

Politejsav alapú habok szuperkritikus széndioxiddal segített extrúziós előállítása és vizsgálata

Tábi T., Bocz K., Martial S., Fages J.

Accepted for publication in Polimerek

Published in 2015

DOI:

Dr. Tábi Tamás^{*,**}, Bocz Katalin^{***}, Sauceau, Martial^{****}, Fages, Jacques^{*****}

Politejsav alapú habok szuperkritikus széndioxiddal segített extruziós előállítása és vizsgálata

Munkánk során elemeztük a politejsav (PLA), mint megújuló erőforrásból előállított és egyben biológiai úton lebontható biopolimer szuperkritikus szén-dioxiddal történő extruziós fizikai habosítási folyamatát, valamint megvizsgáltuk az így létrehozott biohabok tulajdonságait, egyúttal pedig az alkalmazhatóságukat. Megállapítottuk, hogy a habosított PLA a mechanikai, és termikus tulajdonságait, valamint porozitását illetve környezetbarát jellegét tekintve alkalmas a napjainkban széles körben alkalmazott expandált (habosított) polisztirol (EPS) kiváltására.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a környezettudatos gondolkodásmód térhódításával egyre inkább előtérbe kerülnek a biológiai úton lebontható polimerek (röviden lebontható polimerek vagy biopolimerek) [1]. A lebontható polimerek fő erőssége nem csak abban rejlik, hogy biológiai úton történő lebontással visszaforgathatóak a környezetbe – mivel humusszá, vízzé és szén-dioxiddá alakulnak, csökkentve ezáltal a rövid életciklusú műanyag termékek okozta hulladék-felhalmozódást – hanem egyes lebontható polimerek további fontos tulajdonsága, hogy nem kőolajból, hanem megújuló erőforrásból, biomasszából előállíthatók és ezáltal mérséklék a műanyagipar kőolaj függését.

Ezek a polimerek tulajdonképpen a biomassza alapú új műanyagipar első hírnökei, amelyek között már megtalálható például a cukornádból, mint megújuló erőforrásból előállított, ugyanakkor biológiai úton nem lebontható polietilén-tereftalát (bio-PET), amely a kőolaj alapú társával teljesen azonos kémiai szerkezetű és ezáltal tulajdonságú. Jelenleg a megújuló erőforrásból előállítható és egyben biológiai lebomlásra képes biopolimerek legígéretesebb képviselője a politejsav (Poly(Lactic Acid) (PLA)) [2].

PLA-t leginkább a nagy keményítőtartalmú agrárnövényekből (búza, kukorica, rizs), a keményítő tejsavas erjesztésével, valamint a képződött tejsav polikondenzációjával, vagy pedig a tejsav dimerjének, a laktidnak gyűrűfelnyitási polimerizációjával lehet előállítani. A PLA egy alifás, részben kristályos termoplasztikus poliészter, amely az észter kötés hidrolizálhatósága és az oligomer tejsav mikroorganizmusok általi feldolgozhatósága miatt bontható biológiai úton. A kőolaj

alapú szintetikus hőre lágyuló polimerekkel összemérhető mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik (60–65 MPa-os húzószilárdság, 3 GPa-os húzó rugalmassági modulusz), ugyanakkor kis deformabilitású (szakadási nyúlás 3–5%), rideg polimerről van szó [3]. Habár nem olyan rideg, mint a polisztirol (PS), de alkalmazhatóságának szélesítésére sok esetben lágyítószereket adagolnak hozzá [4]. A másik, széleskörű alkalmazását gátló tényező a lassú kristályosodása.

Habár a PLA egy részben-kristályos polimer, ömledékállapotú feldolgozása során szinte biztos, hogy gyakorlatilag amorf terméket kapunk. Kristályosodni ömledékből történő hűtéskor csak nagyon lassú hűtés esetén (<1°C/perc) képes, amely folyamat ugyan göcképzőkkel gyorsítható, de például fröccsöntéskor még így is kihívás a kikristályosítása az intenzív hűtés miatt. A PLA feldolgozás során történő kristályosítása pedig azért fontos, mivel így jelentős mértékben, akár duplájára növelhető a hőelaktartási hőmérséklete az amorf PLA termékek 50–60°C-os hőelaktartásához képest [5]. Ezek alapján PLA-ból leginkább egyszer használatos evőeszközöket, csészéket, poharakat, virágcserepeket, tálcákat, tálakat gyártanak, ugyanakkor orvostechnikai implantátumként [6] vagy akár műszaki termék kompozit alapanyagaként [7–10] is szolgálhat.

