

3D nyomtatott biokompozit vázszerkezetű fröccsöntött termékek vizsgálata  
Tábi T., Csézi G., Kovács N. K.

Accepted for publication in Polimerek

Published in 2020

DOI:

# 3D NYOMTATOTT BIOKOMPOZIT VÁZSZERKEZETŰ FRÖCCSÖNTÖTT TERMÉKEK VIZSGÁLATA

## INVESTIGATION OF INJECTION MOLDED PRODUCTS WITH 3D PRINTED BIOCOMPOSITE FRAME

TÁBI TAMÁS<sup>1,2</sup>  
CSÉZI GERGELY<sup>1</sup>  
KOVÁCS NORBERT KRISZTIÁN<sup>1</sup>

Kísérleti munkánk során biopolimer (politejsav – PLA) alapanyagokból ömledék rétegzéses 3D nyomtatási módszerrel olyan szálerősített biokompozit vázszerkezeteket hoztunk létre, amelyek a fröccsöntő gép szerszámüregébe helyezve ráfröccsöntéssel impregnálhatók. Az így létrehozott, fröccsöntött kompozit termékek esetében jól tervezhetővé válik a szálirány, a száltartalom, valamint a szálhossz, ezáltal pedig a késztermék irányfüggő mechanikai tulajdonságai.

In our experimental work, we created a fiber-reinforced biocomposite frame structure from biopolymer (Poly(Lactic acid) – PLA) raw materials by 3D printing, which can be impregnated by injection molding after placing it in the mold cavity. By making products with this technology, the fiber direction, the fiber content and the fiber length and thus the direction-dependent mechanical properties of the finished product can be designed with greater freedom.

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a hagyományos, kőolaj alapú műanyagok alternatívájaként egyes termékcsoportok esetében megjelentek a megújuló erőforrásból előállítható és egyben biológiai úton lebontható polimerek, vagy más néven biopolimerek [1, 2]. E két kiemelkedő tulajdonságuk miatt a biopolimerekből készült termékek életciklusa teljes egészben beilleszthető a természet körforgásába, és ezáltal pedig a környezettudatos gondolkodás, valamint a körkörös (bio)gazdaság eszmeiségébe [3].

Árát, tulajdonságait és elérhetőségét tekintve a jelenleg legígéretesebb biopolimer a politejsav, angol rövidítése alapján PLA (Poly(Lactic Acid)) [4]. A PLA egy hőre lágyuló, részben kristályos, alifás poliészter. A megújuló erőforrásból való előállítás a PLA esetében keményítő (poliszacharid) vagy pedig cukor (diszacharid), azaz lényegében glükóz alapján lehet megoldani tejsavas erjesztéssel, valamint a képződött tejsav polikondenzációjával (vagy a tejsav dimerjének, a laktidnak a gyűrűfelnyitási polimerizációjával) [5]. A biológiai úton való bonthatóság

pedig abban rejlik, hogy a PLA könnyen hidrolizálható, így ipari komposztban magas hőmérséklet ( $T > T_g \sim 55-60$  °C) és nedvesség-tartalom hatására a molekulatömege csökken. Végül pedig a bontó baktériumok az oligomer tejsavat fel tudják dolgozni, és víz,  $CO_2$ , valamint humusz fog képződni, mint minden szerves anyag bomlásakor [6].

A PLA egy nagy moduluszal ( $\sim 3$  GPa), nagy szilárdsággal ( $\sim 60-65$  MPa) rendelkező biopolimer, ugyanakkor relatíve rideg, ami a 3-5%-os szakadási nyúlásban mutatkozik meg, valamint a hőállóságát, kis kristályos részaránya miatt, az 55-60 °C-os üvegesedési átmeneti hőmérséklete ( $T_g$ ) határozza meg. A hőállósága ugyanakkor kristályos szerkezet kialakításával jelentősen megnövelhető [7, 8]. Mindezek alapján a PLA nem csak egyszerű, igénybevételt nem elszenvedő termékek esetében található alkalmazásra, hanem szálerősítéssel akár műszaki termékeket is helyettesíthet [9].

