

Keményítővel és cellulózzal töltött politejsavból előállított fröccsöntött lebomló polimer termékek laboratóriumi lebontásának és komposztálásának vizsgálata

Tábi T., Németh Á., Selmeczy A., Szalay F.

Accepted for publication in Biohulladék

Published in 2010

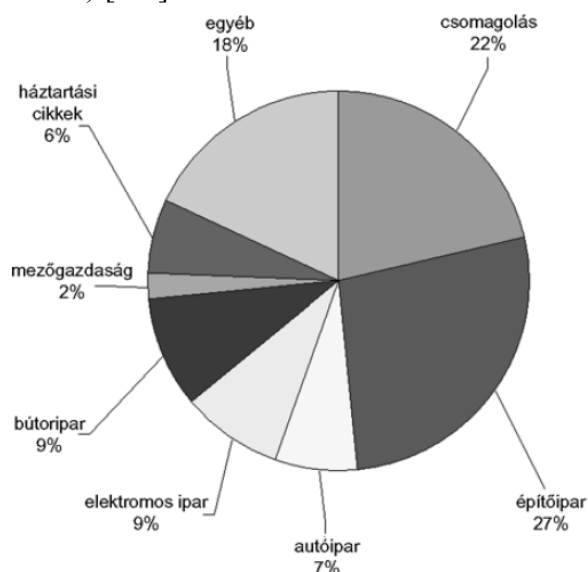
DOI:

Keményítővel és cellulózzal töltött politejsavból előállított fröccsöntött lebomló polimer termékek laboratóriumi lebontásának és komposztálásának vizsgálata

TÁBI TAMÁS¹
PhD hallgató
Dr. NÉMETH ÁRON²
Egyetemi adjunktus
SELMECZY ANNA³
BSc hallgató
SZALAY FERENC¹
MSc hallgató

1. Bevezetés

A XXI. század elején a mesterséges, kőolaj alapú polimerek, azaz a műanyagok szerepe a fejlett társadalmakban továbbra is fokozódik. A mesterséges polimerek napjainkban már nélkülözhetetlen alapanyagai a korszerű terméktervezésnek; belőlük hosszú, tartós, rendeltetésszerű használatra tervezett alkatrészeket, műszaki termékeket gyártanak (1. ábra) [1-4].



1. ábra. A mesterséges polimerek feldolgozásának megoszlása Németországban, 2001-ben [1]

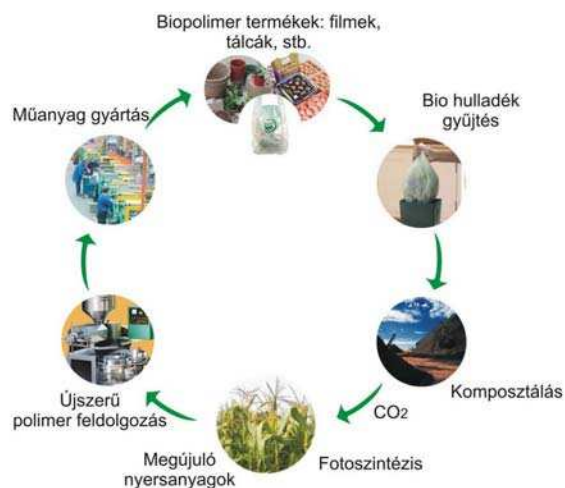
Ennek megfelelően alapanyaguk is rendkívül stabil, ellenálló a mechanikai igénybevételnek, a környezeti behatásoknak, UV fénynek, baktériumoknak, savaknak, lúgoknak, stb. Amint az a 1. ábráról is leolvasható, mesterséges és ugyanolyan stabil polimereket

használnak csomagolástechnikai termékek gyártására, amelyek esetében az újrahasznosítás nem gazdaságos, így jelentős mértékben növelik a szemételepek, lerakók nagyságát, ahol a lebomlásuk stabil alapanyaguk következtében több száz évet vesz igénybe. A mérnökök már a XX. század közeledtével szembesültek a fogyatkozó kőolajkészletek, valamint a növekvő hulladéklerakók problémájával, aminek hatására a mesterséges, kőolaj alapú polimereket egyre több vád éri. A fenntartható fejlődés érdekében a megoldást olyan polimerek alkalmazása jelenti, amelyek a kőolaj alapú mesterséges polimerekkel ellentétben alapanyaguk megújuló, természetes erőforrásból származik, valamint lebomlóak, és nem szennyezik a lebomlásuk során a környezetet. A megújuló erőforrásból előállított, biológiai úton lebomló polimereket lebomló polimereknek, vagy röviden biopolimereknek is hívják. Egy lebomló polimer termék életciklusa teljes mértékben beilleszthető a természet körforgásába (2. ábra) [5-10].

