



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

KUNSÁGI VIKTÓRIA

TDK DOLGOZAT

FALISZT TÖLTÉS HATÁSÁNAK ELEMZÉSE POLITEJSAV 3D  
NYOMTATÁSSAL TÖRTÉNŐ FELDOLGOZHATÓSÁGÁRA

Konzulensek:

*Dr. Kmetty Ákos*

EGYETEMI DOCENS

*Dr. Kovács Norbert Krisztián*

ADJUNKTUS

BUDAPEST, 2023

*Nyilatkozat az önálló munkáról*

Alulírott, *Kunsági Viktória* (D0M4XC), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023.11.05.



*hallgató aláírása*

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Kmetty Ákosnak és Dr. Kovács Norbert Krisztiánnak, akik segítségükkel és szakmai tudásukkal nagyban hozzájárultak a munkám sikerességében, a Polimertechnika tanszéken dolgozó munkatársaknak, akik folyamatosan segítettek a kutatásomat. Külön köszönetet nyilvánítok Markó Gábornak (Markó Faipari Kft.), aki biztosította nekem a kutatás során alkalmazott falisztet, illetve hasznos tanácsokkal látott el.

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-466 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A TDK dolgozat Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

## TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás .....	iii
Jelölések jegyzéke .....	vi
1. Bevezetés .....	2
2. Szakirodalmi áttekintés .....	4
2.1. Extrúziós úton történő 3D nyomtatás .....	4
2.2. Biodegradálható polimerek .....	4
2.3. Faanyag nedvességtartalma .....	6
2.4. Fatöltésű biokompozitok .....	7
2.5. Kereskedelmi forgalomban lévő faliszt töltésű filamentek .....	9
2.6. Célkitűzés, szakirodalmi kritika .....	10
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések .....	11
3.1. Felhasznált alapanyagok .....	11
3.1.1. Politejsav .....	11
3.1.2. Faliszt .....	11
3.2. Alkalmazott berendezések .....	12
3.2.1. Szárítás és nedvességtartalom meghatározás .....	12
3.2.2. Kompaundálás és nyomtatósál gyártás .....	13
3.2.3. Termékgyártás .....	14
3.2.4. Anyagszerkezeti vizsgálatok .....	16
3.3. Vizsgálati módszerek .....	18
3.3.1. Szakítóvizsgálat .....	18
3.3.2. Hárompontos hajlítóvizsgálat .....	20
4. Kísérleti/fejlesztési rész .....	22
4.1. Faliszt szemcseméretének vizsgálata .....	22
4.2. Kompaundálás ikercsigás extruderrel .....	23
4.3. Nyomtatósál gyártás .....	24

4.4.	3D nyomtatás.....	25
4.5.	Sűrűségmérés.....	27
4.6.	Mechanikai tulajdonságok vizsgálata.....	28
4.6.1.	Szakítóvizsgálat.....	28
4.6.2.	Hajlítóvizsgálat.....	31
4.6.3.	Pasztázó elektronmikroszkópos vizsgálat .....	33
4.7.	Differenciális pasztázó kalorimetria.....	34
4.8.	Nedvességtartalom mérése .....	35
5.	ÖSSZEFOGLALÁS és megoldásra váró feladatok.....	36
5.1.	Összefoglalás.....	36
5.2.	Megoldásra váró feladatok .....	37
6.	Felhasznált források.....	39

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

### Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$D_{SZ}$	szemcseméret (grain size)	$\mu\text{m}$
$E_H$	rugalmassági modulus (tensile modulus)	MPa
V	térfogat (volume)	$\text{m}^3$
T	hőmérséklet (temperature)	$^{\circ}\text{C}$
$T_g$	üvegesedési átmenet hőmérséklet (glass transition temperature)	$^{\circ}\text{C}$
$W_B\%$	tömegszázalék (percent by weight)	m%

### Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\varepsilon$	nyúlás (tensile yield)	%
$\sigma$	szilárdság (strength)	MPa

### Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
AM	additív gyártástechnológia (additive manufacturing technology)
PLA	politejsav (polylactic acid)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp (scanning electron microscope)
3D	háromdimenzió (three dimensional)
$\text{CO}_2$	széndioxid (carbon dioxide)
WPC	fa polimer kompozit (wood-plastic composite)
TDK	Tudományos Diákköri Konferencia (Scientific Students' Associations)



## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre nagyobb figyelmet kapnak a kőolaj alapú, biológiai úton nem lebontható polimerek kiváltása környezetbarát biopolimerekkel, főként rövid életciklusú termékek esetén. Egyik közismert képviselője a biopolimereknek a politejsav, amelyet gyakran PLA-ként is rövidítenek angol elnevezéséből fakadóan (polylactic acid). A PLA tökéletesen beilleszthető a körkörös gazdaságba, ugyanis nemcsak megújuló erőforrásból előállítható, hanem biológiai úton le is bontható [1].

Manapság mindennapivá vált az additív gyártástechnológiák (AM) alkalmazása. Fontos felhasználási területévé vált az ipar, az orvostechika, az elektronika, a hadászat és a háztartás is. Az extrúzió alapú AM technológia esetében háromdimenziós (3D) terméket hozunk létre azáltal, hogy egy nyomtatószálat, amely hőre lágyuló műanyagból készült, átnyomunk egy felfűtött fűvókán, majd rétegenként lerakjuk. Napjainkban közkezdvelt nyomtatószálat anyag a politejsav, amelynek számos kedvező tulajdonsága van: kedvező áru, könnyen nyomtatható és nem mérgező. Emellett alacsony olvadásponttal (jellemzően 190-220 °C között) rendelkezik, tehát alacsony hőmérsékleten is kiválóan nyomtatható, amivel időt és energiát is megtakaríthatunk. Alkalmazásakor nem kötelező a fűtött asztal, illetve kicsi zsugorodás és vetemedés jellemzi a többi nyomtatószálananyaghoz képest [1, 2].

Magyarországon évente a kitermelt nettó faanyagterfogat 5,9 millió m<sup>3</sup>, amelyből hozzávetőlegesen 1-1,2 millió m<sup>3</sup> melléktermék, illetve hulladék keletkezik. Ezek különböző formában jönnek létre (por, forgács stb.), és jelentős részük nem kerül felhasználásra [3]. E faipari melléktermékek felhasználási módja közé tartozik a 3D nyomtatás, ami fautánzatú termék gyártását teszi lehetővé. Ezáltal új iparágat nyitunk meg a 3D nyomtatás előtt, többek között a bútortipart. Emellett a faipari melléktermék felhasználásával az alapanyagár is alacsonyabb lesz, ami biopolimerek esetében kimondott fontossággal bír, mivel az anyag elterjedésében jelentős korlátot szab a tömegműanyagokhoz képesti magas ára. Fa töltés hatására az alkalmazott biopolimerből kisebb mennyiségre lesz szükség. Minél nagyobb tömegszázalékban kerül adagolásra a faliszt, annál jelentősebb a költségcsökkentő hatása. Ez tökéletesen illeszkedik a jelenkor környezetvédelmi céljába.

A TDK munkám során a fatöltésű politejsav extrúzió alapú AM technológiával való nyomtathatóságát vizsgálom. Céлом a különböző tömegszázalékú faliszt és PLA keverék



kompaundálásának, nyomtatószal gyártásának és 3D nyomtatásának a tanulmányozása, illetve a nyomtatott termékek különböző anyagszerkezeti, morfológiai és optikai vizsgálata.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Annak érdekében, hogy a kutatásom felépítése és lényege könnyebben értelmezhető legyen, fontos áttekinteni néhány szakirodalmi forrást, amiben néhány fontosabb fogalmat, mechanizmust, illetve korábbi hasonló témában folytatott kutatási eredményeket foglalok össze.