A PLA a hagyományos műanyagokhoz hasonlóan feldolgozható fröccsöntéssel, extrúzióval, vákuumformázással, palack- és fóliafúvással, vagy additív gyártástechnológiával, amit a köznyelv egyszerűen „3D nyomtatás” néven említ [10]. 3D nyomtatással ugyanakkor egyrészt nem csak PLA, hanem további biopolimerek is feldolgozhatók, mint a polikaprolakton (PCL) akár orvostech-nikai (felszívódó implantátum) célokra [11]. Sőt, a 3D nyomtatás technikája lehetővé teszi a kész termékek esetében az utólagos „rányomtatást” is [12]. A fröccsöntési technológiát tekintve előszeretettel alkalmaznak szálerősített PLA biokompozitokat is, mivel egyrészt a PLA mechanikai tulajdonságait szálerősítéssel tovább lehet növelni, másrészt pedig természetes, növényi eredetű szálakat alkalmazva teljes mértékben megtartható a megnövelt mechanikai tulajdonságú késztermék környezetbarát jellege [13]. A fröccsöntött kompozitokban ugyanakkor több hátrány is a szálerősítés használatából fakad, amelyek az alábbiak [14]:

- korlátozott száltartalom (a szálak növelik a viszkozitást, így csökken a feldolgozhatóság),
- korlátozott szálhossz (a feldolgozás során a nagymértékű nyírás miatt tördelődnek a szálak, és ha a kritikus szálhossz alá csökken a hosszmeretük, akkor erősítő hatásuk megszűnik),
- korlátozottan tervezhető orientáció (a szálak orientációját leginkább a folyási úthossz iránya befolyásolja, és a teljes keresztmetszet mentén csak egy kitüntetett, nagy nyírású zónában fognak a szálak a kitöltés irányával párhuzamosan állni).

Mindezek alapján felmerül a megoldandó probléma, hogy

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

<sup>2</sup> MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

fröccsöntött műszaki termékekben hogyan lehetne még inkább kihasználni a szálerősítés hatását, azaz a hatékonyságot növelni. Erre megoldást jelenthet az az ötletünk, hogy ömledékretegezéses 3D nyomtatással, mint additív gyártástechnológiával egy szálerősített PLA-ból álló vázszerkezetet hozunk létre, amelyet fröccsöntött termékek esetében betétként lehet alkalmazni.

A 3D nyomtatás során egy fűtött, kis átmérőjű fúvókán halad át az 1,75 mm átmérőjű szál előgyártmány, és a fúvóka (vagy tárgyasztal) mozgása, valamint a folyamatosan előtolt és megömlesztett szál alakítja ki rétegről rétegre a terméket [15-18]. Szálerősítést tartalmazó szál előgyártmány esetében a 3D nyomtatásnak megvan az az előnye, hogy tervezhető vázszerkezetben a szálirány, a száltartalom, valamint, hogy akár folytonos szálhossz is alkalmazható [19, 20]. Egy ilyen vázszerkezetű betét 3D nyomtatását követően az behelyezhető a fröccsöntő gép szerszámába, ahol megtörténik az ömledék ráfröccsöntése, a vázszerkezet impregnálása, és ideális esetben jó adhézió alakul ki a frissen bejutott és megszilárdult ömledék, valamint a célzottan kialakított belső erősítőstruktúra között. Ezzel a módszerrel csökkenthető a szálal fröccsöntés közben elkerülhetetlen szálrövidülés mértéke, valamint egy tervezhető, irányítható belső erősítő szerkezet jön létre. Hátrányként említhető, hogy a vázszerkezet nyomtatása, valamint annak elhelyezése a fröccsöntő szerszámába mindenképpen növeli a gyártási időt, ugyanakkor ez az újfajta gyártási módszer a várhatóan javuló terméktulajdonságok miatt akár szükség-szerű is lehet, és egyben remélhetőleg kompenzálja a hosszabb gyártási időt. Végül pedig tekintve, hogy ebben a témában korábban szakirodalmi hivatkozást nem találtunk, cikkünkben a kezdeti kísérleteinket, eredményeinket mutatjuk be.

## 2. ALAPANYAGOK, MÉRÉSI MÓDSZEREK

Kísérleteinkhez, a vázszerkezet nyomtatására a Philament cég PLA GLASS 040 termékóddal ellátott, 5 m% névleges üvegszál erősítést tartalmazó, PLA alapú nyomtató szálát (filamentjét), míg a nyomtatott vázanyag ráfröccsöntésére (átimpregnálására) a Natureworks (USA) 3100HP típusú, 0,5% D-Laktid tartalmú PLA anyagát használtuk.