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék

³Szent István Egyetem, Talajtani és Agrokémiai Tanszék



2. ábra. A lebomló polimer termékek életciklusa

A megújuló erőforráson alapuló biopolimer gyártás első lépése magának a megújuló erőforrásnak a kinyerése, és abból korszerű, természetbarát technológiákkal a biopolimer gyártás. A kész alapanyagot ezután feldolgozzák, termék lesz belőle, majd a termék életciklusa végén összegyűjtik, komposztálják, és a komposzt táptalajként szolgálhat a megújuló erőforrás következő generációjának. Az egyik ilyen megújuló erőforrás, amely potenciális alapanyaga lehet a rövid használati idejű termékeknek, a keményítő. A keményítő megtalálható a Földön széleskörűen rendelkezésre álló kultúrnövényekben, így a kukoricában, búzában, burgonyában, valamint a rizsben és a borsóban is. Legjelentősebb ezek közül a kukorica, amelyet a Földön legnagyobb mértékben termesztnek, és amelyik az egyik legmagasabb keményítőtartalommal (67%) rendelkezik a felsorolt növények közül. A kutatások kezdetben úgynevezett termoplasztikus keményítő (TPS - ThermoPlastic Starch) előállítására irányultak a keményítő élelmiszeripari feldolgozásának mintájára. Extruderben hő, nyírás, valamint a keményítőhöz adott lágyítók (pl. víz, glicerin) hatására homogén termoplasztikus keményítőt tudtak előállítani, amiből utána hagyományos polimer feldolgozási technológiákkal végterméket tudtak gyártani. A termoplasztikus keményítő

jelentős hátrányait, a gyenge mechanikai tulajdonságait, vízdoldhatóságát, öregedési hajlamát a kutatók természetes szálakkal vagy más polimerekkel való társítással igyekeztek kiküszöbölni, de komoly áttörés a mai napig nem történt. Napjainkban a szintén lebomló, azonban kőolaj alapú polikaprolaktonnal (PCL) társítják, és az így kapott társított alapanyagból fóliát gyártanak [11-15].

A keményítővel történő kutatások másik része annak erjesztésére irányult. Keményítő és cukor erjesztésével tejsav, annak polimerizációjával pedig úgynevezett politejsav (PLA - PolyLactic Acid) állítható elő. A PLA előállítása korábban drága, kőolaj alapú technológián alapult, de az olcsóbb, erjesztéses technológiával az alapanyag szélesebb körben elterjedhetett, azonban az ára napjainkban (2-4 Euró) még nem versenyképes a kiváltani szánt termékek alapanyagának árával (0,8-1,4 Euró). Ugyanakkor a PLA kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, és mivel megújuló erőforrásból elő lehet állítani, így jelentős potenciállal rendelkezik a jövőbeni széleskörű alkalmazását tekintve, amelyet a világszerte nyíló PLA gyártó üzemek is alátámasztanak. A PLA feldolgozható a hagyományos polimer feldolgozás technológiákkal, mint például extrúzióval, fröccsöntéssel, vákuumformázással, szálhúzással, fröccs-, valamint extrúziós fúvással. A PLA-ból egyszer használatos evőeszközök, mezőgazdasági palántázócserepek, talajtakaró fóliák, tálak, csészék, poharak, dobozok, irodai eszközök állíthatók elő, ugyanakkor a jövőben tartós használati idejű műszaki termékek, alkatrészek valamint orvostechikai implantátumok (emberi testben felszívódik) alapanyagaként is megjelenhet (3. ábra) [16-20].



3. ábra. PLA-ból készült lebomló polimer termékek [21]

A PLA-ból készült termékek lebomlása során természetes anyagok, víz, humusz, szén-dioxid, metán keletkezik, a lebomlás idejét pedig jelentősen befolyásolja a környezeti hőmérséklet és páratartalom. 60°C alatt közel stabilnak mondható, így szobahőmérséklet és páratartalom mellett 2-3 évig is használható, mielőtt elkezdődne a termék tördelődése. Komposztálási körülmények mellett pedig 1 hónap után indul meg a tördelődés, a teljes lebomlás pedig 2-3 hónap alatt végbe is megy. Tekintve, hogy a 2-3 év egy tartós műszaki termék élettartama szempontjából rövid időnek, a komposztálással elérhető „rövid”, 2-3 hónapos lebontás pedig hosszú időnek tekinthető, így a kutatók különböző természetes töltőanyagokkal próbálták befolyásolni a lebomlási időt a mechanikai tulajdonságok legnagyobb mértékű megtartása, esetleges növelése mellett. A társítás során az ár, valamint a lebontási idő csökkentésének céljából általában valamilyen természetes, könnyen bomló töltőanyagot (keményítő) vagy az ár csökkentése valamint a mechanikai tulajdonságok növelése céljából természetes szálakat (len, kender, cellulóz, szizál, stb.) adagoltak a PLA-hoz [22-27].

Kísérleteink során elvégeztük a társítatlan („tisztá”) PLA, valamint a keményítővel, és a cellulózzal társított PLA próbatestek laboratóriumi enzimatikus, valamint valós komposztálási vizsgálatát. Kutatásunkat a Biohulladék Magazin 2009. októberi [28] számában megjelent cikkünk folytatásaként közöljük, amelyben részletesen beszámoltunk az alapanyagok gyártásáról és mechanikai tulajdonságainak vizsgálatáról.