### 2.1. Extrúziós úton történő 3D nyomtatás

A 3D nyomtatásnak 7 fő csoportját különböztetjük meg, amely közül egyik kategória a material extrusion, azaz olyan anyag extrudálása, amelynek megömlesztése hő által történik. E csoportba tartozik az extrúziós úton történő 3D nyomtatás, azaz a fused deposition modelling (FDM) és a fused filament fabrication (FFF/FFM). Az FDM technológia szabadalmaztatása S. Scott Crump nevéhez fűződik, aki megalapította a Stratasys-t, ami egy 3D nyomtató, szoftver és anyaggyártó cég. FDM technológia alkalmazásával nagyobb igénybevételnek is ellenálló műanyag alkatrészek állíthatók elő. Ennek mására dolgozták ki az FFF (gyakran FFM-ként is rövidített) technológiát, amely szabadabb felhasználást engedett meg. Mivel pontatlanabb méretű termékek készíthetők vele, így olcsóbban hozzáférhető volt, amely jelentősen közrejátszott a hobbi-, illetve az otthoni nyomtatók elterjedésében. Miután az FDM szabadalom 2012-ben lejárt, a két megjelölés egybeolvadt; általában mindkét esetben az FDM megnevezés használatos. E technológiával szinte bármi nyomtatható, ami szilárd halmazállapotú. Tömeges elterjedése 2009-ben kezdődött, amikor jelentős mennyiségű 3D nyomtató gyártó cég és több ügynevezett nyomtatófarm jelent meg a piacon [4, 5, 6].

### 2.2. Biodegradálható polimerek

A világon termelt műanyag mennyisége az elmúlt 40 évben négyszeresére növekedett, Európában 2021-ban 57,2 millió tonnára tehető az értéke, tehát a kitermelt olajnak körülbelül 6%-át használják fel erre a célra. Ekkora mennyiség mellett nem elhanyagolható mértékű a műanyagok „láthatatlan” környezetszennyezése, ami a műanyagok előállítása és felhasználása során kibocsátott szén-dioxid (CO<sub>2</sub>) mennyiségét takarja. Ez 2015-ben 1,7 Gt CO<sub>2</sub>-ekvivalens-kibocsátást jelentett, ami a világon kibocsátott CO<sub>2</sub> mennyiségének a 3,8%-át jelenti. Ez az érték évről-évre nő, tanulmányok szerint, ha nem változik a tendencia, ennek az értéke akár 15%-ot is elérhet 2050-ben. Ennek csökkentésére megoldást nyújtanak a biopolimerek, amelyek alkalmazásával a műanyagok ökológiai lábnyoma mérsékelhető. Az ökológiai

lábnyom megadja, hogy az adott társadalom életszínvonalának fenntartásához mennyi erőforrás, termőföld, víz és levegő szükséges. Ennek csökkentésével enyhíteni lehet a klímaváltozást és a globális felmelegedést, ugyanis a biopolimerek előállítása során alapanyagként felhasznált növények termelésekor CO<sub>2</sub> kerül megkötésre [7, 8, 9].

Napjainkban új anyag előállítása költséghatékonyabb, mint az újrahasznosítás. A világon előállított műanyag mennyisége évente 360 millió tonna, amely közül a bioműanyagok csupán 1%-ot tesznek ki. Ennek értéke 2019-ben 2,1 millió tonna volt, amelynek értéke egyre nőhet, ugyanis egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek a biopolimerek az utóbbi években [10].

A természetes alapú polimereket, mint például a cellulózt és a fát, nehéz feldolgozhatóság és kezelhetőség jellemzi, ezért önmagában jellemzően nem kerül felhasználásra műanyag előállításához, viszont töltőanyagként előszeretettel alkalmazzák, ezáltal a polimer CO<sub>2</sub> mérlege számottevően javítható. Erre példa többek között a fa-műanyag kompozit, amelyet gyakran angol elnevezésének a rövidítéséből (wood-plastic composite) eredően WPC-ként is emlegetnek, és az organikus biokompozitok közé tartozik. A természetes töltőanyagoknak számos előnye van, többek között a környezettel való összeférhetőség, gyors megújulás és az alacsony előállítási költség [11].