További nagyon jelentős alkalmazási területe lehet a habosítása és az általánosan műszaki cikkek csomagolására használt polisztirol (PS) habok kiváltása. A jellemzően rövid életciklusú, hagyományos (kőolaj-alapú, nem biodegradálható) polimer habok kiváltása lebomló alternatívákkal a természeti környezet (szélhordás) és a hulladéklerakók terhelésének csökkentése érdekében napjaink egyik kiemelt fontosságú feladata,

*Tudományos munkatárs, MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, tabi@pt.bme.hu

**PhD hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

***Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Szerves Kémia és Technológia Tanszék

****Egyetemi docens, *****Egyetemi tanár, RAPSODEE Research Centre, E'cole des Mines d'Albi, Franciaország

biopolimerek porózus mátrixanyagként történő alkalmazása azonban ma még újdonságnak számít. A PLA habosítására háromféle technológia áll rendelkezésre [11]. Az egyik technológia a PS habosítható gyöngyök előállítás technológiájából fejlődött ki, és segítségével habosítható PLA gyöngyöket lehet előállítani formahabok gyártásához. Ezen kívül létezik még a PLA kémiai habosítása, például azodikarbonammiddal vagy más, bomlása során legfőképpen CO_2 -t vagy egyéb (N_2 , NH_3 , CO) gázt fejlesztő vegyi anyaggal, végül pedig megvalósítható a PLA fizikai habosítása is, pl. az ömledékbe jutott szuperkritikus fluidum állapotban lévő CO_2 (sc- CO_2) segítségével.

A folytonos üzemű sc- CO_2 -dal segített extrúziós technológia ipari alkalmazhatóság szempontjából nagy termelékenysége, gazdaságossága és könnyű szabályozhatósága miatt részesítendő előnyben. A extruderbe bevezetett sc- CO_2 oldódik a polimer ömledékben, egyúttal lágyítóként funkcionál – csökkenti az ömledék viszkozitását, valamint az olvadási (T_m) és az üvegesedési átmenetek (T_g) hőmérsékleteit – ezáltal csökkenthető a feldolgozási hőmérséklet, redukálja a berendezés mechanikai terhelését (kopását), továbbá az oldott CO_2 a szerszámból kilépve a habosító komponens szerepét tölti be. A hagyományos kémiai habosító eljárásokkal szemben a sc- CO_2 -dal segített extrúziós habosítás további előnyei között említhetjük a kíméletességet (csökken a termikus és hidrolitikus degradáció veszélye), a környezetbarát hajlamot (nincs szükség szerves oldószerekre), a csökkent energiaszükségletet és a biztonságosságot. További előny, hogy a CO_2 jelentős göcképző hatással bír a PLA-ra [11], így az elkészült hab már akár a feldolgozás során kikristályosodhat és emelt hőalaktartósággal rendelkezhet. A sc- CO_2 -dal segített extrúziós habosítási eljárásokat és alkalmazási területeit *Sauceau* és munkatársai review közleményben foglalták össze [12]. *Pilla* és munkatársai pedig PLA extrúziós habosítási kísérletei során kimutatták, hogy láncnövelő adalék és talkum együttes alkalmazása nagyban segíti a sűrű, egységes cellaszerkezetű, mikrocellás PLA habok előállítását. Az általuk alkalmazott epoxifunkciós láncnövelő hatékonyan növelte a PLA molekulatömegét s ezáltal a PLA ömledékszilárdságát a feldolgozás során, amíg a talkum hatékony göcképzőnek bizonyult [13]. További hatékony és egyben környezetbarát göcképzői a PLA-nak a növényi eredetű cellulóz szál [14] vagy éppen a bazaltkőből előállított ásványi eredetű bazaltszál [7].

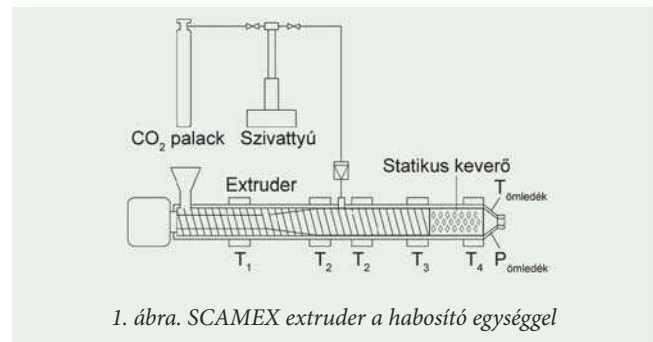
Mindezek alapján munkánkban sc- CO_2 -dal habosított, valamint egyben természetes szálerősítést (cellulóz, bazalt) is tartalmazó PLA alapú habok folytonos üzemű gyárthatóságát és az elkészült habok alkalmazhatóságát vizsgáltuk. Megvizsgáltuk továbbá a napjainkban széleskörűen alkalmazott expandált (habosított) polisztirol (EPS) helyettesíthetőségét az általunk létrehozott környezetbarát PLA habokkal.

