

ÜVEGSZÁL ERŐSÍTÉSŰ PLA FILAMENTEK NYOMTATÁSI PARAMÉTEREINEK OPTIMALIZÁLÁSA

OPTIMIZING PRINTING PARAMETERS FOR FIBERGLASS REINFORCED PLA FILAMENT

Ádám Balázs^{1*}, 0000-0003-2966-4508, Pálincás János¹, 0009-0005-6528-7123

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar,
Neumann János Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.001>

Kulcsszavak:

Additív gyártás
Erősítő anyag
Üvegszál
PLA nyomtatószerű
Összehasonlítás

Keywords:

Additive Manufacturing
Reinforcing material
Glass fiber
PLA filament
Comparison

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. október 22.
Átdolgozva 2025. december 17.
Elfogadva 2026. január 10.

Összefoglalás

A PLA filamentek tulajdonságait erősítő anyagokkal jelentős mértékben lehet javítani, így az alkalmazásuk kiterjedhet nagyobb igénybevételű területekre is. Ebben a kutatásban két különböző gyártó nyomtatószerűi lettek megvizsgálva, hogy a nyomtatási paraméterek változtatása milyen hatást gyakorol a mechanikai tulajdonságokra. Mivel az egyik gyártó nem közölte az erősítő anyag mennyiségét, így TGA vizsgálatokkal ez is meghatározásra került, valamint DSC mérésekkel a mátrix anyagokat is össze lehetett hasonlítani. A mérések elvégzése után kiderült, hogy a két vizsgált anyag hasonló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, és kevésbé voltak érzékenyek a paraméterek változtatására. A termoelektromos vizsgálatok pedig azt mutatták ki, hogy a mátrixanyagok eltérő L- és D,L-laktid arányokkal rendelkeznek, és az üvegszál mennyiségében is nagy eltérés volt tapasztalható.

Abstract

The properties of PLA filaments can be significantly improved with reinforcing materials, thus extending their application to areas with higher demands. In this research, printer filaments from two different manufacturers were examined to determine how changing the printing parameters affects mechanical properties. Since one manufacturer did not disclose the amount of reinforcing material, this was also determined by TGA, and the matrix material was compared using DSC measurements. After the measurements were taken, it turned out that the two examined materials had similar mechanical properties and were less sensitive to changes in printing parameters. Thermoanalytical tests showed that the matrix materials had different L- and D,L-lactide ratios, and there was also a large difference in the amount of applied glass fibers.

1. Bevezetés

Napjainkban már az iparvállalatokon kívül is elérhető közelségbe került sok felhasználó számára a 3D nyomtatás. Az additív gyártás előnye, hogy sokkal szélesebb felhasználási területre gyárthatunk alkatrészeket, használati tárgyakat, kiegészítő elemeket [1].

* Kapcsolattartó szerző: Ádám Balázs
E-mail cím: adam.balazs@nje.hu

A 3D nyomtatáshoz felhasználható alapanyagok közül az egyik legnépszerűbb, könnyű kezelhetősége miatt a PLA (polylactic acid; politejsav). A PLA biopolimer, vagyis természetes anyagokból előállítható, és ipari körülmények között, komposztálással biológiailag lebomló polimer. Napjainkban a környezetvédelem kiemelt fontosságú, ezért a PLA egy ígéretes alternatíva a hagyományos anyagok leváltására. Ezek mellett jó mechanikai tulajdonságai (60 MPa húzószilárdság, 3 GPa rugalmassági modulus) is szerepet játszottak abban, hogy elterjedt nyomtató alapanyaggá vált [2-4].

A PLA hőre lágyuló, részben kristályos poliészter, előállításának az alapja a fermentálás, a tejsavas erjesztés. Két izomerje fordul elő: az L-laktid és a D-laktid. A kereskedelembe kapható PLA anyagok kopolimerek, melyek L-laktidot (PLLA, poly-L-lactic acid) és D,L-laktidot (PDLLA, poly-D,L-lactic acid) tartalmaznak. Ezek különböző arányai miatt eltérő mechanikai és termikus tulajdonságokkal, különböző üvegesedési és olvadási hőmérsékletekkel rendelkeznek [3-6].

1. Táblázat. Eltérő kopolimer arányok T_g , T_m hőmérsékletei [5]

Kopolimer arány	T_g , üvegesedési hőmérséklet [°C]	T_m , olvadási hőmérséklet [°C]
100/0 (L/D,L)-PLA	63	178
95/5 (L/D,L)-PLA	59	164
90/10 (L/D,L)-PLA	56	150
85/15 (L/D,L)-PLA	56	140
80/20 (L/D,L)-PLA	56	125

A műanyagiparban az üvegszálak az egyik leggyakrabban használt erősítő anyagok, elsősorban a szilárdság, a merevség növelése, a zsugorodás csökkentése, és a hőállóság javítása céljából. A 3D nyomtatásban is megjelentek az igények ezekre a tulajdonságokra, amelyre a gyártók is reagáltak, sorban jelentek meg a piacon az üvegszállal erősített nyomtatószálok [7, 8].