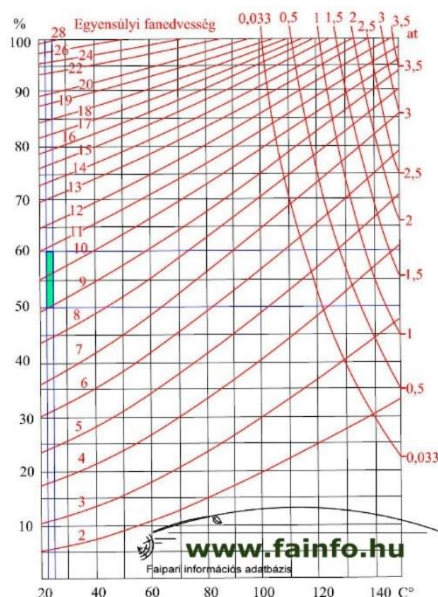
Az egyik legismertebb és legkedveltebb biopolimerek közé tartozik a széleskörű felhasználhatósága miatt (tasakok, fóliák, zacskók, padlóburkolat stb.) a politejsav (PLA), amely egy megújuló erőforrásból származó, biológiai úton lebontható, azaz biodegradálható polimer. Előállításához szükséges alapanyagként bármilyen magas keményítőtartalmú növény (kukorica, burgonya, rizs, búza) alkalmazható. A közhiedelemmel ellentétben a politejsav nem lebomló, hanem lebontható biopolimer, azaz hulladéklerakóban, vagy rosszabb esetben természetben eldobva nem képes önmagától lebomlani. Környezetre ártalmatlan anyagokká csak a megfelelő baktériumok jelenlétében és a megfelelő környezetben, azaz kereskedelmi komposztáló telepeken képes lebomlani, házi komposztálása nem megoldott, ugyanis a PLA 60 °C-os lebontáshoz szükséges hőmérséklete nem érhető így el [12, 11].

A PLA az alfiás poliészterek csoportjába tartozik, tehát mechanikai és hőállósági tulajdonságainak köszönhetően széles körben felhasználható. Fontos megemlíteni, hogy a politejsav higroszkópos, azaz nedvességfelvételre hajlamos, ami nagyobb mennyiségben viszkozitáscsökkenést, habképződést, termikus bomlást vagy akár hidrolízist is okozhat, ami alatt a víz hatására történő kémiai átalakulást értjük. Ekkor a szénvegyületek kisebb molekulákra bomlanak fel. Emellett a PLA időfüggő tulajdonságokkal rendelkezik, gyenge hő-

és ütésállóság jellemzi, illetve a kőolaj alapú polimerekhez árához képest háromszorosába kerül [13, 10].

### 2.3. Faanyag nedvességtartalma

A fának, mint növényi szervezetnek, létfontosságú eleme a víz. Az újonnan kivágott fa hozzávetőlegesen 80-120% nedvességtartalommal rendelkezik, ami a környezeti páratartalom és hőmérséklet függvényében akár 60-70%-ra is lecsökkenhet. A faipari felhasználás során ezt a mennyiséget 8-18% közé kell csökkenteni, amely csak szárítás alkalmazásával megoldható. A faanyag mindig egy adott értékhez tartozó nedvességtartalomhoz törekszik, amelyet egyensúlyi fanedvességnek nevezünk. Ez mindig függ a környezet relatív páratartalmától és hőmérsékletétől. A relatív páratartalom értéke megmutatja, hogy a teljesen telített levegő vízmennyiségének hány százaléka található meg a környezetben, amely szintén hőmérsékletfüggő. Amennyiben ez az érték eléri a 100%-ot, a levegő nem vesz fel több nedvességet, nagyobb érték esetén pedig a nedvességtöbblet csapadékként kiválik. Ez az érték melegítés hatására csökken. A fa nedvességtartalma mindig alkalmazkodik a környező levegő páratartalmához, és változatlan körülmények esetében egy adott értékre beáll. A fa egyensúlyi nedvességtartalmának értéke a környezeti hőmérséklet és páratartalom ismeretében az 1. ábról olvasható le. Fontos megjegyezni, hogy ennek értéke, habár kis mértékben, de a fafajtól is függ [14].