A vázszerkezetek 3D nyomtatását egy CraftBot Plus berendezéssel végeztük el 215 °C-os nyomtatófej és 60 °C-os tárgyasztal hőmérséklet mellett. A kész vázszerkezeteket ezután egy Arburg Allrounder 420 C 1000-290 típusú fröccsöntő géppel úgynevezett ráfröccsöntéssel impregnáltuk. Ezt úgy hajtottuk végre,

hogy a vázszerkezeteket a fröccsöntő gép 80x80 mm alapterületű, 4,5 mm magas szerszámfészkebe helyeztük, majd pedig oldalról, egy filmgáton keresztül érkező ömledék segítségével impregnáltuk át a vázszerkezetet. A fröccsöntés során 210 °C ömledékhőmérsékletet és 40 °C szerszámhőmérsékletet alkalmaztunk. Végül az elkészített próbatesteken szálhossz-eloszlás, szakító, hajlító, Charpy-féle ütvehajlító és zsugorodás (méret-tartás) méréseket végeztünk. A szakító, hajlító, valamint Charpy méréseket a fröccsöntés irányával párhuzamosan és arra merőlegesen kivágott próbatestek segítségével hajtottuk végre.

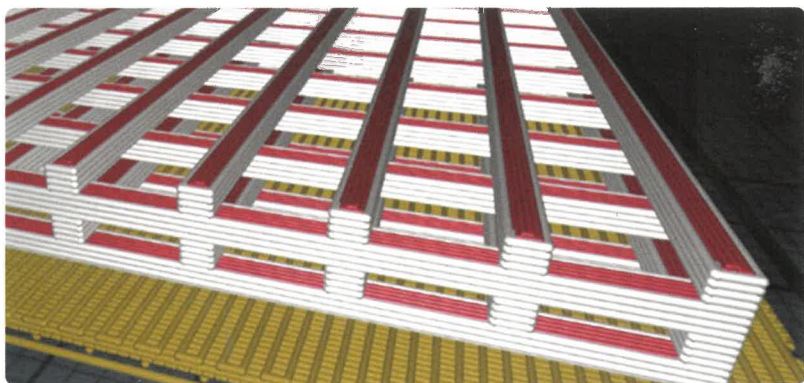
## 3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

Kísérleteinket a fröccsöntéshez megfelelő, 3D nyomtatott vázszerkezet geometriájának megtervezésével kezdtük. A vázszerkezetet úgy kívántuk kialakítani, hogy legyen olyan minta, amelyben csak folyásirányban, illetve olyan is, amelyben folyásirányban és rá merőleges irányban állnak a szálak. Az így megtervezett vázszerkezetek befoglaló méretei 80x80x4 mm, míg a bordák szélessége 1,2 mm, amely a szerszámüreg geometriája miatt adott volt. Annak érdekében, hogy az ömledék körüláramolja a kitöltés során a két irányban álló bordák alkotta vázat, olyan rácsos szerkezetet hoztunk létre, amely szintenként egy irányban álló bordákat tartalmaz, és a következő réteg 90°-kal elforgatva következik (összesen 4 db). Így az ömledék kis áramlási veszteséggel áramolhat a meglövés vonalától a szerszám túlsó végéig (1. ábra).

Emellett készítettünk egy irányban (folyásirányban) álló bordák alkotta vázat, ahol a bordák helyzetének megőrzésére a befröccsöntéssel (kitöltéssel) ellentétes oldalon egy ugyanakkora méretű bordát terveztünk, a gát oldalára pedig egy 0,4 mm magas bordát, hogy az ömledék útját ne akadályozza. A vázszerkezetek megtervezését és nyomtatását követően azokat behelyeztük a fröccsöntő gép szerszámüregébe és ráfröccsöntéssel impregnáltuk (2. ábra).

Végül mind a két vázat módosítottuk, mert az ömledék áramlás a bordákat eldeformálta, vagy magával sodorta (3. ábra).

A bordák a módosítást követően mindkét esetben (egy, illetve két irányú erősítés) 4 mm magasak és 1,2 mm szélesek voltak, a rögzítésüket úgy oldottuk meg, hogy egy 0,4 mm vastag síklap alára nyomtattuk rá. A bordák számát pedig úgy választottuk meg, hogy a váz a 80x80x4 mm-es szerszámüreg térfogatát 25, 50 és 75%-ban töltsse ki. Így hat különböző vázgeometriával végeztük a további kísérleteket (4. ábra).



1. ábra: A vázszerkezet nyomtatási előképe



2. ábra: A fröccsöntő szerszám a behelyezett vázszerkezettel

Mindkét erősített vázszerkezet kitöltésének biztosítására a szerszámüreg magasságát 4,5 mm-re állítottuk, így az ömledékáram kisebb áramlási veszteséggel tudta kitölteni a rendelkezésre álló teret. A különböző vázszerkezetű próbatesteket a következőkben az 1. táblázatban ismertetett módon jelöljük.