2. MÉRÉSI ELRENDEZÉS

Kísérleteinkhez NATUREWORKS 3052D típusú PLA granulátumot (MFI = 14 g/10 perc, 2,16 kg terheléssel 210°C-on) használtunk. A szakirodalom alapján a PLA granulátumhoz két-

csigás LABTECH *Scientific* extruder segítségével göcképzőként 2 m% talkumot (IMIFABI *HTPultra5*, átlagos szemcse nagyság 0,65 μm) és 2 m% lánchossz-növelőt („Chain Extender”, CE, *Joncryl ADR4368-C*, BASF), valamint vagy 5 m% cellulóz-szálat (ARBOCEL *BWW40*, átlagos szálhossz és átmérő rendre 200 és 20 μm) vagy 5 m% bazaltszál (BASALTEX *KVT 150tex13-I*, 150 tex lineáris sűrűség, elemi szálak átmérője 13 μm) adagoltunk. Ennek megfelelően négyféle alapanyagot hozunk létre: töltetlen PLA, talkummal és CE-vel töltött PLA, talkummal, CE-vel, valamint cellulóz-szállal töltött PLA, végül pedig talkummal, CE-vel, valamint bazaltszállal töltött PLA. Az alapanyagokat feldolgozás előtt 85°C-on 6 óráig szárítottuk.

A CO_2 -vel történő fizikai habosításhoz egy egycsigás, 6 fűtőzónás, SCAMEX *Rheoscam* típusú extrudert használtunk (csigaátmérő: 20 mm, $L/D = 20$). A CO_2 -t ISCO 260D típusú szivattyú segítségével, a garattól 12D távolságra kialakított szelepen át állandó térfogatárammal (1,5–3 ml/min), szuperkritikus állapotban jutattuk az ömledékbe (1. ábra).



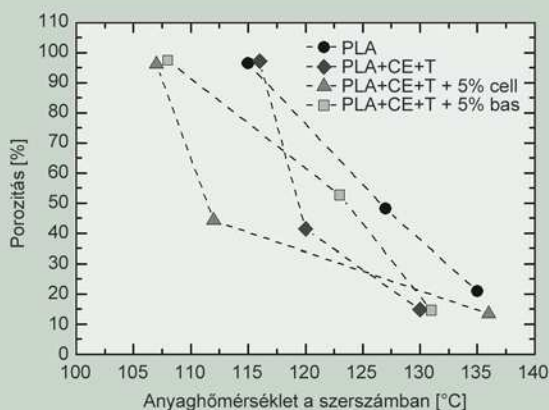
1. ábra. SCAMEX extruder a habosító egységgel

A habosítás során a csiga fordulatszáma minden esetben 30 /min volt, valamint az extruder első 4 zónájának hőmérsékletét állandó értékeken tartottuk: 160, 180, 180 és 160°C-on, amíg az utolsó (CO_2 injektálás utáni) zóna hőmérsékletét az ömledékszilárdság növelése érdekében 145°C és 105°C között változtattuk és egyben vizsgáltuk ennek a hatását a kialakult habszerkezetre. A szerszámhőmérséklet csökkentésével minden esetben nőtt a termékek porozitása; a négyféle anyag-típus összehasonlítását három porozitási „szinten”, 15, 50 és 95% körüli porozitásnál mutatjuk be. Ezután a kész rúd alakú habosított extrudátumokon megvizsgáltuk azok porozitását, a termikus tulajdonságokat DSC-vel (differenciális pásztázó kalorimetria), valamint a töretfelületeket pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM). Vizsgálatainkat nyomóvizsgálattal és egy nem szabványos hőalaktartási vizsgálattal zártuk.

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

Vizsgálataink első szakaszában elemeztük a létrejött habszerkezetek porozitását (2. ábra).

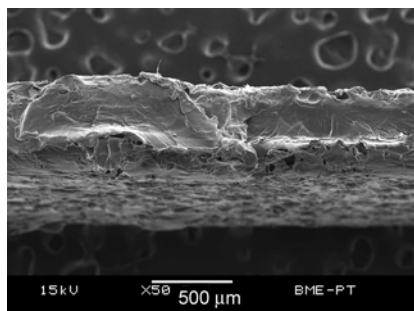
Sűrűségmérési eredményeink azt mutatták, hogy az sc- CO_2 -dal segített extrúziós eljárásban mind a négyféle vizsgált granulátumból lehetséges volt akár 95% feletti porozitású biohabokat előállítani, az alkalmazott adalékok azonban nagymértékben befolyásolták a habosodás folyamatát. A szálerő-