1. ábra A fa egyensúlyi nedvességtartalma [14]

A fában lévő víz megjelenési formájától függően két állapotot különböztetünk meg: szabad, illetve kötött vizet. A szabad víz eltávolítása nem jár a fa zsugorodásával és alakváltozásával. A kötött víz alatt a molekuláris szinten kapcsolódott vizet értjük, amelynek eltávolítása nehezebb, mint a szabad vízé. A két állapot közti határt nevezzük rosttelítettségi határnak, amelynek értéke 30%. Ez az érték fafajtól függően kis mértékben eltolódhat. Szárítás során elsőként a szabad víz távozik el a fából, majd a kötött víz. Utóbbi távozása esetén megtapasztalható a fa zsugorodása. Ellenkező esetben, nedvességfelvétel esetén is a korábban említett tendencia érvényes: a rosttelítettségi határ eléréséig kötött vizet vesz fel a fa, ami méretnövekedéssel, dagadással jár. Amint eléri a fa nedvességtartalma a 30%-os rosttelítettségi határt, a nedvesség szabad víz formájában kötődik meg, ami nem okoz méretváltozást [15].

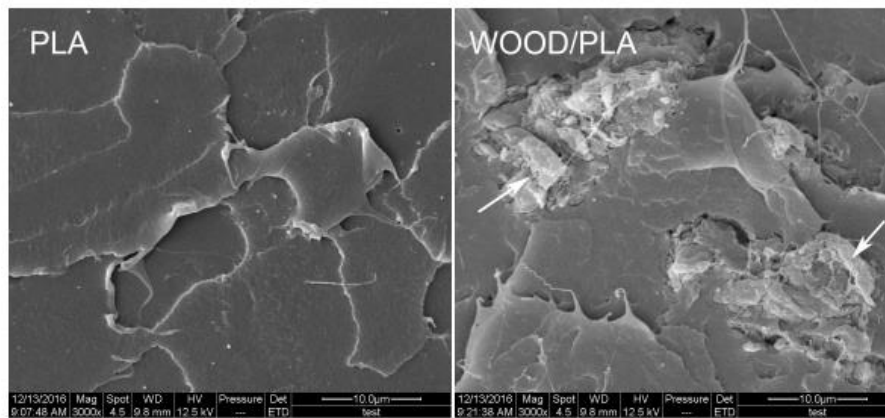
#### 2.4. Fatöltésű biokompozitok

Egyik legnagyobb kritika az FDM technológiával szemben a fokozott műanyag felhasználás, amelyre megoldást jelenthet a bioműanyagok tömegek számára is elérhetővé és megfizethetővé tétele. Ennek egyik módja az anyagár csökkentése a hulladékká vált, illetve elégetésre szánt faliszt felhasználásával, amelynek minél nagyobb arányban történő keverésével a fatöltetű biokompozit ára jelentősen csökkenthető. 2012-ben körülbelül 260.000 tonna fatöltetű biokompozitot állítottak elő, ami hozzávetőlegesen 10%-át teszi ki az ebben az évben Európában gyártott üveg, szén, fa, illetve természetes szálakat tartalmazó kompozitoknak. E kompozit legfontosabb felhasználási területei közé tartozik a burkolás (wood-plastic composites WPC) és az autóipar, ahol fröccsöntés segítségével állítják elő a kívánt elemeket [16]

Habár napjainkban főként extrúzióval és fröccsöntési technológiával történik a fatöltésű biokompozitok felhasználása, egyre több kutatás van folyamatban a 3D nyomtatással történő alkalmazásának elterjedése érdekében. Emellett egyre több gyártó foglalkozik fatöltésű nyomtatószáll forgalmazásával.