A fröccsöntött próbatestek száltartalmának, illetve annak eloszlásának vizsgálatához a próbatesteket 9 részre osztottuk, majd kerámia téglékben, izzítókemencében 600 °C-on 4 órán át égettük ki, ezután összevetettük a kezdeti és a kiégetés után maradó tömeget. Ezt a mérést csak 25% térkitöltésű vázszerkezet esetében vizsgáltuk. Az így mért száltartalom 1,12% volt, szórása 0,1%. Ezután a téglében maradt szálakat egyenletesen eloszlattuk, majd a mikroszkóppal készített felvételeket elemeztük, amelyből megállapítottuk a szálak hosszát. Az átlagos szálhossz 393,81 µm volt 175,72 µm-es szórással, a leghosszabb szál pedig 1328 µm hosszú volt, ami a tipikus fröccsöntési tartománynak felel meg.

A kísérleteket a hajlítóvizsgálattal folytattuk. A hajlító rugalmassági modulusz az egy irányban erősített próbatesteknél az erősítés irányában és arra merőlegesen is mindhárom térkitöltésnél a nyomtatott vázszerkezet nélküli próbatestekhez képest. A hajlítószilárdságot tekintve azonban mindegyik kompozit próbatesté kissé csökkent a referenciához képest, erősítés irányában 5-7 MPa-lal, merőleges irányban pedig nagyobb mértékben (5. ábra).

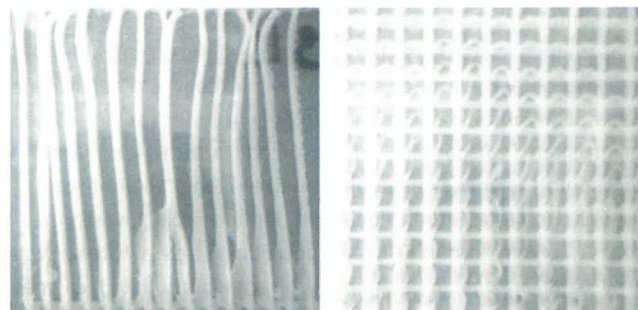
A mindkét irányban erősített próbatesteknél, az 50%-os térkitöltésű mintát kivéve (V.), minden próbatest hajlító rugalmassági modulusza csökkent, az egy irányban erősítettekéhez képest nagyobb mértékben. Hajlító szilárdságukat tekintve mindegyik mintáé csökkent a referenciához képest, de az 50%-os kitöltésű a legkevésbé (6. ábra).

A hajlító vizsgálat eredményeit részletesebben a 2. táblázat tartalmazza.

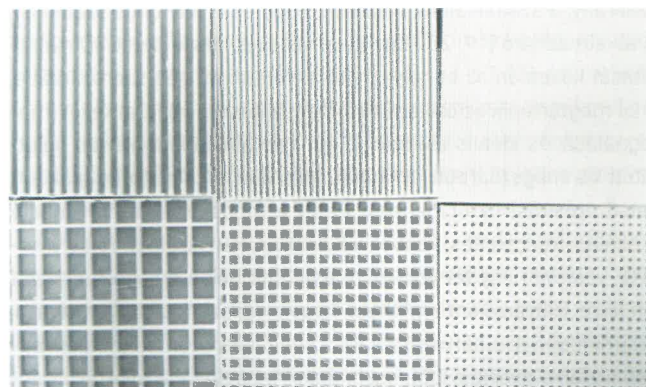
A szakítóvizsgálattal folytatva a kiértékelést megállapítottuk, hogy 25%-os kitöltöttség mellett jelentősen, 25%-kal nőtt a szakítószilárdság, és több mint 25%-kal a szakadási nyúlás a vázszerkezet nélküli próbatestekhez képest. A többi esetben a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás értékei elmaradnak a referenciához képest, egy irányban erősített esetben kevésbé (7. ábra), a két irányú erősítés esetén nagyobb mértékben (8. ábra).

A szakítóvizsgálat eredményeit részletesebben a 3. táblázat tartalmazza.