2. Mérési elrendezés

Az alapanyagok feldolgozását (extrudálását és fröccsöntését) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszékének laboratóriumában végeztük el. Az általunk használt politejsavat az Ecolac Kft.-től (Magyarország), a kukoricakeményítőt a Brenntag Hungária Kereskedelmi Kft.-től (Meritena 100 jelű alapanyag, Magyarország), a cellulóz szálakat pedig a JRS GmbH.-től (Arbocel BWW40 jelű alapanyag, Németország) szereztük be. A keményítőt és a cellulózt 130°C-on 8 óráig, a PLA-t 85°C-on 6 óráig szárítottuk feldolgozás előtt. A szárított alapanyagokat Brabender Plasticorder PL 2100 típusú kétszágas extruderrel ömledékkeveréssel társítottuk 190°C-on. 30m% keményítővel, valamint 15m% cellulózzal töltött PLA alapanyagot hoztunk létre, amelyből 80x80mm alapterületű, 2 mm vastag próbatesteket fröccsöntöttünk Arburg Allrounder 320C 600-250 típusú fröccsöntőgéppel (csigaátmérő=35mm). A próbatestekből a laboratóriumi enzimatikus lebomlás kísérletekhez 15x15mm alapterületű kis próbatesteket vágtunk ki, amelyeket keményítő bontó enzim (100 ml-hez adott 3 ml enzim) oldatban, valamint desztillált vízben tároltunk 60°C-on, illetve 80°C-on. A lebomlást vizuálisan, tömegméréssel, valamint elektronmikroszkópi felvételek (Jeol JSM-638OLA típusú elektronmikroszkóp) segítségével követtük nyomon. Az alábbi képlet alapján számoltuk a próbatestek tömegének változását:

$$B = \frac{m_b(t) - m_{be}}{m_{be}} \cdot 100$$

ahol B [%] a minta tömegének változása a lebomlási folyamat során, $m_b(t)$ [g] a minta lebomlási vizsgálatának adott időpillanatában mért tömege, m_{be} [g] a minta lebomlási vizsgálat előtti tömege. A kapott eredmény negatív előjele a minta bomlását (tömegcsökkenését), a pozitív a duzzadását jelzi. Az enzimatikus lebomlási vizsgálatokat a Budapesti Műszaki Egyetem Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karának Alkalmazott

Biotechnológiai és Élelmiszertudományi Tanszékének laboratóriumában végeztük el. A komposztálási kísérletekhez egész próbatesteket használtunk és az aktív komposztból kétnaponta ellenőrzéssel vizsgáltuk a lebomlási folyamatot. A két hétig tartó komposztálást az Ökörtelek-völgyi komposztáló telepen végeztük el.

3. Kísérleti eredmények és értékelésük

3.1 Laboratóriumi lebomlás vizsgálat

A kontrollált körülmények között elvégzett laboratóriumi lebomlás-vizsgálat esetében 80°C-os desztillált vizes és enzim oldat hatására a 144 óra elteltével mind a társítatlan PLA próbatestek, mind pedig a 30m% keményítővel és a 15m% cellulózzal töltött próbatestek egyaránt felrepedeztek, és megkezdődött az elaprózódásuk. A társítatlan PLA, valamint a keményítővel töltött PLA próbatestek 144 óra enzimatis bontás után kézzel könnyel szétmorzsolhatóak voltak, már érintésre széttörtek, amíg a cellulóz töltésű PLA próbatestek jobban egy darabban maradtak, kézi szétmorzsolásuk nehezebb volt (4-6. ábra).



4. ábra. PLA próbatestek elaprózódása 144 óra után (80°C). Bal oldali próbatestekről a kép a bontás előtt, a középső, valamint jobb oldali próbatestek a bontás után készültek

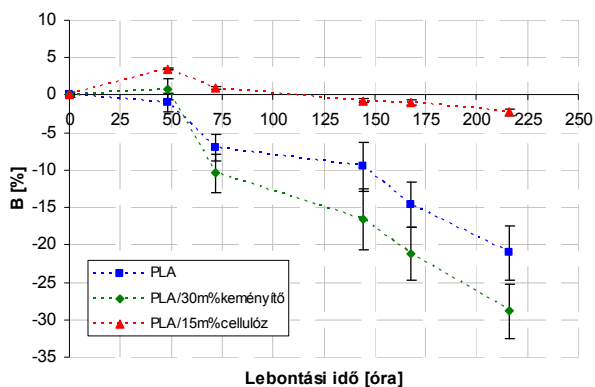


5. ábra. 30m% keményítővel töltött PLA próbatestek elaprózódása 144 óra után (80°C). Bal oldali próbatestekről a kép a bontás előtt, a középső, valamint jobb oldali próbatestek a bontás után készültek