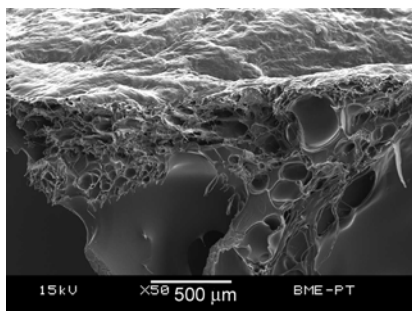
2. ábra. A különböző adalékanyag tartalmú PLA habok porozitása

sített habok esetében az erősítetlen anyagokhoz képest mintegy 10°C-kal kisebb szerszámhőmérséklet mellett sikerült nagy porozitású habokat gyártanunk. A PLA olvadáspontjához képest (~170°C) mintegy 60°-kal kisebb szerszámhőmérséklet miatt jóval kisebb termikus és hidrolitikus degradációval kell számolnunk a feldolgozás során, amely hőre érzékeny adalékok esetében kulcsfontosságú lehet. A porozitás értékek természetesen a PLA extrudátumok elektronmikroszkópi felvételein is jól megfigyelhetők (3–8. ábrák).

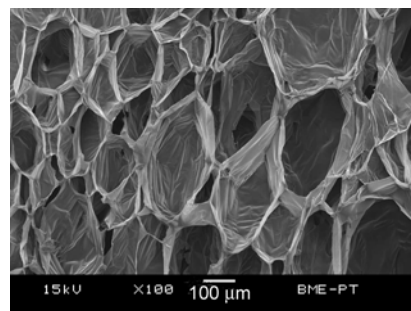
Mint az látható, csak a legnagyobb porozitású (>95%) minták esetében tapasztaltuk tényleges habszerkezet kialakulását. Az is megállapítható, hogy a talkummal és lánchossz-növelővel töltött PLA habok esetében (5. ábra) találtak a legkisebbnek a cellaméret eloszlást, amíg a többi minta esetében a cellaméret sokkal nagyobb szórást mutatott.



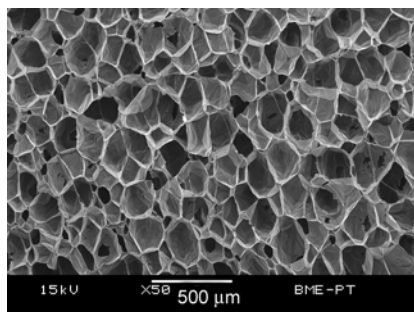
3. ábra. Töltetlen PLA extrudátum mikroszkópi képe (20,9% porozitás)



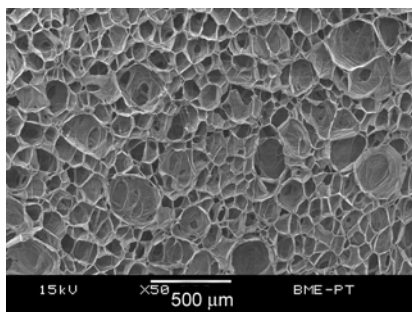
4. ábra. Töltetlen PLA extrudátum mikroszkópi képe (48,1% porozitás)



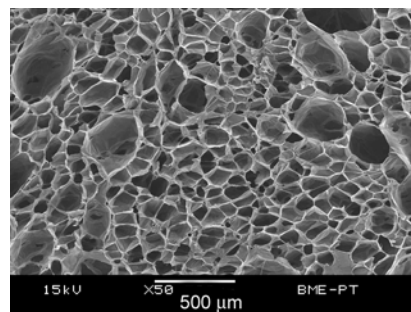
5. ábra. Töltetlen PLA extrudátum mikroszkópi képe (96,4% porozitás)



6. ábra. Talkummal és lánchossz-növelővel töltött PLA extrudátum mikroszkópi képe (97,1% porozitás)

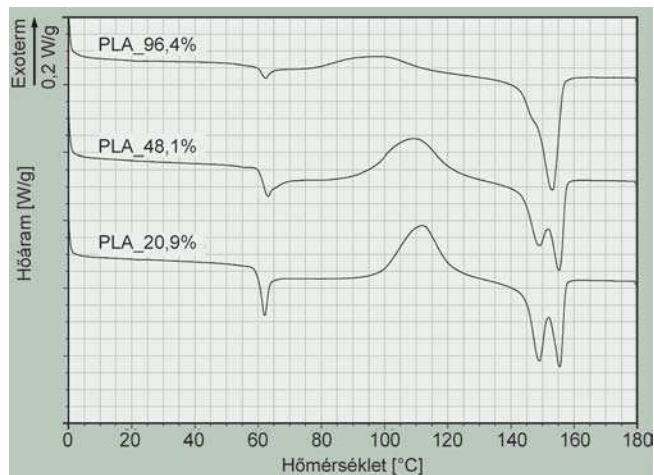


7. ábra. Talkummal, lánchossz-növelővel és cellulóz szállal töltött PLA extrudátum mikroszkópi képe (96,1% porozitás)