Yubo Tao és társai [17] PLA (NatureWorks Ingeo 4032D) és faliszt alkalmazásával állítottak elő nyomtatószállakat, majd megvizsgálták azokat. Egycsigás extruder alkalmazásával 5 m% falisztet adagoltak politejsavhoz, majd a leggyártott nyomtatószállból 0,5 mm-es és 210 °C-os fűvókával sikeresen 3D terméket állítottak elő. Már ezzel a mennyiségű faliszttal is elérhető volt a nyomtatott termék fa hatásúvá tétele. A SEM vizsgálat során egyértelműen megállapítható volt, hogy habár a faliszt szépen beágyazódik a PLA-ba, egyértelmű hézag fedezhető fel a két anyag között, ami a gyenge határfelületi kötés eredménye (2. ábra). Ezt a

hidrofil faliszt és hidrofób PLA közötti gyenge kapcsolattal magyarázták. Az átmeneti üvegesedési hőmérséklet értéke csökkent, aminek oka az előzőekben említett gyenge kapcsolat. A kutatás során megállapították, hogy a rugalmassági modulus a faliszt adagolásával nőtt.



2. ábra Yubo Tao és társainak SEM vizsgálat eredménye [17]

Mirko Kariz és társai [18] a kutatásuk során PLA-hoz (NatureWorks Ingeo 2003D) adagoltak bükk falisztet 0, 10, 20, 30, 40, illetve 50 tömegszázalékban. A kompaundáláshoz ebben az esetben is egycsigás extrudert alkalmaztak. A gyártás során jelentős átmérőingadozást tapasztaltak. A nyomtatáshoz 0,4 mm-es 230 °C-os fűvókát használtak. A kutatómunka során megállapították, hogy a faliszt tömegszázalékának növekedésével a nyomtatott termék sűrűsége csökken. Emellett nagyobb fatöltésű filament használatakor a fűvóka eltömődését tapasztalták, aminek hatására a termék kitöltöttsége nem volt teljes. Egyes 3D nyomtatott termékeken megfigyelhető volt pár sötétebb pont, aminek oka az eltömődés és szabálytalan áramlás a fűvókán belül. A tanulmányuk során azt tapasztalták, hogy az átmeneti üvegesedési hőmérséklet nem változott jelentősen; 65-66 °C között mozgott. Habár a szakítószilárdság 10 m% faliszt alkalmazása mellett növekedést mutatott, nagyobb töltöttség esetén drasztikus csökkenés volt tapasztalható. Ebből arra a következtetésre jutottak, hogy amíg kis tömegszázalék faliszt erősítőanyagként működik, addig nagyobb mennyiség esetén már nem tudja a polimer beágyazni az adalékanyagot, ami a szilárdságcsökkenést eredményezi.

Hiral H. Parikh és társai [19] szintén politejsavhoz társítottak 22 tömegszázalék falisztet, majd ebből állítottak elő 3D próbatesteket, amiket hajlítóvizsgálattal teszteltek. Az eredmények alapján megállapították, hogy a maximális feszültség és a rugalmassági modulus is csökkent. A feszültségcsökkenés okát az anyag porózusságában találták, ami hatással van a két anyag közti határfelületi adhézióra. A kompozit rugalmasabbá válásának okát a falisztben található cellulózsálakra vezették vissza.