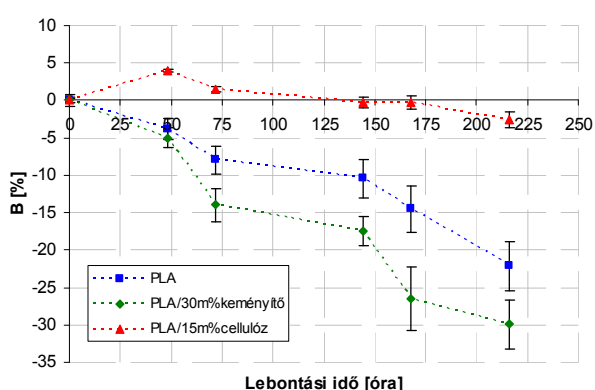


6. ábra. 15m% cellulóz szállal töltött PLA próbatestek elaprózódása 144 óra után (80°C). Bal oldali próbatestekről a kép a bontás előtt, a középső, valamint jobb oldali próbatestek a bontás után készültek

A próbatestek tömegének nyomon követésével megfigyelhető, hogy a társítatlan PLA-hoz képest a keményítő hozzáadása meggyorsította, a cellulóz pedig lassította a bomlási folyamatot. 216 órás 80°C-os bontást követően a társítatlan PLA tömege 21m%-ban, a keményítő tartalmú PLA tömege 29m%-ban, a cellulóz töltésű PLA tömege pedig mindössze 2m%-ban csökkent a bontó közeg típusától függetlenül (desztillált víz, enzim oldat) (7-8. ábra).



7. ábra. Tömegváltozás 80°C-os enzimátikus bontás során

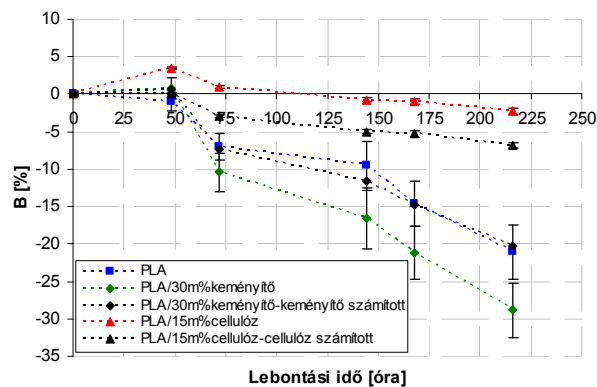


8. ábra. Tömegváltozás 80°C-os vízzel történő bontás során

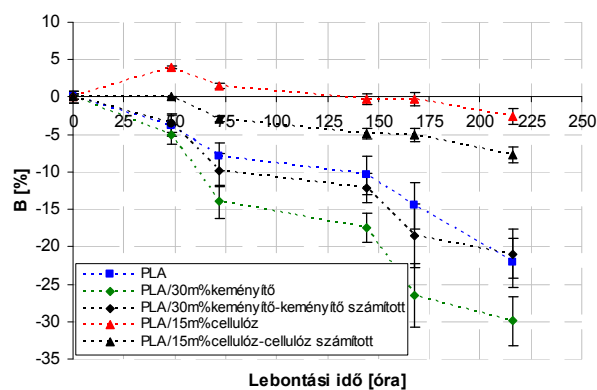
Látható a 7. és 8. ábrán, hogy a tömegcsökkenésre nem volt jelentős hatással a bontó enzim jelenléte, a próbatetek a bontó enzim hiányában is elaprózódtak és a tömegük is hasonló mértékben csökkent. 216 óra bontás után a mérést tovább folytatni nem lehetett, mert a cellulóz tartalmú próbatetek kivételével a többi próbatestet a tömegméréskor a legkisebb érintésre széttöredezett.

A töltött PLA anyagok esetében a mért tömegcsökkenés értékeit a PLA tartalom tömegcsökkenésére vonatkoztatva korrigáltam; a 30m% keményítő tartalmú PLA tömegcsökkenés értékeit 0,7-tel, amíg a 15m% cellulóz tartalmú PLA tömegcsökkenés értékeit pedig 1/0,85-tel szoroztam, mivel az alkalmazott bontási körülmények között a keményítőt könnyen (azonnal), a cellulózt nehezebben (nem) bomló alapanyagként feltételeztem. Az eredményül kapott görbék a keményítővel és cellulózzal töltött PLA esetében kizárólag a PLA fázis lebomlását

jellemzik (9. és 10. ábra). A cellulóz töltésű PLA görbéjéből a szorzást megelőzően kivontam a 48. órában mérhető duzzadás értékét, hogy csak a tömegcsökkenést vehessem figyelembe.