8. ábra. Talkummal, lánchossz-növelővel és bazaltszállal töltött PLA extrudátum mikroszkópi képe (97,4% porozitás)

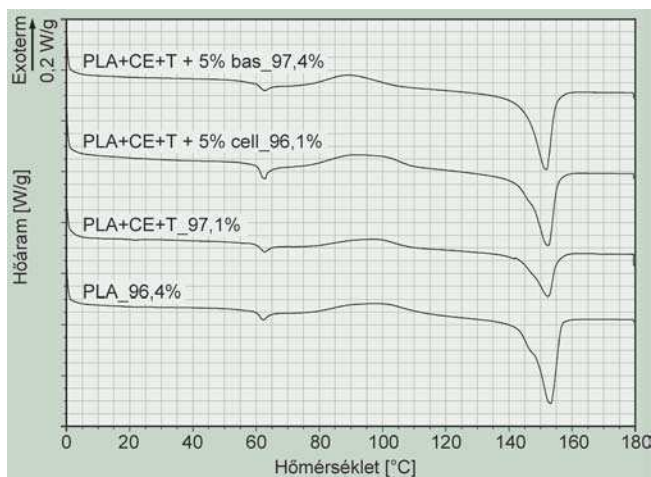
Az összes extrudátumot ezután pásztázó kalorimetriai vizsgálatoknak vetettük alá (9., 10. ábrák). Minden minta esetében az első felfűtési görbéből vontuk le a következtetéseket, mivel az első felfűtés során a minta többek között kristályosságbeli előtörténetére lehet következtetni.



9. ábra. A töltetlen PLA habok első felfűtési DSC görbéje különböző porozítások mellett

A 20,9%-os, valamint 48,1%-os porozitású minták felfűtési görbéje leginkább egy fröccsöntött, és ezáltal szinte teljesen amorf PLA DSC görbéjére hasonlít. Ennek megfelelően megtalálható 60°C körül az üvegesedési hőmérsékleti átmenet, valamint felette, 100–120°C-os hőmérsékleti tartományban a hideg-kristályosodásra jellemző exoterm csúcs, végül pedig ennek, a mérés során kialakult kristályos részarányának

a megömlése 150°C körül. Az ömledékállapot elérése során tipikusan két endoterm csúcs látható, ami a kisebb (α , 149°C-os olvadási csúcs) és nagyobb rendezettségű (β , 156°C-os olvadási csúcs) kristályos módosulat jelenlétére utal. Mivel mind jelentős hideg-kristályosodási exoterm és megömlési endoterm csúcsok megfigyelhetők, így ezeknek a mintáknak a kristályos részaránya nagy valószínűséggel csekély. Ettől eltérően a 96,4%-os porozitású, továbbra is töltetlen PLA minta esetében jelentősen kisebb hideg-kristályosodási csúcst mérünk, ami egyértelműen arra utal, hogy a minta önmagában jelentős kristályos részarányal rendelkezett a vizsgálat megkezdésekor. Emellett ennél a mintánál szinte csak a nagyobb rendezettségű β kristályos módosulat volt jelen, ami szintén a feldolgozás közben végbemenő kristályosodásra utal. A nagy porozitású, töltetlen PLA mintához teljesen hasonló módon alakult a többi, talkumot, lánchossz-növelőt és cellulóz vagy bazalt szál tartalmazó, nagy porozitású minták DSC görbéje (10. ábra).

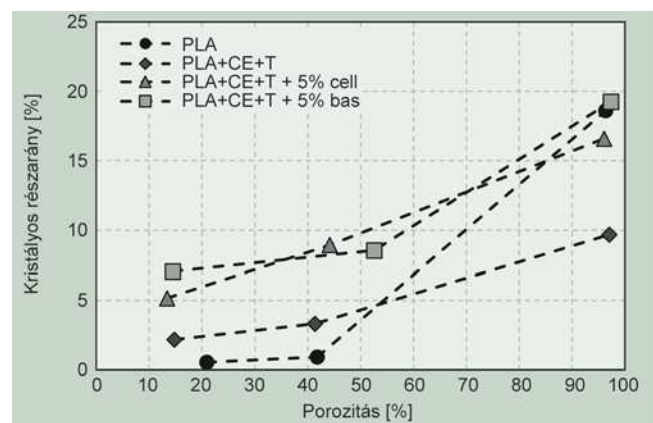


10. ábra. A legnagyobb porozitású, különböző adalékanyagokkal töltött PLA habok első felfűtési DSC görbéje

Ezt követően a DSC görbék alapján kiszámítottuk a feldolgozás során létrejövő kristályos részarányt (11. ábra).