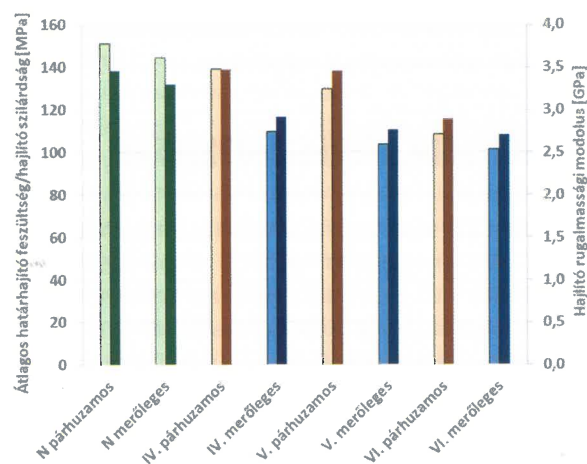
További összehasonlítás érdekében Charpy-féle ütvehajlító vizsgálattal elemeztük a próbatestek tulajdonságait. A mérés során mindegyik vázszerkezettel rendelkező próbatest eltört, a töretfelületük kagylós volt, továbbá a vizsgálat során nem történt látható maradó alakváltozás, ami arra utal, hogy a próbatestek továbbra is ridegen viselkedtek, ugyanúgy, mint a PLA mátrixanyag. Az erősítés nélküli próbatesteken sem látható maradó alakváltozás, ugyanakkor



3. ábra: Fröccsöntött próbatestek az eldeformálódott vázszerkezettel



4. ábra: Fröccsöntött próbatestek hat végleges vázszerkezete



5. ábra: Átlagos határhajlító feszültség/hajlító szilárdság és a hajlító rugalmassági modulusz a referencia darabokon és az egy irányban erősített típusok esetében

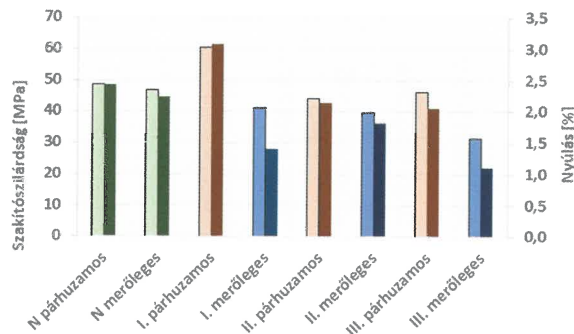
1. táblázat: Próbatestek fröccsöntési paramétere

Megnevezés	Jelölés	Bordák elhelyezése	Kitöltési arány [%]
Natúr	N	-	0
Egy irányban erősített I.	I.	Csak párhuzamosan a fröccsöntés irányára	25
Egy irányban erősített II.	II.	Csak párhuzamosan a fröccsöntés irányára	50
Egy irányban erősített III.	III.	Csak párhuzamosan a fröccsöntés irányára	75
Két irányban erősített I.	IV.	Párhuzamosan és merőlegesen	25
Két irányban erősített II.	V.	Párhuzamosan és merőlegesen	50
Két irányban erősített III.	VI.	Párhuzamosan és merőlegesen	75

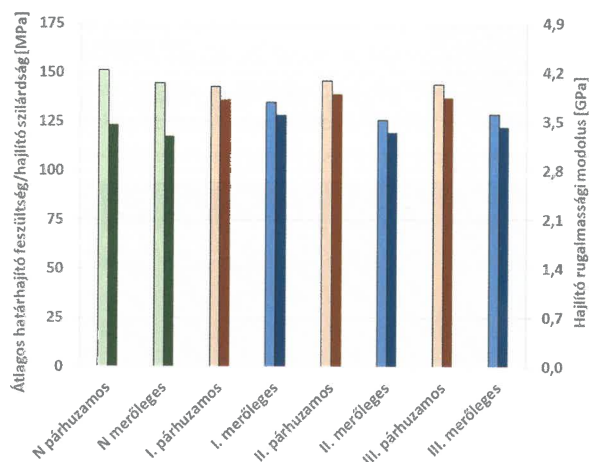
a repedés terjedése ebben az esetben egyenes volt. Ez alapján feltételezhető, hogy a vázszerkezettel rendelkező próbatestek ütmunkája nagyobb, amelyet az eredmények igazoltak, ugyanakkor szignifikáns különbség egy irányú erősítés esetén csak az 50 és 75% kitöltöttségű, párhuzamos elrendezésben vizsgált próbatestek esetén volt megfigyelhető (9. ábra), de csökkenés egyik esetben sem volt tapasztalható.

Kétirányú erősítés esetén az ütmunka értékek 50 és 75% térkitöltés esetén mindkét irány esetében nőttek, ugyanakkor 25%-os kitöltöttségnél csak párhuzamos irányban figyelhető meg növekedés (10. ábra).