9. ábra. PLA tartalom szerint korrigált tömegváltozás a 30m% keményítő töltésű PLA és a 15m% cellulóz töltésű PLA esetében 80°C-os enzimátikus bontás során

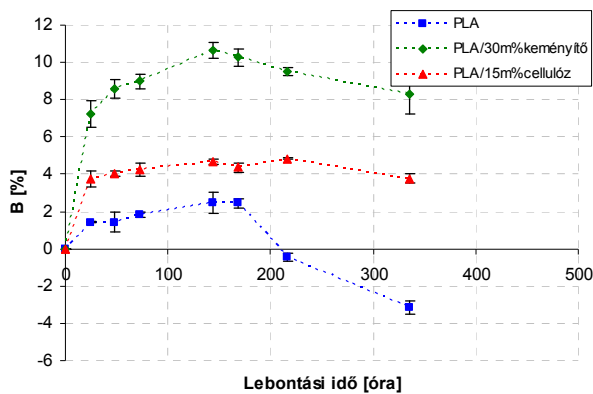


10. ábra. PLA tartalom szerint korrigált tömegváltozás a 30m% keményítő töltésű PLA és a 15m% cellulóz töltésű PLA esetében 80°C-os vízzel történő bontás során

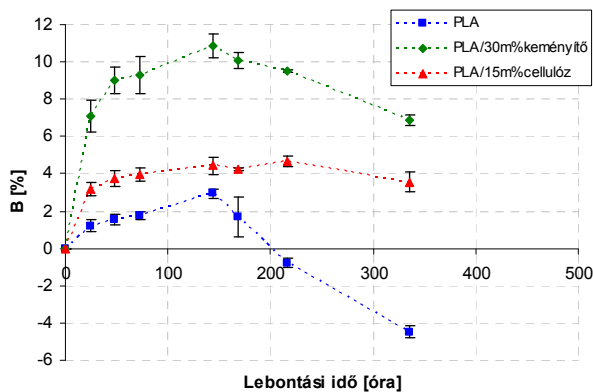
A keményítő töltésű PLA esetében a PLA fázis tömegcsökkenésén látható, hogy az alig tér el a társítatlan PLA esetében mért tömegcsökkenéstől, ami azt jelenti, hogy a keményítőtartalom arányosan gyorsította fel a keményítő töltésű PLA lebomlását úgy, hogy a keményítőt a bontó közeg könnyen kioldotta, ugyanakkor a kioldott keményítő következtében a PLA fajlagos felülete megnőtt, de ennek nem volt további, lebomlást jelentősen elősegítő hatása. A cellulóz töltésű PLA esetében azonban a PLA fázis tömegcsökkenése jóval kisebb, mint a

társítatlan PLA tömegcsökkenése, tehát a cellulóz töltés hatására a hozzáadott cellulóz tartalomhoz képest jelentősen nagyobb mértékben csökken a PLA lebomlásának sebessége, feltételezhetően azért, hogy a cellulóz szálak jelenlétének következtében a bontó közeg számára a PLA fázis hozzáférhetősége lecsökken.

60°C-os bontás esetén a 150. óráig a próbateteknek csak a duzzadása következett be, tömegcsökkenés nem. Megfigyelhető ugyanakkor, hogy a PLA lebomlásának sebessége a 150. órát követően nagyobb, mint a keményítő töltésű PLA-é ami azzal magyarázható, hogy a keményítő tartalmú PLA duzzadása még nem fejeződött be, amikor a PLA fázis már elkezdett bomlani. A bontó enzimnek ebben az esetben sem volt jelentős hatása a tömegváltozásra (11-12. ábra).



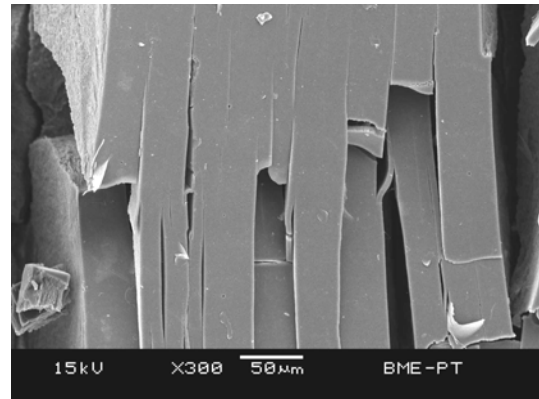
11. ábra. Tömegváltozás 60°C-os enzimikus bontás során



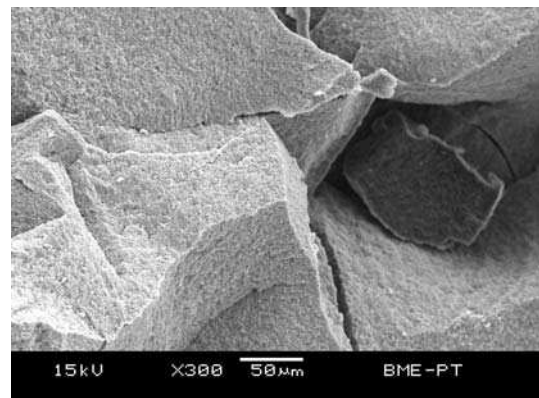
12. ábra. Tömegváltozás 60°C-os vízzel történő bontás során

Az enzimikus bontás során kapott próbatetek felszínéről és töretfelületéről

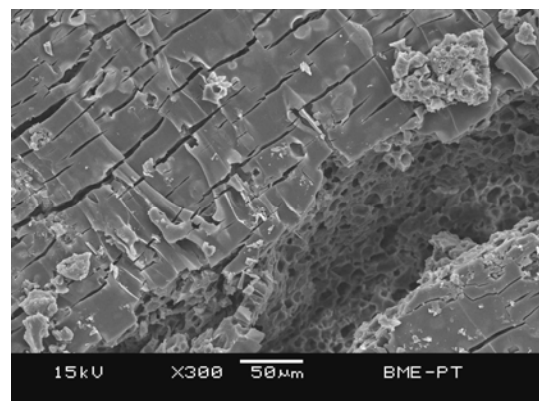
elektronmikroszkópi felvételeket készítettem (13-18. ábra).