Adam M. Pringle és társai [20] több különböző bútorgyártó cégtől származó falisztet alkalmaztak a kutatás során. Első lépésként szétválasztották a makro-, mezo- és mikroméretű falisztet, és csak a 80  $\mu\text{m}$  körüli szemcséket használták fel, és kompaundálták PLA-val (NatureWorks Ingeo 4043D) 10, 20, 30, illetve 40 tömegszázalékban. A gyártás során tapasztalható volt, hogy 20 m% felett a faliszt nem ágyazódott be teljesen a mátrixanyagba. Hosszabb keverési idő alkalmazásával a beágyazás mértéke javítható volt. A nyomtatószal gyártás során a különböző faliszttartalom hatására kis mértékű változás figyelhető meg az anyag reológiai tulajdonságaiban. Amellett, hogy adalékanyag növelésével egyre jobb fa-hatás volt tapasztalható, a tekerceselés során megfigyelhető volt a nyomtatószal merevségének a növekedése. A gyártott nyomtatószalak kis átmérőingadozásúak voltak ( $\pm 0,10$  mm). A nyomtatás során megfigyeltek apró, „sistergő” hangot, amely arra engedett következtetni, hogy a nyomtatószal jelentős nedvességtartalommal rendelkezett nyomtatás során, ezért ajánlott alacsony páratartalmú környezetben tárolni. A beágyazódás és nyomtathatóság szempontjából legjobbnak bizonyuló összetétel a 30 m% faliszttartalommal rendelkező kompozit volt.

## 2.5. Kereskedelmi forgalomban lévő faliszt töltésű filamentek

A kísérleti munkám megkezdése előtt fontosnak bizonyult a piacon forgalomban lévő fa töltésű nyomtatószalak felkutatása. A kutatás során nagy hangsúlyt fektettem arra, hogy a forgalomba helyezett fa töltésű filamentek milyen arányban tartalmazzanak falisztet, ezzel kiindulópontot adva a gyártáshoz. A gyártók közül hármat emeltem ki, akik a vásárlók értékelései alapján jó támpontok lehetnek.

Első gyártó a Kaliforniában lévő Sunlu [21] volt, akik a honlapon a PLA fa anyagú nyomtatószalnál a fa arányát 15-20% jelölték. Emellett kiemelték, hogy a filament anyagába porított fa van keverve, nem csak színezékekkel érik el a nyomtatószal fa hatású színét. A Szlovéniában található Azurefilm [22] nevű gyártó 40% valódi fát adagol a PLA mátrixú nyomtatószalhoz. Emellett 3, fafajta szerint válogatott (fenyő, bambusz, parafa) fa nyomtatószalát forgalmaz. Harmadik gyártóként a Svédországi Primaselectet [23] választottam példaként, akik szintén 35-40% farosttartalmú PLA mátrixú nyomtatószalát készítenek.

Fontos megemlíteni, hogy egyik gyártó sem jelölte egyértelműen, hogy a százalékos értéket tömeg- vagy térfogatszázalékban kell értelmezni, aminek oka a titkosítás mellett a marketing is lehet. Habár a falisztnek a térfogatszázalékát nem lehet pontosan lemérni, egyértelműen elmondható, hogy por esetében ugyanaz a mennyiség térfogatszázalékban becsülve nagyobbak tűnhet, mint tömegszázalékban.

## 2.6. Célkitűzés, szakirodalmi kritika

A kutatásom célja a politejsav 3D nyomtathatóságának vizsgálata faliszt töltés hatására. Cél egy olyan összetétel megtalálása, amely további fejlesztések után nem csak a hobbi szintű felhasználásra, hanem a faipari alkalmazásra is elfogadható legyen, ezzel kiterjesztve a 3D nyomtatási technológiát új iparágakra is. Emellett további cél a biokompozitok népszerűsítése. Fontos üzenete még a kutatásnak a hulladékfelhasználás lehetősége, ugyanis a jelenleg felhasználatlan faliszt alkalmazásával mérsékelhető ebben az iparágban keletkező hulladékmennyiség, és megelőzhető az esetleges hulladékégetéssel járó légszennyezés.