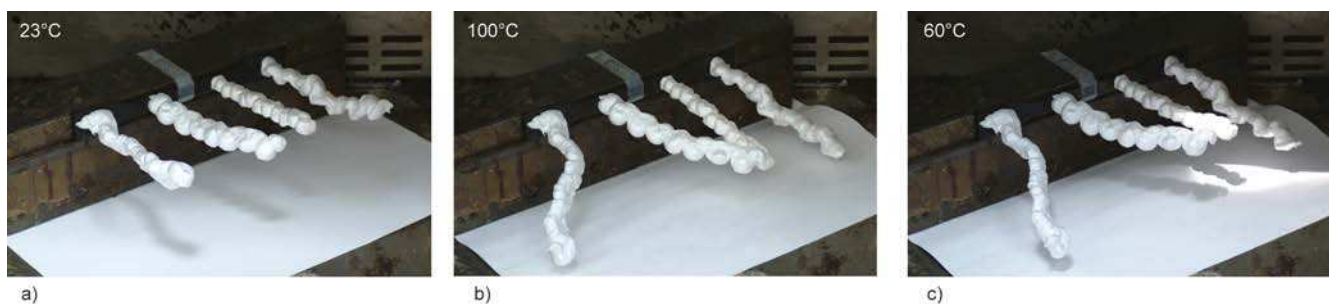
Mint az látható, a porozitás növelésével egyértelműen nőtt a minták kristályos részaránya, amit a superkritikus fluidum állapotban lévő CO₂ gócképző hatása okozza. Mivel a habosítási folyamat során a beinjektált CO₂ mennyisége állandó volt, így a nagyobb porozitás esetén tapasztalt nagyobb kris-

tályos részarányt a CO₂ jobb eloszlatottsága és ezáltal a PLA-hoz való jobb hozzáférhetősége okozta. Érdekes megjegyezni, hogy a legnagyobb porozitású minták közül a kizárólag talkumot és lánchossz-növelőt tartalmazó PLA mintának volt a legkisebb a kristályos részaránya, nagyjából 10%, amíg a többi minta esetében ez az érték 16–18% körül alakult. Ezt az okozhatja, hogy a talkumot és lánchossz-növelőt tartalmazó mintáknak a lánchossz-növelő miatt nagyobb volt a molekulatömege, mint a töltetlen PLA-nak, és ezáltal az előbbi lassabban kristályosodott. Továbbá a szóban forgó, talkumot és lánchossz-növelőt tartalmazó mintához nem adagoltunk további gócképzőket, mint például a cellulóz vagy bazalt szálak esetében, amely utóbbiak ennek megfelelően szintén gyorsabban kristályosodtak.



11. ábra. A különböző adalékanyagokkal töltött PLA habok kristályos részaránya a porozitás függvényében

A 11. ábrán azt is láthatjuk, hogy 5%-ban alkalmazva a cellulóz és a bazalt szál egyaránt gócképzőként hat, ezáltal hatékonyan növelik a PLA habok kristályos részarányát már kis porozitás értékek esetében is. A megnövekedett kristályosság a habok hőállósága szempontjából lehet igen előnyös, ezért további vizsgálatokat végeztünk a PLA habok HDT (hőalak tartási hőmérséklet) értékeinek megállapítására. Mivel a jelen vizsgálatban létrehozott minták nem egyforma alakja nem tette lehetővé szabványos HDT vizsgálatok elvégzését, helyette egy nem szabványos, és pusztán csak szemléltetésre alkalmas vizsgálatot hajtottunk végre, amely során egy oldalról befogott konzolos tartóba helyeztünk el a legnagyobb porozitású ha-



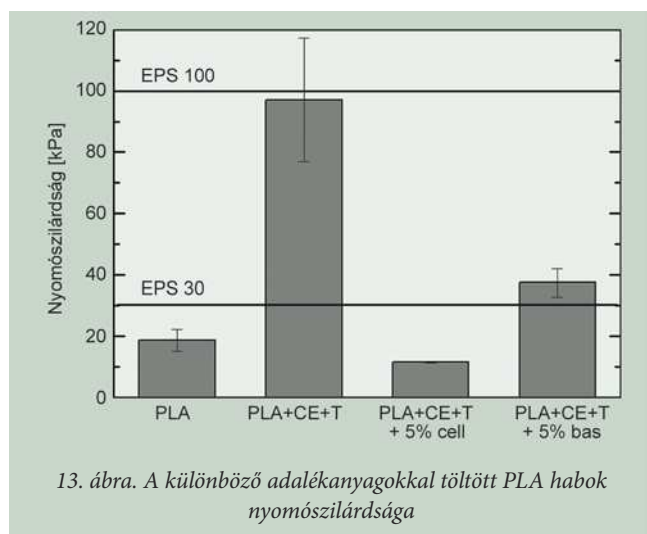
12. ábra. A különböző adalékanyagokkal töltött PLA habok a) 23°C-on, b) 60°C-on, c) 100°C-on történő hőntartása során létrejövő deformáció (minták balról jobbra mindhárom ábránál: PLA; PLA+CE+T; PLA+CE+T+5% cell; PLA+CE+T+5% bas)

bokból, majd azokat egy szárítószekrénybe helyezve szobahőmérsékleten, valamint 60, illetve 100°C-on egy óráig hűn tartottuk és megfigyeltük a hő hatására létrejövő deformációt (12. ábra).