A bordák számának növelésével az egy és két irányban erősített esetek között alapvető különbség, hogy a folyásirányú, illetve arra merőleges irányban mért értékek között csökken a különbség a két irányú erősítés esetén. Az ütőszilárdság értéke is növekszik, amelynek lehetséges magyarázata, hogy ha növeljük a bordák számát, akkor növeljük a határfelületek nagyságát, így nem tud egyenes vonalban áthaladni a repedés a próbatestenen. Kétirányú erősítés esetén mindkét irányban azonos számú bordát helyezünk el, ezáltal azonos lesz a határfelületek száma (csak kevesebb), ezért ebben az esetben ugyan csökken az ütőszilárdság értéke, de a két irány között minimalizálható a különbség. Ennek

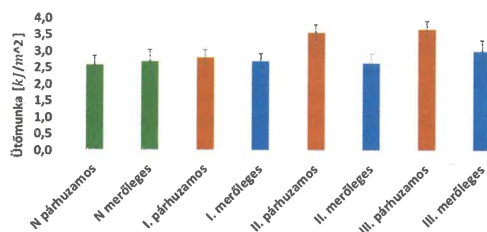


7. ábra: Szakítószilárdság és szakadási nyúlás értékei a referencia darabokon és az egy irányú erősítéssel rendelkező darabokon

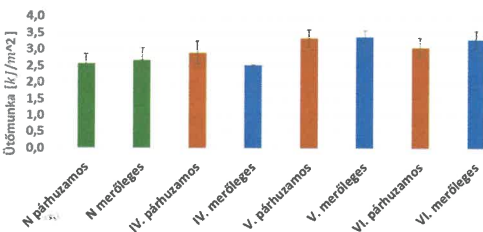
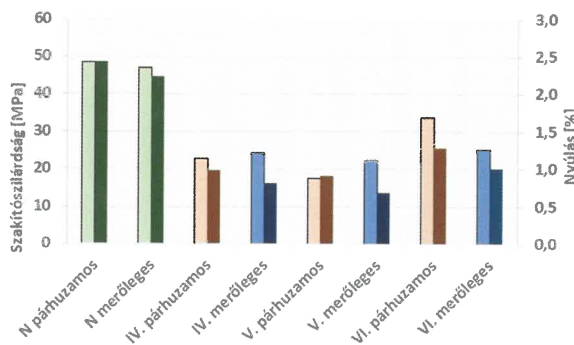


6. ábra: Átlagos határhajító feszültség/hajlító szilárdság és a hajlító rugalmassági modulusz a referencia darabokon a két irányban erősített típusok esetében

9. ábra: Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat eredményei az egy irányban erősített próbatestek esetében



8. ábra: Szakítószilárdság és szakadási nyúlás értékei a referencia darabokon és a két irányú erősítéssel rendelkező darabokon



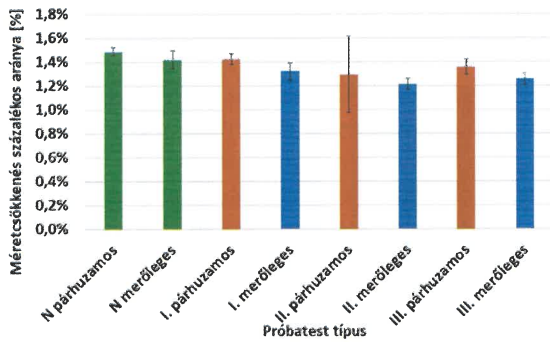
10. ábra: Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat eredményei a két irányban erősített próbatestek esetében