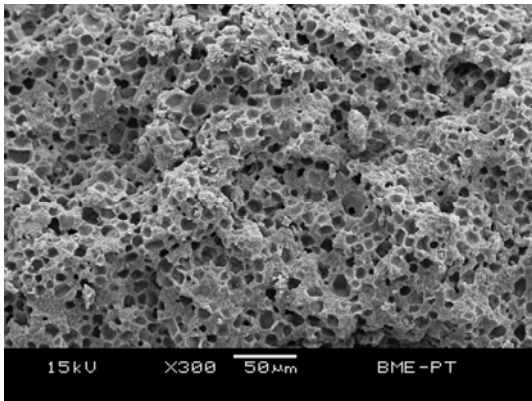
13. ábra. PLA próbatest felszíne 80°C-os bontás után



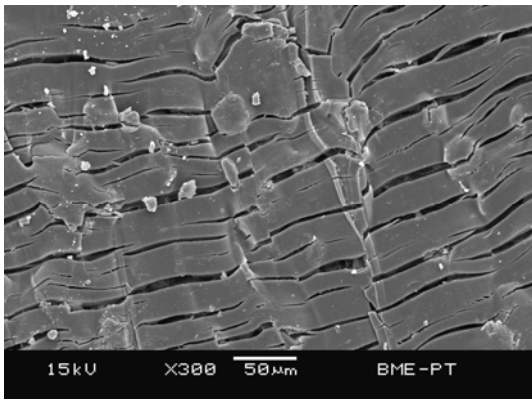
14. ábra. PLA próbatest töretfelülete 80°C-os bontás után



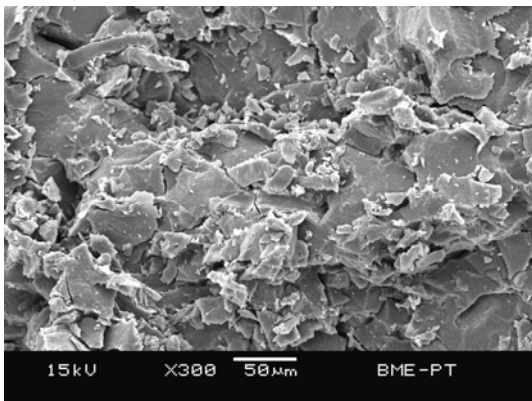
15. ábra. 30m% keményítő töltésű PLA próbatest felszíne 80°C-os bontás után



16. ábra. 30m% keményítő töltésű PLA próbatest töretfelülete 80°C-os bontás után



17. ábra. 15m% cellulóz töltésű PLA próbatest felszíne 80°C-os bontás után



18. ábra. 15m% cellulóz töltésű PLA próbatest töretfelülete 80°C-os bontás után

A PLA, valamint a keményítő tartalmú PLA próbatestek felszínéről készített elektronmikroszkópi felvételeken (13., 15. ábra) jól látszik, hogy azokon jelentős kiterjedésű repedések jelentek meg, ugyanakkor ennél kisebb kiterjedésű repedések figyelhetők meg a cellulóz tartalmú PLA próbatestek felszínén (17. ábra). A töretfelületeket megvizsgálva azt tapasztaltuk,

hogy a PLA-hoz adott keményítő a lebomlási folyamat során kioldódott, és szemcsés szerkezetéből adódóan jelentős mennyiségű üreget hagyott maga után (14., 16. ábra). A felvétel egyértelművé teszi, hogy a keményítő elősegíti a PLA elaprózódását, az elaprózódott darabok fajlagos felületének növelését és ezáltal pedig a lebomlási folyamat gyorsítását. A cellulóz töltés hatására ugyanakkor a próbatestek felszínén (17. ábra) és töretfelületén (18. ábra) kisebb repedések figyelhetők meg, mint a társítatlan PLA esetében, amiből arra lehet következtetni, hogy a cellulóz töltés hatására a PLA lebomlása lassúbb lesz, ezáltal pedig valószínűleg a tartós használati ideje is kitolható.

3.2 Komposztálási lebomlás vizsgálat

A komposztálási vizsgálat során a laboratóriumi lebomlás vizsgálat eredményeihez hasonló eredményeket kaptunk; a komposztálás során a próbatestek kezdetben megduzzadtak, nedvességet vettek fel, majd megindult a tömegük csökkenése és ezzel együtt az elaprózódás is. A PLA (19. ábra) és a keményítő töltésű PLA (20. ábra) próbatestek a komposztálás 2. napján már elkezdtek elaprózódni, amíg a cellulóz töltésű PLA (21. ábra) próbatestek még egyben maradtak, amely megerősíti a cellulóz a PLA fázisra gyakorolt, lebomlási sebességet csökkentő hatását.