Mint az látható, a habok szobahőmérsékletű, eredeti alakjához képest a 60°C eléréseivel azok elkezdtek deformálódni; legnagyobb mértékben a társítatlan PLA hab deformálódott el, amennyire ez szemmel megállapítható. A töltött PLA minták ezen a hőmérsékleten ugyanakkor még csak relatíve kis mértékben torzulnak el, amely valószínűsíthetőleg a feldolgozás során létrejött kristályos részarány és a töltőanyagok együttes jelenlétének köszönhető. 100°C eléréseivel végül az összes PLA hab minta eltorzult, ugyanakkor ennek az eredménynek az értékelésénél azt is figyelembe kell venni, hogy a habosított polisztirol, mint a kiváltani szánt alapanyag sem hőalaktartó 60–70°C felett. Továbbá, a PLA hab minták kristályos részaránya 15–20% körül alakult, amely bár jelentős, de még mindig csak körülbelül az elérhető maximális kristályos részarány fele, így még további fejlesztési lehetőségek állnak rendelkezésre a hőalaktartás javítása szempontjából. Korábbi tanulmányunkban már rámutattunk, hogy ha fröccsöntött PLA esetében sikerül elérni a maximális kristályos részarányt, akkor annak hőalaktartási hőmérséklete 100°C felett alakul [5].

Kísérleteink lezárásaképpen megvizsgáltuk a habosított polisztirol kiválthatóságát mechanikai tulajdonságok szempontjából is az általunk létrehozott kísérleti, PLA alapú habokkal. A 2003-ban hatályba lépett MSZ EN 13163:2001 szabvány, a hőszigetelő expandált polisztirol termékek csoportosítását nyomófeszültség kategóriák szerint határozta meg. Ennek megfelelően a hazai műszaki gyakorlatban az egyes EPS keményhab lemezek 10%-os összenyomódásához tartozó nyomófeszültség kPa-os értékével jelölik az egyes anyag típusokat. pl.: EPS30, EPS100 stb. Ezeket a feszültségeket kell figyelembe venni rövid ideig ható terhelések esetén, ezért az előállított PLA habok mechanikai tulajdonságainak jellemzéséhez meghatároztuk azok 10% deformációhoz tartozó nyomószilárdság értékeit (13. ábra).

A mechanikai vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a



SEM képeken megfigyelt egységesebb habszerkezet több mint 5-ször nagyobb nyomószilárdsággal jellemezhető, mint az adalékmentes referencia PLA hab. A 10% deformációhoz tartozó nyomóerők alapján a bazalt erősítésű PLA hab nyomószilárdsága összevethető az EPS30 típusú habokéval, amíg a kizárólag láncnövelővel és göcképzővel adalékolt PLA hab nyomószilárdsága megegyezik az EPS100 típusú PS habokéval, vagyis mechanikai tulajdonságaik alapján a PLA alapú habok valóban méltó versenytársai lehetnek a biológiai úton nem lebontható EPS-nek.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során elemeztük a politejsav (PLA), mint megújuló erőforrásból előállított és egyben biológiai úton lebontható biopolimer szuperkritikus szén-dioxiddal történő extrúziós fizikai habosítási folyamatát, valamint megvizsgáltuk az így létrehozott biohabok porozitását és morfológiai, mechanikai, termikus tulajdonságait, egyúttal pedig a habok alkalmazhatóságát. A töltetlen PLA mellett 2 m% talkummal, és 2 m% lánc hossz-növelővel, valamint vagy 5 m% cellulóz szállal vagy 5 m% bazaltszállal töltött PLA habokat is létrehoztunk és vizsgáltunk. Megállapítottuk, hogy az ömledékhőmérséklet megfelelő beállításával mindegyik PLA alapú kompaund kiválóan alkalmas volt legalább 95%-os porozitású hab létrehozására, amelyet a porozitás méréseken túl pásztázó elektronmikroszkópi felvételekkel is igazoltunk.