Ebben a kutatásban egy hazai [9] és egy nemzetközi [10] gyártó terméke lett kiválasztva. A hazai gyártó az Országos Additív Tudományos Konferencián [11] tartott előadásában arról beszélt, hogy mesterséges intelligencia segítségével fejleszti az alapanyagait, ami felkeltette a figyelmet a nyomtatószála iránt. Erősített anyag lett kiválasztva a kutatáshoz, viszont az üvegszál tartalma nem volt feltüntetve az adatlapján, ezért kiválasztásra került egy kontroll anyag is, egy nemzetközi gyártótól, amely ismert erősítőanyag tartalommal rendelkezik.

A vizsgálat arra keresi a választ, hogy egy egyszerű felépítésű, asztali 3D nyomtatóval, milyen technológiai paraméterekkel lehet az adott anyagokkal a legnagyobb szilárdságot elérni, és ezt mennyire befolyásolja a nyomtatószál erősítőanyag tartalma és a mátrixanyag minősége, amely termikus vizsgálatokkal elemezhető.

2. Kísérleti rész

2.1. Felhasznált anyagok

A vizsgálathoz használt két üvegszál erősítésű filament a Filaticum Glass Reinforced [9] és az eSUN PLA-GF [10] volt. A két anyag rövidített elnevezése a későbbiekben a Filaticum és az eSun lesz. A Filaticumnál nem, de az eSun esetén meg volt adva, hogy 16% az üvegszál tartalma.

2.2. Nyomtatási paraméterek

A nyomtatásokhoz használt berendezés egy Flashforge Creator Pro 2 márkájú, FDM típusú nyomtató volt. Szabványos (MSZ EN ISO 527-1, MSZ EN ISO 179-1) névleges méretű, 4x10 mm-es vizsgálati keresztmetszettel rendelkező szakító és ütő próbatestek lettek kinyomtatva kétféle szálorientációval. A próbatest hossz tengelyével párhuzamos, és arra +/-45°-os elrendezés lett alkalmazva. A párhuzamos elrendezés biztosítja a legnagyobb szilárdságot, de csak próbatestek esetén alkalmazható, ezért az eltérő geometriák esetén leggyakrabban alkalmazott +/-45°-os

elrendezés is kiválasztásra került. A próbatetek 215, 225, és 235 °C-os hőmérsékleten, 60 °C-os tárgyasztalon, 50, 75, és 100 mm/s sebességgel lettek kinyomtatva, 100%-os kitöltöttség mellett.

2.3. Vizsgálatok

A szakítóvizsgálat INSTRON 3366 típusú univerzális vizsgálóberendezéssel történt, 10 mm/s vizsgálati sebesség mellett. Az ütővizsgálatok Charpy típusú Ceast Impactor II. ütőművön zajlottak, 5 J-os kalapáccsal. A vizsgálatok szobahőmérsékleten lettek elvégezve, és mindkét vizsgálatnál 5-5 párhuzamos mérés történt.

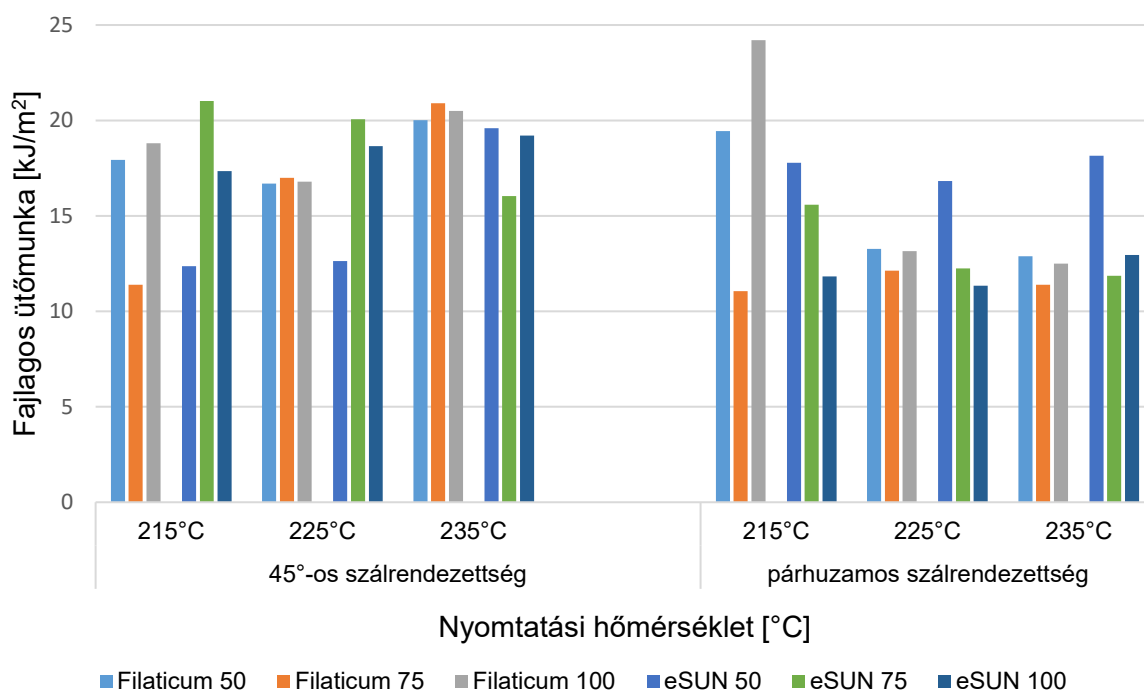
A DSC mérések TA Q200 berendezésen lettek elvégezve, nitrogén atmoszférában. A minták tömegei körülbelül 5 mg voltak. A vizsgálatok 30 és 200 °C között történtek, 20 °C/perc fűtési és 5 °C/perc hűtési sebességgel.

