően a PLA/PBAT mátrix és a növényi szemcsék közti gyenge adhéziós kötés miatt [16].



1. ábra. PLA/PBAT/repceszalma kompozitok szakítószilárdsága (a) és húzó rugalmassági modulusza (b)

3.2. Hajlítóvizsgálat

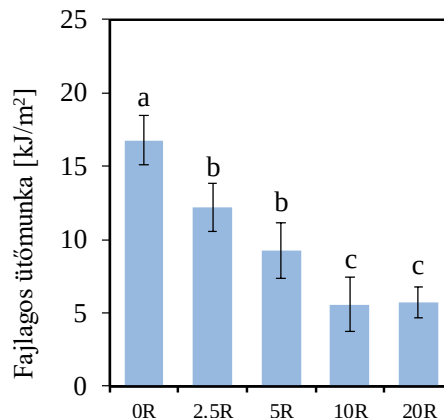
A hajlítóvizsgálatok eredményeit a 2. ábra foglalja össze. Az eredmények alapján látszik, hogy a 0R minta mutatta a legnagyobb, 77,1 MPa-os hajlítószilárdságot. Ez 2,5 és 5 m% repceszalma hozzáadásával lecsökken 73,9 MPa, illetve 70,8 MPa értékre. Ez a csökkenés azonban a szignifikancia vizsgálat alapján nem tekinthető jelentősnek. A 10R és 20R mintáknál a csökkenés azonban számottevő, ezek hajlítószilárdsága 44,7 MPa illetve 50,4 MPa. A csökkenés az összetevők közti gyenge adhézióval magyarázható. Eközben a modulusz értékei egyértelmű növekvő tendenciát mutatnak, a Tukey szignifikancia teszt szerint mindegyik minta között szignifikáns különbség van. A kezdeti 2,50 GPa hajlító rugalmassági modulusz 4,25 GPa-ban maximalizálódik a 20R mintánál. A hajlító rugalmassági modulusz ilyen szintű növekedése hasonlóságot mutat Phasawat Chaiwutthinan és társai [17] eredményéhez, akik 70/30 arányú PLA/PBAT keveréket 30 phr faliszttal társítottak, aminek hatására a hajlító rugalmassági modulusz 2,2 GPa-ról 4,3 GPa-ra nőtt.



2. ábra. PLA/PBAT/repceszalma kompozitok hajlítószilárdsága (a) és hajlító rugalmassági modulusza (b)

3.3. Ütvehajlító vizsgálat

Az ütvehajlító vizsgálat eredményei a 3. ábrán vannak bemutatva. Az általunk mért fajlagos ütőmunka PLA/PBAT esetén $16,77 \text{ kJ/m}^2$ volt. A repceszalma beágyazásával fokozatos csökkenés volt tapasztalható, amely a töltőanyag arányának növekedésével párhuzamosan következett be. A legalacsonyabb ütőmunkát a 10 m% repceszalmát tartalmazó 10R minta mutatta ($5,57 \text{ kJ/m}^2$), ám a 20R minta ütőmunkája is közel azonos volt ezzel ($5,72 \text{ kJ/m}^2$), a kettő közt szignifikáns eltérés nincsen. Helena Oliver-Ortega és társai [18] hasonló csökkenést tapasztaltak PLA puhafával való társításakor, amely során a társítatlan PLA fajlagos ütőmunkája $25,8 \text{ kJ/m}^2$ -ről $20,2 \text{ kJ/m}^2$ -ra csökkent 20 m% növényi szál tartalom esetén. Az eredmények alapján – hasonlóan a hajlító- és a szakítóvizsgálatok során megállapított módon – 10 m% tartalom felett a repceszalma nem befolyásolja érdemben a PLA/PBAT keverékek szilárdságát. Elmondható, hogy a repceszalma a mátrixanyagként használt keverékkel való korlátozott adhéziós kapcsolata okán csökkent a blend dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállása.