19. ábra. Komposztált PLA próbatest 2 nap elteltével



20. ábra. Komposztált 30m% keményítő töltésű PLA próbatest 2 nap elteltével



23. ábra. Komposztált 30m% keményítő töltésű PLA próbatest 14 nap elteltével



21. ábra. Komposztált 15m% cellulóz töltésű PLA próbatest 2 nap elteltével



24. ábra. Komposztált 15m% cellulóz töltésű PLA próbatest 2 nap elteltével

A komposztálás 14. napján már mind a PLA, mind pedig a keményítő és cellulóz töltésű PLA próbatestek elaprózódtak (22-24. ábra).



22. ábra. Komposztált PLA próbatest 14 nap elteltével

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a PLA, valamint a keményítővel és cellulózzal töltött PLA termékek komposztálhatóak, lebomlanak a komposztban, így ezeknek a teljes mértékig megújuló erőforrásból előállítható lebomló polimereknek a használata tényleges megoldást jelenthet az egyszer használatos vagy rövid használati idejű termékek okozta hulladék-felhalmozódás megszüntetésére.

5. Összefoglalás

Napjainkban a hagyományos, kőolaj alapú polimerek (műanyagok) gyártását, feldolgozását és felhasználását, egyre több vád éri, mivel ezeket a fejlett társadalmak számára nélkülözhetetlen anyagokat kőolajból állítják elő, valamint a nem műszaki célú, főként csomagolótechnikai műanyag termékek

csekély árak és ezáltal gazdaságtalan újrahaznosításuk következtében jelentős mértékben növelik a hulladéklerakók nagyságát. Ezekre a problémákra jelenthet megoldást a megújuló erőforrásból előállított, biológiai úton lebomló polimerek (röviden lebomló polimerek) használata. Kísérleteinkben a keményítőből, mint a Földön széleskörűen megtalálható megújuló erőforrásból előállított, kitűnő mechanikai tulajdonságokkal rendelkező lebomló polimer, a politejsav (PLA), valamint annak kukoricakeményítővel és cellulózzal társított alapanyagait vizsgáltuk laboratóriumi illetve komposztálással történő lebontással. Mind a laboratóriumi, mind a komposztálós lebomlás vizsgálat során megállapítottuk, hogy kezdetben az alapanyagok nedvességet vettek fel, majd meghatározott idő elteltével megindult a próbatestek elaprózódása, és a tényleges lebomlás, amelyet a próbatestek tömegének csökkenése jelzett. A laboratóriumi lebomlás vizsgálat eredményeképpen megállapítottuk, hogy a keményítő töltés gyorsította, a cellulóz ellenben lassította a lebomlási folyamatot, ugyanakkor az is kijelenthető, hogy a keményítő csak a PLA-hoz adagolt mennyiséggel arányosan növelte a lebomlás sebességét, amíg a cellulóz a PLA-hoz adott töltőanyag hányadnál jelentősen nagyobb mértékben csökkentette a lebomlás sebességét. Az említett töltőanyagok lebomlási időre gyakorolt hatásának következtében a keményítő töltést inkább rövid életciklusra, a cellulóz töltést pedig tartós használatra tervezett PLA termék esetében célszerű alkalmazni. Végül a komposztálási vizsgálatokkal bizonyítottuk, hogy a társítatlan PLA, valamint a keményítővel és cellulózzal töltött PLA alapanyagok lebonthatóak komposztban, így ezeknek a teljes mértékig megújuló erőforrásból előállítható lebomló polimereknek a használata tényleges megoldást jelenthet az egyszerű használatos vagy rövid használati idejű termékek okozta hulladék-felhalmozódás megszüntetésére.

5. Összefoglalás (angol)

Nowadays, the production, processing and usage of ordinary, petrol based polymers (plastics) are accused, because these indispensable materials are produced by crude oil, and the non engineering plastic products typically used in packaging applications are increasing the amount of landfills dramatically due to their low price and thus uneconomic recyclability. For these problems, the usage of renewable resource based, biodegradable polymers (biopolymers) can be a solution. In our research the laboratory scale enzymatic degradation tests and the composting tests of the starch based (starch can be found all over the world in high amounts, and is a yearly renewable resource) poly(lactic acid) (PLA) and the PLA blended with maize starch and cellulose fibres were carried out. It was found by the results of both laboratory and composting tests that first the moisture content of the materials increased, then the fragmentation of the samples begun, and finally the actual degradation took place, which was determined by mass loss of the samples. As the result of laboratory degradation tests it was found that starch increased while cellulose fibres decreased the degradation process. It was also found that starch only increased the degradation rate of the PLA/starch blend proportional of starch content, however cellulose decreased the degradation rate of PLA/cellulose blend by much higher magnitude than the cellulose content of the blend. Due to the effect of these fillers on the degradation rate and thus time, starch filling is to be used for short life-cycle PLA based products, while cellulose filling is to be used for higher life-cycle PLA based product. Finally by the composting tests it was proven that pure PLA, and PLA/starch, PLA/cellulose blends can be degraded in compost, thus the usage of these renewable resource based biodegradable materials can be a true solution to eliminate the increasing landfills caused by short-life cycle and disposable plastic products.