2. táblázat: Próbatetek hajlító mechanikai tulajdonságai

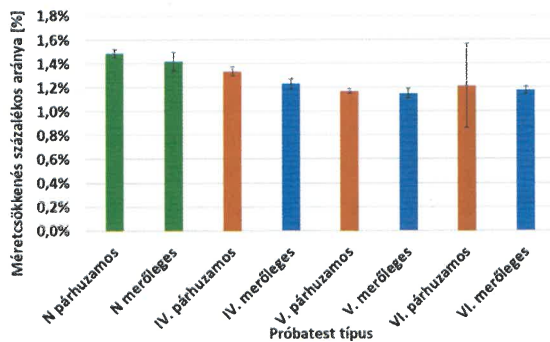
Típus	Darabszám	Eltört	Átlagos határhajlító feszültség [MPa]	Átlagos hajlító szilárdság [MPa]	$\sigma$ átlagos [MPa]	Hajlító rugalmassági modulusz [MPa]
N párhuzamos	6	1	151,51	150,22	151,29	3,46
N merőleges	6	2	148,83	136,11	144,59	3,30
I. párhuzamos	6	0	143,00	-	143,00	3,81
I. merőleges	6	6	-	134,85	134,85	3,60
II. párhuzamos	6	0	145,85	-	145,85	3,89
II. merőleges	4	4	-	125,77	125,77	3,35
III. párhuzamos	6	0	144,04	-	144,04	3,84
III. merőleges	6	5	128,30	131,08	128,76	3,43
IV. párhuzamos	6	4	136,26	144,58	139,15	3,18
IV. merőleges	6	6	109,92	-	109,92	2,92
V. párhuzamos	3	2	128,91	131,78	129,87	3,46
V. merőleges	6	6	103,83	-	103,83	2,77
VI. párhuzamos	6	6	108,44	-	108,44	2,89
VI. merőleges	6	6	101,60	-	101,60	2,71

3. táblázat: Próbatetek szakító mechanikai tulajdonságai

Típus	Húzószilárdság [MPa]	Húzószilárdsági nyúlás [%]	Szakítószilárdság [MPa]	Szakadáskor mért nyúlás [%]
N párhuzamos	54,84	1,59	48,58	2,43
N merőleges	53,91	2,09	47,06	2,24
I. párhuzamos	66,30	2,10	60,60	3,08
I. merőleges	43,27	1,23	41,20	1,41
II. párhuzamos	49,11	1,53	44,41	2,15
II. merőleges	43,82	1,33	39,76	1,82
III. párhuzamos	51,58	1,58	46,21	2,06
III. merőleges	32,06	1,08	31,45	1,10
IV. párhuzamos	25,00	0,83	22,73	0,99
IV. merőleges	24,54	0,78	24,23	0,81
V. párhuzamos	19,37	0,67	17,51	0,91
V. merőleges	22,25	0,68	22,18	0,69
VI. párhuzamos	34,76	1,21	33,76	1,28
VI. merőleges	26,90	0,93	25,33	1,01



11. ábra: Méretcsökkenés az egy irányban erősített próbatestek esetén



12. ábra: Méretcsökkenés a két irányban erősített próbatestek esetén

eredményeképpen sikerült kimutatni, hogy nagy szerepe van a belső vázszerkezetnek abban, hogy a ráfröccsöntéssel elkészített termék tulajdonságai tervezhetővé váljanak.

A zsugorodásméréssel befejezve a vizsgálatokat, a 11-12. ábrán látható a fröccsöntés irányában és az arra merőleges irányban mért méretcsökkenés 70 óra után, százalékban kifejezve.

Az ábrákból látható, hogy a fröccsöntés irányában mért zsugorodások egy irányú erősítés esetén csak a 75% térkitöltésű vázszerkezet esetén csökkentek, míg két irányú erősítés esetén mindhárom térkitöltésnél észrevehetően kisebb mértékű a méretcsökkenés (11. ábra). Ezzel szemben a fröccsöntésre merőleges irányokban mind a hat különböző vázszerkezetű próbatest esetében csökkent a zsugorodás mértéke (12. ábra).

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kísérleti munkánk során biopolimer alapanyagokból 3D nyomtatással (ömlédékrategezés) egy olyan szálerősített biokompozit vázszerkezetet hoztunk létre, amelynél igazoltuk, hogy megvalósítható annak impregnálása a vázszerkezet fröccsöntő gép szerszámüregébe való behelyezésével és ráfröccsöntésével. Ennek eredményeképpen rámutattunk, hogy lehetséges létrehozni olyan fröccsöntött termékeket, amelyben a 3D nyomtatással előzetesen elkészített, szálerősített vázszerkezettel jól tervezhetővé válik a szálerősítés, a száltartalom, valamint a szálhossz, ezáltal pedig a késztermék irányfüggő mechanikai tulajdonságai. Első lépésként különböző térkitöltésű (25-50-75%) vázszerkezeteket hoztunk létre, amelyek segítségével kimutattuk, hogy azok geometriája jelentősen befolyásolja a vázszerkezet impregnálhatóságát és fröccsöntés közbeni deformációját. A mechanikai vizsgálatok eredményeképpen egyelőre csak kisebb mértékű növekedést sikerült elérni a homogén fröccsöntött próbatestekhez képest, ugyanakkor a jövőben

kutatásunkat a vázszerkezet száltartalmának és szálhosszának növelésével kívánjuk folytatni, amittől jelentősebb javulást várunk a mechanikai tulajdonságokban.



### AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást az „Értéknövelt, multifunkcionális biopolimer csomagolási rendszer kifejlesztése és gyártástechnológiájának megtervezése” című, NVKP\_16-1-2016-0012 azonosító számú projekt támogatta. A munka a 2018-1.3.1-VKE-2018-00001 számú projekt részeként, a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2018-1.3.1-VKE pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia Magyarország-Olaszország kétoldali mobilitás pályázatának keretein belül készült (NKM2018-42). A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával és az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-5 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Garlotta, D.: A Literature Review of Poly(Lactic Acid), Journal of Polymers and the Environment, 9, 63-84 (2001).
- [2] Luckachan, G. E.; Pillai, C. K. S.: Biodegradable polymers – A review on recent trends and emerging perspectives, Journal of Polymers and Environment, 19, 637-676 (2011).
- [3] Tábi, T.: Tények és tévhitek a biopolimerekkel kapcsolatban I. rész, Biohulladék, 13, 21-26 (2020).
- [4] Sin, L. T.; Rahman, A. R.; Rahman, W. A. W. A.: Polylactic acid: PLA biopolymer technology and applications, Elsevier, Oxford (2012).
- [5] Lim, L-T.; Auras, R.; Rubino, M.: Processing technologies for poly(lactic acid), Progress in Polymer Science, 33, 820-852 (2008).
- [6] Tábi, T.; Németh, Á.; Selmeczy, A.; Szalay, F.: Keményítővel és cellulózzal töltött politejsavból előállított fröccsöntött lebomló polimer termékek laboratóriumi lebontásának és komposztálásának vizsgálata, Biohulladék, 5, 30-34 (2010).
- [7] Tábi, T.; Wacha, A. F.; Hajba, S.: Effect of D-Lactide content of annealed Poly(lactic acid) on its thermal, mechanical, heat deflection temperature, and creep properties, Journal of Applied Polymer Science, 135, 10, 47103 (2018).
- [8] Hajba, S.; Tábi, T.: Cross effect of natural rubber and annealing on the properties of Poly(Lactic Acid), Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 63, 270-277 (2019).
- [9] Tábi, T.; Égerházi, A. Z.; Tamás, P.; Czifágy, T.; Kovács, J. G.: Investigation of injection moulded poly(lactic acid) reinforced with long basalt fibres, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 64, 99-106 (2014).
- [10] Carrasco, F.; Pages, P.; Gámez-Pérez, J.; Santana, O. O.; Maspoch, M. L.: Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties, Polymer Degradation and Stability, 96, 116-125 (2010).
- [11] Neumann, R.; Neunzehn, J.; Hinüber, C.; Flath, T.; Schulze, F. P.; Wiesmann, H.-P.: 3D-printed poly-ε-caprolactone-CaCO<sub>3</sub>-biocomposites scaffolds for hard tissue regeneration, Express Polymer Letters, 13, 2-17 (2019).
- [12] Boros, R.; Kannan Rajamani, P.; Kovács, J. G.: Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting, Express Polymer Letters, 13, 889-897 (2019).
- [13] Tawiah, B.; Yu, B.; Ullah, S.; Wei, R.; Yuen, R. K. K.; Xin, J. H.; Fei, B.: Flame retardant poly(lactic acid) biocomposites reinforced by recycled wool fibers – Thermal and mechanical properties, Express Polymer Letters, 13, 697-712 (2019).
- [14] Dunai, A.; Macskási, L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft. (2003).
- [15] Gebhardt, A.: Understanding Additive Manufacturing, Hanser, München (2011).
- [16] Ali, Md.; Batai, S.; Dastan, S.: 3D printing: a critical review of current development and future prospects, Rapid Prototyping Journal, 25/6, 1108-1126 (2019).
- [17] Ferreira, I.; Machado, M.; Alves, F.; Marques, A.: A review on fibre reinforced composite printing via FFF, Rapid Prototyping Journal, 25/6, 972-988 (2019).
- [18] Tóth, Cs.; Kovács, N. K.: Additív gyártástechnológiával készült, politejsav mátrixú kompozitok vizsgálata, Polimerek, 6/5, 926-930 (2020).
- [19] Nanya, L.; Yingguang, L.; Shuting, L.: Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing, Journal of Materials Processing Technology, 238, 218-225 (2016).
- [20] Malenka, G. M.; Cheung, B. K. O.; Schofield, J. S.; Dawson, M. R.; Carey, J. P.: Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures, Composite Structures, 153, 866-875 (2016).