A TGA mérések TA Q5000 berendezésen történtek, nitrogén atmoszférában. A minták tömegei körülbelül 10 mg voltak. A vizsgált hőmérsékleti tartomány szobahőmérséklettől 800 °C-ig tartott, 20 °C/perc fűtési sebességgel.

A TGA mérések után a mintatartóban maradt bomlási maradék vizsgálata Keyence VHX-2000 digitális optikai mikroszkóppal történt.

3. Eredmények értékelése

Az eSun és a Filaticum anyagok ütővizsgálatának eredményei az 1. ábrán láthatóak. Az ábráról leolvasható, hogy az ütőmunka 45°-os szálrendezés esetében kicsivel nagyobb értékeket mutat, mint párhuzamos elrendezésnél, illetve a 45°-os elrendezésnél a nyomtatási sebességek növelésével az értékek kismértékben nőnek, míg párhuzamos elrendezés esetén mindhárom nyomtatási hőmérsékleten inkább csökkenő tendenciát mutatnak, főleg az eSun esetében.

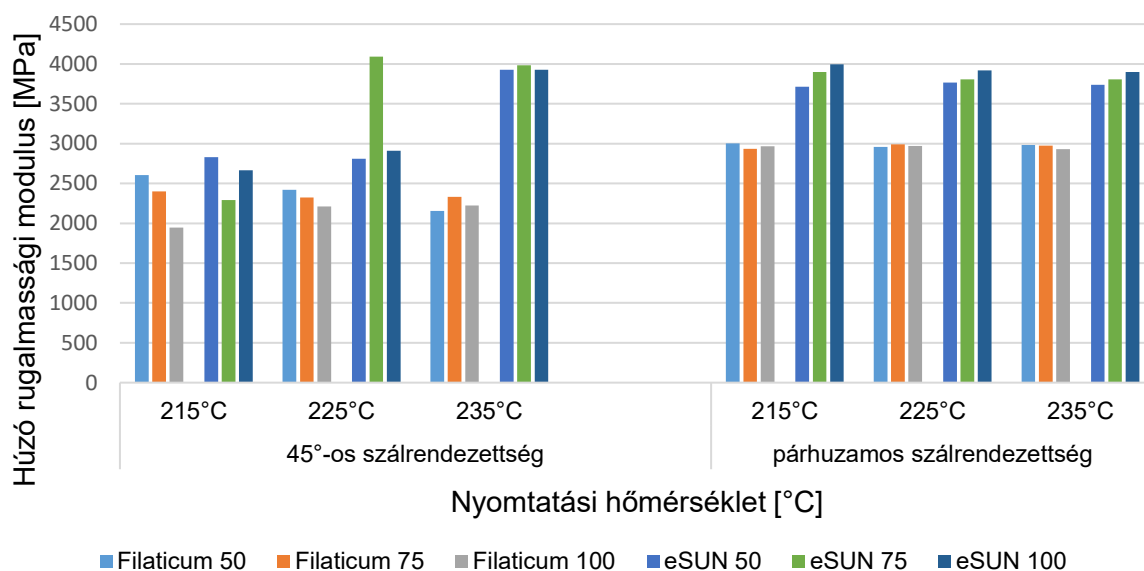


1. ábra: A fajlagos ütőmunka alakulása Filaticum és eSun alkalmazása esetén, különböző nyomtatási hőmérséklet, nyomtatási sebesség, és szálorientáció mellett

A vizsgálatok során láthatóvá vált, hogy a Filaticum szálnál a nyomtatási hőmérséklet növelése a fajlagos ütőmunka növekedését okozta 45°-os orientáció esetén. Párhuzamos orientációnál a hőmérsékletnek nem volt befolyásoló hatása, és a sebességek növelése is csak kismértékű változást eredményezett.