Differenciális pásztázó kalorimetria segítségével rámutattunk, hogy a porozitás növekedésével a PLA alapú habok kristályos részaránya is jelentős mértékben növekszik, ami a széndioxid, mint fizikai habosítószer PLA-ra gyakorolt göcképző hatásának tulajdonítható. Ennek a jelentős kristályos részarány (15–20%), valamint a töltőanyagok jelenlétének a hatására a PLA alapú habok emelt hőmérsékleten (60°C) elfogadható mértékben megtartották alakjukat, amit egy nem szabványos, pusztán csak szemléltetésre alkalmas hőalaktartási vizsgálattal igazoltunk. A kristályos részarány további növelésével egyúttal várhatóan még tovább lehet növelni a PLA habok hőalaktartását.

Továbbá a PLA alapú habok nyomóvizsgálati eredményei alapján igazoltuk, hogy azok kiválóan alkalmasak a széles körben alkalmazott expandált (habosított) polisztirol (EPS) kiváltására, mivel a kísérleti PLA habok nyomószilárdsága közel azonos volt a különböző EPS habokéval.

Végül pedig a mérési eredmények alapján megállapítottuk, hogy összességében a PLA egy ígéretes alapanyag környezetbarát, biológiailag lebontható habszerkezetek előállítására. A jövőben az extrúziós habosítási eljárást csőszerszám alkalmazásával tervezzük megvalósítani annak érdekében, hogy lemezszerű porózus termékeket is gyárthassunk, amelyek segítségével többek között a hőalaktartás is egzakt módon meghatározható.

A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. A szerzők köszönetüket fejezik ki az Országos Tudomá-

nyos Kutatási Alap (OTKA K105257 és K112644) anyagi támogatásáért. A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia Magyarország-Mexikó és Magyarország-Olaszország kétoldalú mobilitás pályázatának keretein belül készült. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Czvikovszky, T.: Lehet-e „zöld” a műanyag?, Műanyag és Gumi, 43, 24–31 (2006).
- [2] Lim, L. T.; Auras, R.; Rubino, M.: Processing technologies for poly(lactic acid), Progress in Polymer Science, 33, 820–852 (2008).
- [3] Bocz, K.; Domonkos, M.; Igricz, T.; Kmetty, Á.; Bárány, T.; Marosi, Gy.: Flame retarded self-reinforced poly(lactic acid) composites of outstanding impact resistance, Composites: Part A, 70, 27–34 (2015).
- [4] Kulinski, Z.; Piorkowska, E.: Crystallization, structure and properties of plasticized poly(L-lactide), Polymer, 46, 10290–10300 (2005).
- [5] Tábi, T.; Suplicz, A.; Czigány, T.; Kovács, J. G.: Thermal and mechanical analysis of injection moulded poly(lactic acid) filled with poly(ethylene glycol) and talc, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 118, 1419–1430 (2014).
- [6] Oroszlány, Á.; Kovács, J. G.: Gate type influence on thermal characteristics of injection molded biodegradable interference screws for ACL reconstruction, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 766–769 (2010).
- [7] Tábi, T.; Tamas, P.; Kovács, J. G.: Chopped basalt fibres: A new perspective in reinforcing poly(lactic acid) to produce injection moulded engineering composites from renewable and natural resources, Express Polymer Letters, 7, 107–119 (2013).
- [8] Tábi, T.; Égerházi, A. Z.; Tamás, P.; Czigány, T.; Kovács, J. G.: Investigation of injection moulded poly(lactic acid) reinforced with long basalt fibres, Composites Part: A, 64, 99–106 (2014).
- [9] Bocz, K.; Szolnoki, B.; Marosi, A.; Tábi, T.; Wladyka-Przybylak, M.; Marosi, Gy.: Flax fibre reinforced PLA/TPS biocomposites flame retarded with multifunctional additive system, Polymer Degradation and Stability, 106, 63–73 (2014).
- [10] Bodros, E.; Pillin, I.; Montrelay, N.; Baley, C.: Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?, Composites Science and Technology, 67, 462–470 (2007).
- [11] Nofar, M.; Park, C. B.: Poly(lactic acid) foaming, Progress in Polymer Science, 39, 1721–1741 (2014).
- [12] Sauceau, M.; Fages, J.; Common, A.; Nikitine, C.; Rodier E.: New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide, Progress in Polymer Science, 36, 749–766 (2011).
- [13] Pilla, S.; Kim, S. G.; Auer, G. K.; Gong, S.; Park, C. B.: Microcellular extrusion-foaming of polylactide with chain-extender, Polymer Engineering and Science, 49, 1653–1660 (2009).
- [14] Frone, A. N.; Berlioz, S.; Chailan, J.-F.; Panaitescu, D. M.: Morphology and thermal properties of PLA–cellulose nanofibers composites, Carbohydrate Polymers, 91, 377–384 (2013).