6. Irodalomjegyzék

1. Szabó F.: A világ műanyagipara II. Egyesült Államok és Németország. Közép- és hosszú távú előrejelzés a világon, *Műanyag és Gumi*, 41, 2004, 3-8
 2. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
 3. Czvikovszky T.: Lehet-e zöld a műanyag?, *Műanyag és Gumi*, 43, 2006, 24-31
 4. Czigány T., Izer A., Tábi T.: Polimer kompozitok – áttekintés, *Műanyag és Gumi*, 44, 2007, 185-191
 5. Orbán S., Pásztor M.: Bioműanyagok a környezetvédelem és a klímavédelem szolgálatában, *Műanyag és Gumi*, 46, 2009, 15-18
 6. Kiss R.: Egy ígéretes alternatíva – hagyományos műanyag helyett biopolimer, *Műanyag és Gumi*, 46, 2009, 432-435
 7. Kissné Lovas K., Suba P., Nagy G.: Biológiailag lebomló műanyagok, *Műanyag és Gumiipari Évkönyv*, 7, 2009, 32-33
 8. Alexa L.: Komposztálható műanyagok a Novamonttól, *Biohulladék*, 3, 2009, 12-16
 9. Chandra R., Rustgi R.: Biodegradable polymers, *Progress in Polymer Science*, 23, 1998, 1273-1335
 10. Bodnár I.: Biopolimerek: Biológiailag bontható műanyagok, *Alkalmazott Kémiai Tanszék, Debreceni Egyetem*, 2008
 11. Czigány T., Romhány G., Kovács J. G.: Starch for injection moulding purposes, 3. fejezet, 81-108, *Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends, and Composites*, Hanser Publishers, Munich-Cincinnati, 2007
 12. Tábi T., Czeller A., Kovács J. G.: Investigation and development of the processability of biodegradable polymer, *Gépészet 2008*, CD proceeding, 8 oldal
 13. Tábi T., Kovács J. G.: Examination of injection moulded thermoplastic maize starch, *Express Polymer Letters*, 1, 2007, 804-809
 14. Avérous L.: Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review, *Journal of Macromolecular Science*, 44, 2004, 231-274
 15. Stepto R. F. T.: Thermoplastic starch, *Macromolecular Symposia*, 152, 2000, 73-82
 16. Martin O., Avérous L.: Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems, *Polymer*, 42, 2001, 6209-6219
 17. Molnár K., Imre B.: Politejsav-alapú biodegradálható kompozitok fejlesztése, *Műanyag és Gumiipari Évkönyv*, 7, 2009, 34-38
 18. Lim L. T., Auras R., Rubino M.: Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress in Polymer Science*, 33, 2008, 820-852
 19. Bánhegyi Gy.: Hőformázott csomagolóeszközök politejsavból, *Műanyagipari Szemle*, 1, 2004
 20. Gupta A. P., Kumar V.: New emerging trends in synthetic biodegradable polymers – Polylactide: A critique, *European Polymer Journal*, 43, 2007, 4053-4074
 21. www.natureworksllc.com
 22. Gattin R., Copinet A., Bertrand C., Couturier Y.: Comparative biodegradation study of starch- and polylactic acid-based materials, *Journal of Polymers and the Environment*, 9, 2001, 11-17
 23. Jang W. Y., Shin B. Y., Lee T. J., Narayan R.: Thermal properties and morphology of biodegradable PLA/starch compatibilized blends, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 2007, 457-464
 24. Wang H., Sun X., Seib P.: Properties of poly(lactic acid) blends with various starches as affected by physical aging, *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 2003, 3683-3689
 25. Zhang J., Sun X.: Mechanical properties of poly(lactic acid)/starch composites compatibilized by maleic anhydride, *Biomacromolecules*, 5, 2004, 1446-1451
-

26. Tábi T., Kovács J. G.: Keményítővel társított politejsav (PLA – PolyLactic Acid) fröccsöntése és vizsgálata, Műanyag és Gumiipari Évköny, 7, 2009, 18-21
27. Tábi T., Kovács J. G.: Fröccsöntött politejsav termékek vizsgálata, Műanyag és Gumi, 46, 2009, 189-192
28. Tábi T., Kovács J. G.: Politejsav (PLA – PolyLactic Acid) és keményítő keverékéből előállított lebomló polimerek vizsgálata, Biohulladék, 3, 2009, 20-24

Köszönetnyilvánítás

A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. Köszönjük továbbá az ARBURG Hungária Kft-nek, hogy rendelkezésünkre bocsátotta az ARBURG Allrounder 320C 600-250 típusú fröccsöntő gépet, a Wittmann Robottechnikai Kft-nek a W 711 robotot, köszönjük továbbá a Lenzkes GmbH-nak a szerszámfelfogókat.