Az eSun filamentnél megfigyelhető, hogy a hőmérséklet változtatásának, főleg párhuzamos orientáció esetén, nincs befolyásoló hatása, 45°-nál is csak kismértékű változás tapasztalható. A sebesség növelése párhuzamos orientációnál inkább csökkenő hatást fejt ki, azonban 45°-esetén érdemes nagyobb sebességgel nyomtatnunk, ha jobb ütőszilárdságot szeretnénk elérni. A szakítóvizsgálat húzó rugalmassági modulus értékei a 2. ábrán láthatóak. Az első, ami rögtön megfigyelhető, hogy a hőmérséklet változtatásának, főleg párhuzamos orientáció esetén nincs befolyásoló hatása, de 45°-nál is csak az eSun esetén érdemes növelni a hőmérsékletet, mert akkor magasabb modulus értékeket kapunk. A sebesség növelésének szintén nincs befolyásoló hatása a Filaticum anyagra, sőt, 45°-nál inkább alacsonyabb értékeket mérhetünk, ha növeljük azt. Az eSun filamentnél viszont már érdemes nagyobb sebességet választani párhuzamos orientációnál, mert bár kismértékben, de nagyobb értékeket kapunk.

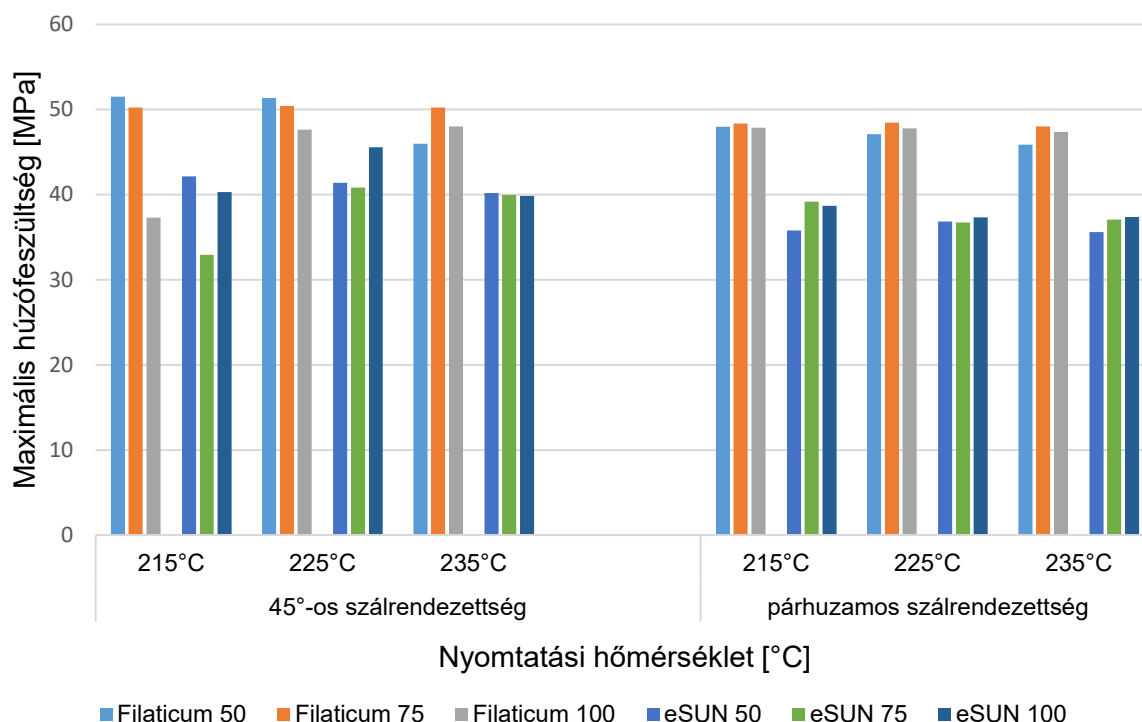
A modulus és az ütőszilárdság változásainál megfigyelhető az összefüggés, hogy a párhuzamos orientációnál mért magasabb modulus értékek nagyobb merevséget jelentenek, a szálak nagyobb felületen érnek és hegednek össze, tömörebb szerkezet jön létre, aminek hatására ennél az orientációnál alacsonyabb ütőszilárdság értékeket kaptunk. Ezzel szemben a 45°-os elrendezés esetén kisebb a modulus, amihez nagyobb ütőszilárdság párosul.



2. ábra: A húzó rugalmassági modulus értékei Filaticum és eSun alkalmazása esetén, különböző nyomatási hőmérséklet, nyomatási sebesség, és szálorientáció mellett

A 3. ábrán a húzószilárdság értékei láthatóak különböző beállításoknál.