3. ábra. PLA/PBAT/repceszalma kompozitok fajlagos ütőmunkája

ÖSSZEFOGLALÓ

A kutatás során politejsavból (PLA), polibutilén-adipát-ko-tereftalátból (PBAT) és repceszalma örleményből álló háromkomponensű polimer kompozitok vizsgálata történt. A cél a mechanikai tulajdonságok változásának feltérképezése volt a repceszalma tartalom függvényében. A kísérleti eredmények alapján a PLA/PBAT polimerkeverékhez adott repceszalma megnöveli a húzó és hajlító rugalmassági modulusz értékeket, még hozzá a növekvő tömegarány függvényében egyre jelentősebb mértékben. A hajlítószilárdsági értéket 5 m%-ig kevésbé befolyásolta a hozzáadott növényi szál, majd ezt növelve számottevő csökkenés volt mérhető. A szakítószilárdsági értékeknél ez a csökkenés sokkal szignifikánsabb volt, ám 10 m%-on túl stagnálás volt megfigyelhető. Az ütvehajlító vizsgálatok eredményei a szakításhoz hasonló, ám sokkal jelentősebb mértékű csökkenést mutattak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium 2024-2.1.1-EKÖP kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült a Széchenyi István Egyetemen (pályázati azonosító: EKÖP-24-3-I).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Pokharel, A., Falua, K. J., Babaei-Ghazvini, A., & Acharya, B. *Biobased polymer composites: A review*. Journal of Composites Science, MDPI, 2022, 6(9), 255.
- [2] Lackner, M. *Bioplastics—biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics*. In K. Othmer (Ed.), *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (6th ed.). John Wiley & Sons, 2015.
- [3] Kaur, R., Pathak, L., & Vyas, P. *Biobased polymers of plant and microbial origin and their applications - A review*. Biotechnology for Sustainable Materials, Springer, 2024, 1(1), 13.
- [4] Patel, N., Feofilovs, M., & Blumberga, D. *Agro biopolymer: A sustainable future of agriculture—state of art review*. Environmental and Climate Technologies, Riga Technical University, 2022, 26(1), 499-511.
- [5] Jha, S., Akula, B., Enyima, H., Novak, M., Amin, V., & Liang, H. *Biodegradable biobased polymers: A review of the state of the art, challenges, and future directions*. Polymers, MDPI, 2024, 16(16), 2262.
- [6] Mahata, D., Karthikeyan, S., Godse, R., Gupta, V. *Poly(butylene adipate-co-terephthalate) polyester synthesis process and product development*. Polymer Science, Series C, Springer, 2021, 63, 102–111.
- [7] Zhou, X.-W., Huang, J., Zhang, X.-H., Li, T., Wang, Y., Wang, S.-B., Xia, B.-H., & Dong, W.-F. *Design of tough, yet strong, heat-resistant PLA/PBAT blends with reconfigurable shape memory behavior by engineering exchangeable covalent crosslinks*. Chinese Journal of Polymer Science, Springer, 2023, 41(12), 1868-1878.
- [8] Li, P., Jiang, Y., Chen, J., Min, J., Fu, Q., & Zhang, J. *Preparation of high-performance PLA/PBAT blends with hierarchical structure by controlling distribution of oriented region*. Journal of Polymer Research, Springer, 2023, 30(3), 128.
- [9] Wang, X., Peng, S., Chen, H., Yu, X., & Zhao, X. *Mechanical properties, rheological behaviors, and phase morphologies of high-toughness PLA/PBAT blends by in-situ reactive compatibilization*. Composites Part B: Engineering, Elsevier, 2019, 173, 107028.
- [10] Thapliyal, D., Verma, S., Sen, P., Kumar, R., Thakur, A., Tiwari, A. K., Singh, D., Verros, G. D., Arya, R. K. *Natural fibers composites: Origin, importance, consumption pattern, and challenges*. Journal of Composites Science, MDPI, 2023, 7(12), 506.
- [11] Duflou, J.R., Van Acker, K. Dewulf W. *Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study*. MRS Bulletin, Springer, 2012, 37, 374–382.
- [12] Mohite, A. S., Jagtap, A. R., Avhad, M. S., More, A. P. *Recycling of major agriculture crop residues and its application in polymer industry: A review in the context of waste to energy nexus*. Energy Nexus, Elsevier, 2022, 7, 100134.
- [13] Andrzejewski, J., Grad, K., Wiśniewski, W., & Szulc, J. *The use of agricultural waste in the modification of poly(lactic acid)-based composites intended for 3D printing applications. The use of toughened blend systems to improve mechanical properties*. Journal of Composites Science, MDPI, 2021, 5(10), 253.
- [14] Feng, J., Zhang, W., Wang, L., and He, C. *Performance comparison of four kinds of straw/PLA/PBAT wood plastic composites*. BioResources, North Carolina University, 2020, 15(2), 2596-2604.
- [15] Sudha G. S., Aswathy N. R., Biswal M. Ch., Mohapatra A. K. *Investigating the reinforcing effect of jute fiber in a PLA & PBAT biopolymer blend matrix for advanced engineering applications: Enhancing sustainability with bioresources*. Materials Today Communications, Elsevier, 2024, 40, 109960.
- [16] Ramachandran, A., Mavinkere Rangappa, S., Kushvaha, V., Khan, A., Seingchin, S., Dhakal, H. N. *Modification of fibers and matrices in natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review*. Macromolecular Rapid Communications, Wiley, 2022, 43(17), 2100862
- [17] Chaiwutthinan, P., Chuayjuljit, S., Srasomsu, S., Boonmahitthisud, A. *Composites of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability*. Journal of Applied Polymer Science, 2019, Wiley, 136(21), 47543
- [18] Oliver-Ortega H., Tarrés Q., Mutjé P., Delgado-Aguilar M., Méndez J. A., Espinach F. X. *Impact Strength and Water Uptake Behavior of Bleached Kraft Softwood-Reinforced PLA Composites as Alternative to PP-Based Materials*. Polymers, MDPI, 2020, 12(9), 2144.