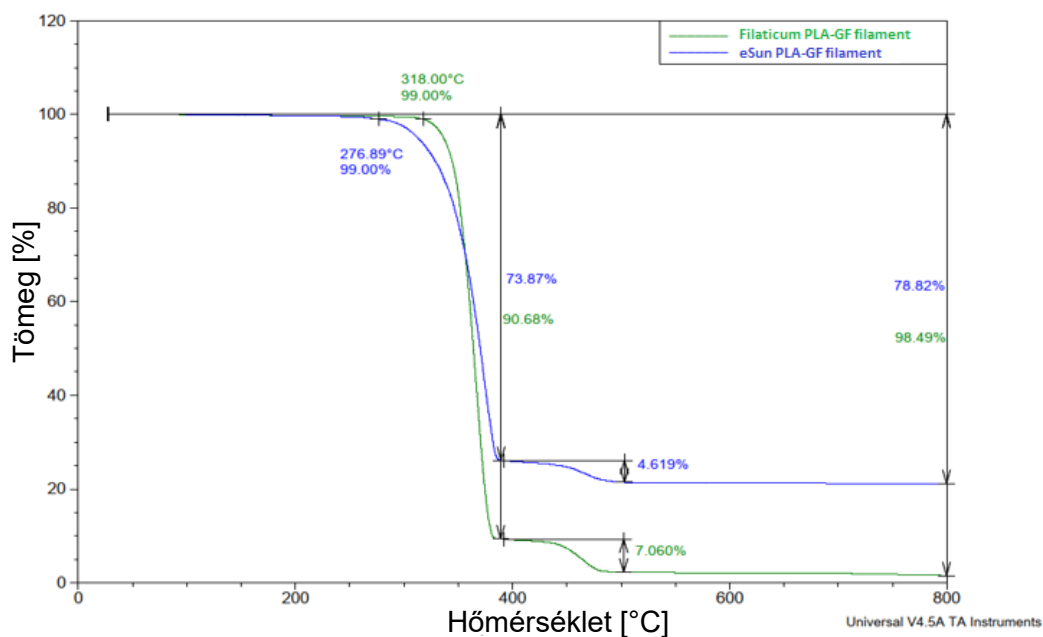
A húzószilárdság esetén hasonló megállapítások tehetők, mint a modulusnál. A nyomatási hőmérsékletnek gyakorlatilag nincs befolyásoló hatása a szilárdságra egyik anyagnál és orientációnál sem. A sebesség növelése is csak kisebb változást tud előidézni, a legtöbb esetben kismértékű szilárdság növekedést biztosít, viszont 45°-os orientáció esetén, alacsonyabb nyomatási hőmérsékleten ezzel ellentétes hatást fejt ki, ezekben az esetekben kimértékben csökkenteni képes a szilárdsági értékeket, 215 °C-nál mindkét vizsgált anyagnál, 225 °C-nál már csak a Filaticum esetében.



3. ábra: A húzószilárdság értékei Filaticum és eSun alkalmazása esetén, különböző nyomtatási hőmérséklet, nyomtatási sebesség, és szálorientáció mellett

A szálakon végzett TGA vizsgálatok során kapott bomlási görbék a 4. ábrán láthatóak. A vizsgált anyagok bomlási görbéi hasonlóak, de mégis mutatnak eltérést. Mindkét szál kétlépcsős bomlással rendelkezik 400 °C előtt és után. Az első, nagyobb léptékű bomlási lépcső a mátrix anyag, a PLA bomlása, míg a második, kisebb lépcső egy adalékanyag bomlása. Mindkét anyagnál van maradék tömeg, ami az üvegszál tartalmat is mutatja, hisz nem érjük el az üveg olvadási hőmérsékletét. A Filaticum szál esetén látható, hogy később kezd el bomlani, viszont a maradék tömeg kisebb, csak 1,5%, tehát a magasabb kezdeti bomlási hőmérséklet nem magyarázható automatikusan a magasabb száltartalommal, hisz pont itt lett kevesebb. Ez alapján inkább hőstabilizátor okozhatja a magasabb értéket. Viszont mivel később kezd el bomlani, ezért feltételezhető, hogy magasabb hőállósággal is rendelkezik. A második bomlási lépcső tömegváltozása különböző, ami az adalékanyagok eltérő mennyiségére utal. Ugyanakkor az egyező hőmérséklet miatt valószínűleg ugyanazt az adalékanyagot használhatja a két gyártó. Az adalékanyagokról egyik gyártó adatlapján sem található információ.

Az eSun esetén 21% a maradék tömeg, ami több, mint a megadott 16%-os üvegszál tartalom, tehát feltételezhető, hogy az üvegszál mellett más el nem bomlott adalékanyag is megtalálható. A nagyobb üvegszáltartalom ellenére ugyanakkor hamarabb kezd el bomlani. Az 1%-os kezdeti bomlás hőmérséklet értékei között jelentős, 42 °C-os eltérés mérhető, ennyivel hamarabb kezd el bomlani az eSun anyaga. Ez lehet a hőstabilizátor hiánya, de a bomlási hőmérséklet különbsége visszavezethető a mátrix anyagra is, az eltérő L- és D,L-laktid arány befolyásolja a jellemző hőmérsékleteket, így akár különböző hőállóságot is tud biztosítani, ami kihat a bomlási hőmérsékletre is. Az L- és D,L-laktid arányra az olvadási hőmérséklet értékéből lehet következtetni, amit DSC méréssel lehet meghatározni.



4. ábra: Filaticum és eSun TGA görbéi

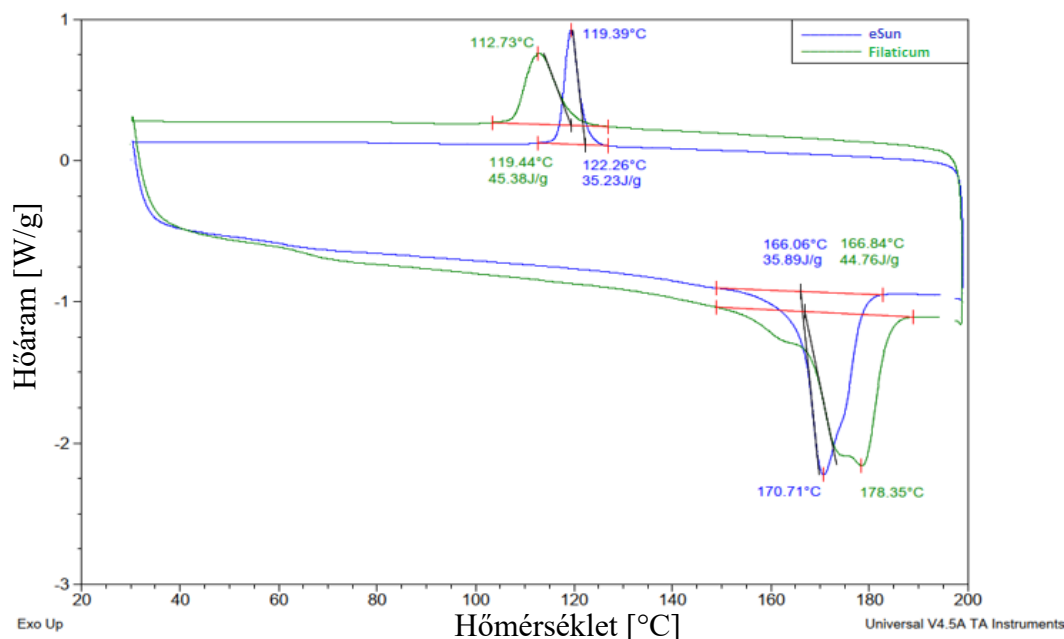
Az 5. ábra a DSC vizsgálat eredményeit mutatja. Az olvadási DSC görbékből megállapítható, hogy a Filaticum szál olvadása három csúcsot mutat, míg az eSun kettőt, és a Filaticum esetén az utolsó csúcs hőmérséklete magasabb (178 °C), mint az eSun utolsó csúcshőmérséklete (171 °C).

A többszűcsös olvadás oka, hogy a PLA polimorf polimer, a kristályosítás körülményeitől függően többféle kristályos szerkezet is ki tud alakulni. Ömledékből való kristályosításkor az α kristálymódosulat alakul ki, ami egy stabil módosulat. Az α kristálymódosulatlak létezik egy termodinamikailag kevésbé stabil, kisebb rendezettségű α' módosulata, melynek kialakulása a hőmérséklettől függ. Ömledékből való kristályosodás során 120 °C felett α , 100 °C alatt α' képződik, 100 és 120 °C között pedig mindkettő megtalálható. Ez a kettősség okozza a DSC vizsgálatok során kimutatható kettős olvadási csúcsokat [12-15].

Az olvadási hőmérsékleteknél tapasztalt eltérések arra engednek következtetni, hogy a két filament eltérő L- és D,L-laktid arányokkal rendelkezik. Az alacsonyabb olvadási hőmérséklet magasabb D,L-laktid arányt jelent a kopolimerben. Az eltérő D,L-laktid arány nemcsak a hőmérsékletet, hanem a mechanikai tulajdonságokat is befolyásolja. A csak L-laktidot tartalmazó polimer szilárdsága a legnagyobb, és a D,L laktid arány növelésével a szilárdság egyre csökken, viszont mellette a rugalmasság növekedésével számolhatunk.

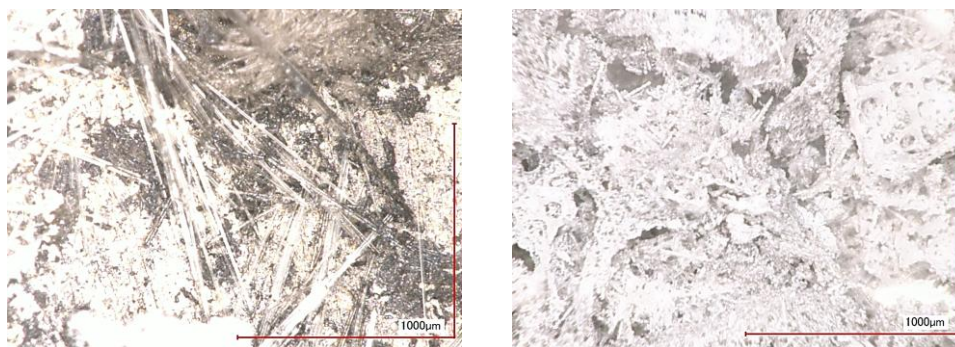
Az olvadás során nemcsak a hőmérsékletek, hanem az olvadáshő is különbözik. A Filaticum esetén 45 J/g mérhető, míg az eSun esetén ennél kevesebb, 36 J/g mutatható ki. Az olvadáshő a kristályos fázis mennyiségét mutatják meg, így kijelenthető, hogy a Filaticum mennyiségileg több kristályos fázist tud létrehozni azonos hűtési körülmények között. A magasabb kristályos hányad elméletileg nagyobb szilárdságot tud biztosítani, azonban a nyomtatás során a hűtés sokkal intenzívebb, mint a DSC mérés során, így a hűtésre érzékeny [12-17] PLA alkalmazása esetén a nyomtatott próbatestek kevesebb kristályos fázissal fognak rendelkezni, így az olvadáshő különbségek is várhatóan kisebbek lesznek.

A kristályosodási görbék a kristályosodás sebességével vannak kapcsolatban, az ott látható csúcsok a kristályosodás sebességének maximumát jelölik. A csúcshőmérsékletekből látható, hogy az eSun a hűtés során magasabb hőmérsékleten (119 °C) kristályosodik ki, de a hőmérséklet intervallum szűk, tehát időben is gyors lefolyású, ami nem kedvez a nagyobb mennyiségű kristályok kialakulásának. A Filaticum ezzel szemben bár alacsonyabb hőmérsékleten (113 °C) kristályosodik, de a hőmérséklet intervallum szélesebb, több időt hagyva így a nagyobb méretű kristályok létrehozására.



5. ábra: Filaticum és eSUN DSC görbéi, hűtés (fent) és 2. felfűtés (lent)

A TGA és a DSC mérések mellett további hasznos információt képes szolgáltatni a TGA mintatartóban maradt bomlási maradék mikroszkópos vizsgálata. A 6. ábrán látható mikroszkópi felvételeken jól kivehető a mintatartóban maradt üvegszálak. Az is megállapítható, hogy az üvegszálak mellett további el nem bomlott adalékanyag is megtalálható. Az üvegszálak esetén szembejövő, hogy a Filaticum esetében a mennyisége tényleg kevesebb, ugyanakkor hosszabb üvegszálak láthatóak, míg az eSun esetén rövidebb, de mennyiségileg több üvegszál fedezhető fel. Ez a különbség magyarázatot ad arra, hogy a Filaticum mennyiségileg kevesebb üvegszállal hogyan tudott közel ugyanolyan mechanikai szilárdságot elérni, mint a több üvegszállal rendelkező eSun. A hosszabb üvegszálak a nagyobb fajlagos felületük miatt nagyobb kapcsolódási felület alakítanak ki a mátrixanyaggal, így nagyobb szilárdságot tudnak biztosítani, mint a rövidebbek, így mennyiségileg elegendő volt kevesebbet alkalmazni.



6. ábra: TGA vizsgálat után maradt üvegszálak Filaticum (bal oldalt) és eSun (jobb oldalt) filamenteknél, nagyítás: 150x

4. Összefoglalás

A kutatás célkitűzése az volt, hogy egy hazai és egy nemzetközi üvegszállal erősített filament típust hasonlítsa össze egy paraméter optimalizáláson keresztül. A mechanikai vizsgálatok eredményeit összegezve az a megállapítás tehető, hogy mindkét alapanyag a vizsgált hőmérséklet- és sebességtartományban gyakorlatilag bármilyen beállítással használható, az eredményeket nem igazán befolyásolták a paraméterekben bekövetkezett változások. Kimutatható volt bizonyos esetekben kismértékű növekedés vagy csökkenés, de ezek mértéke nem igazán számottevő, tehát mindkét cégnek sikerült az alapanyagával egy viszonylag széles paraméter tartományban egyaránt használható nyomtatóanyagot fejleszteniük.

Érdekesebb eredményeket hozott a TGA és a DSC vizsgálat. A TGA mérések kimutatták, hogy a Filaticum üvegszál tartalma meglepően kicsi, a vizsgálat végén a maradó anyagmennyiség csak 1,5% volt, szemben az eSun adatlapján feltüntetett 16%-kal, amit a TGA vizsgálat is megerősített, a mérés végén kimutatható maradó anyagmennyiség 21% volt, ami további el nem bomló töltőanyagra utal. A DSC mérések kimutatták, hogy az olvadási hőmérsékletekben is van különbség, a Filaticum magasabb (178 °C), az eSun alacsonyabb (171 °C) csúcshőmérsékletű olvadást mutatott. Az eltérő olvadási hőmérsékletek eltérő L- és D,L-laktid tartalmat feltételeznek, és a különbségből feltételezhető, hogy a Filaticum kevesebb D,L-laktidot tartalmaz, ami magasabb szilárdsághoz vezet. A TGA mintatartókban maradt el nem bomlott anyagok mikroszkópos vizsgálata kimutatta, hogy a Filaticum a kis mennyiségű üvegszálat azzal kompenzálta, hogy cserébe hosszú üvegszálakat alkalmazott, ami a nagyobb fajlagos felülete miatt nagyobb szilárdság elérésére volt képes, még a kisebb mennyiség ellenére is, ezáltal körülbelül ugyanazokat a mechanikai eredményeket volt képes produkálni, mint a jóval több, de rövidebb üvegszálat tartalmazó eSun.

Összegezve tehát elmondható, hogy a vizsgálatban résztvevő mindkét gyártó anyaga ajánlható üvegszállal erősített alkatrész előállítására, ugyanakkor az is bemutatásra került, hogy nagyobb szilárdságú mátrix anyag és hosszú üvegszál együttes alkalmazásával le lehet csökkenteni az erősítő anyag mennyiségét és mégis el lehet érni hasonló eredményeket, mint amit a hagyományos, nagy mennyiségben alkalmazott, rövid szálerősítés biztosítani tud.

Irodalomjegyzék

- [1] Polimer termékek kisszerűs gyártása, Jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék, változat: 3.8 kiadva: 2019.03.18.
https://www.pt.bme.hu/segedletek/b4_kisszerias_v38.pdf
- [2] Mohammad Raquibul Hasan, Ian J. Davies, Alokes Pramanik, Michele John, Wahidul K. Biswas: Potential of recycled PLA in 3D printing: A review, Sustainable Manufacturing and Service Economics, Volume 3, 2024, 100020, ISSN 2667-3444, DOI: 10.1016/j.smse.2024.100020
- [3] Dr. Tábi Tamás: Biopolimerek, biopolimer kompozitok, Budapesti Műszaki Egyetem előadás,
www.pt.bme.hu/futotargyak/57_BMEGEPTMG12.../Biopolimerek_eloadas_2015.pdf
- [4] Dr. Bodnár Ildikó: Lebomló polimerek, Debreceni Egyetem előadás,
www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/lebonthato%20muanyagok/lbm-ea-2014.pdf
- [5] L.-T. Lim, R. Auras, M. Rubino: Processing technologies for poly(lactic acid): Progress in Polymer Science, Volume 33, Issue 8, 2008, Pages 820-852, ISSN 0079-6700, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004
- [6] Anders Södergard, Mikael Stolt: Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition, Progress in Polymer Science, Volume 27, Issue 6, 2002, Pages 1123-1163, ISSN 0079-6700, DOI: 10.1016/S0079-6700(02)00012-6
- [7] Lan Cao, Jianhua Xiao, Jin Kuk Kim, Xiaojie Zhang: Effect of post-process treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 41, 2023, Pages 135-143, ISSN 1755-5817, DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.12.008
- [8] Estera Vălean, Liviu Marşavina, Sergiu-Valentin Galaţanu, Pietro Foti, Filippo Berto: Effect of notches on static and dynamic bending of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fiber, Procedia Structural Integrity, Volume 68, 2025, Pages 955-961, ISSN 2452-3216, DOI: 10.1016/j.prostr.2025.06.156
- [9] <https://filaticum.com/termek/filaticum-glass-reinforced/>
- [10] <https://www.esun3d.com/epla-gf-product/>
- [11] <https://additiv.nje.hu/program> (Dr. Bodnár Zsolt, Filaticum Kft. – Design of Filament with AI)
- [12] Pukánszky Béla, Móczó János: Műanyagok, Egyetemi tananyag, Typotex Kiadó, elektronikus kiadás, 2011

- [13] Hajba Sándor: Politejsav és társított politejsav kristályszerkezetének műszaki tulajdonságokra gyakorolt hatásának elemzése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2018. <https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/891ac28a-927e-42f5-bed4-ef1944dfbcd5>
- [14] Gere Dániel: Kőolaj- és bioalapú polimer keverékek újrahasznosíthatósága: anyagában történő újrahasznosítás és komposztálás, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2022. <https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/21d71c02-e48e-4adb-ae5e-6dcdbea7e04d>
- [15] Tábi Tamás: Keményítőből és politejsavból előállított fröccsöntött lebomló polimerek feldolgozásának és felhasználhatóságának elemzése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2010. <https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/29f08c84-3633-41fa-971a-55dc3930e62a>
- [16] Ádám, Balázs; Weltsch, Zoltán: Thermal and Mechanical Assessment of PLA-SEBS and PLA-SEBS-CNT Biopolymer Blends for 3D Printing, Applied Sciences, 2021. 11(13), Paper: 6218. DOI: 10.3390/app11136218
- [17] Ádám, Balázs; Polgár, Balázs; Nagy, Dorottya: The effect of different printing parameters on mechanical and thermal properties of PLA specimens, GRADUS, 2020. 7:3 pp. 166-173. DOI: 10.47833/2020.3.ENG.001