Korábbi kutatások elemzése során feltűnt, hogy annak ellenére, hogy a fa tulajdonságai függenek a fafajtól, a legtöbb esetben (4-ből 3 kutatás esetében) nincs információ a felhasznált faliszt fafajtaját illetően. Emellett szintén nincs adat a faliszt szemcseméretével (szintén 4-ből 3 kutatás esetében) és szárításával kapcsolatban. Hiral H. Parikh és társai [19] kutatása során a felhasznált politejsav típusa sem derül ki a dokumentációból. Fontos megemlíteni, hogy kettő kutatás során is egycsigás extrudert alkalmaznak annak ellenére, hogy ezzel a technológiával nem érhető el homogén kompaund. Yubo Tao és társai [17] a határfelületi kapcsolat vizsgálatokor a PLA hidrofób tulajdonságára hivatkoztak annak ellenére, hogy a PLA a hidrofíli anyagok csoportjába tartozik.



### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben az általam felhasznált alapanyagokat, gépeket és vizsgálati módszereket ismertetem.

#### 3.1. Felhasznált alapanyagok

A kutatásom során az alábbi két anyag került felhasználásra.

##### 3.1.1. Politejsav

Alapanyagként a NaturWorks Ingeo 4060D biopolimert alkalmaztam. Ez az amorf anyag 12,0% D-laktid tartalommal rendelkezik. Alkalmazása előtt 45°C-on 4 órán át szárítani szükséges. Az ajánlott nedvességtartalma a degradáció elkerülése érdekében maximum 0,025%. Az 1. táblázatban a felhasznált alapanyag ajánlott feldolgozási paraméterei láthatók [24].

Megnevezés	Érték	Mértékegység
Garathőmérséklet	45	°C
Behúzó szakasz	180	°C
Kompressziós szakasz	190	°C
Homogenizáló szakasz	200	°C
Adapterhőmérséklet	200	°C
Szerszámhőmérséklet	190	°C
Csiga forgási sebesség	20-100	1/perc

*1. táblázat NaturWorks Ingeo 4060D ajánlott feldolgozási paraméterei*

##### 3.1.2. Faliszt

A felhasznált falisztet, amely többnyire fenyő és bükk feldolgozása során keletkezett, a Markó Faipari Kft. biztosította számomra [25] (3. ábra). A gyártásuk során keletkezett vegyes csiszolatporból küldtek el mintát, amelynek összetétele, szemcsemérete ismeretlen volt, ezáltal valóban, az iparban keletkezett hulladékot használtam fel a kutatás során.



3. ábra Faliszt

### 3.2. Alkalmazott berendezések

A következő pontokban a TDK dolgozatomban használt alkalmazott gépeket, berendezéseket és azok fontosabb jellemzőit ismertetem.

#### 3.2.1. Szárítás és nedvességtartalom meghatározás

Mivel az alkalmazott alapanyag, a NatureWorks Ingeo 4060D, (amelyet a továbbiakban 4060D-ként fogok rövidíteni) egy hidrophil anyag, így hajlamos a nedvességfelvételre, ami lágyító hatással van a mechanikai tulajdonságokra, tehát csökkenti a szilárdságot, a merevséget és az átmeneti üvegesedési hőmérsékletet, illetve növeli a szakadási nyúlást. Ebből kifolyólag szükséges az alapanyag szárítása, az előírt 45 °C-on 4 órán át, ezzel elkerülve a hidrolízist [24]. A szárításhoz Baxter Dn-63 típusú szárítószekrényt alkalmaztam.

A felhasznált töltőanyag, a faliszt is érzékeny a nedvességfelvételre, így alkalmazása előtt 45 °C-on 4 órán át KDCL típusú szárítószekrényben szárítottam.

A legyártott nyomtatószalakat a felhasználás előtt szintén 45 °C-on 2 órán át szárítottam a korábban említett Baxter Dn-63 típusú szárítószekrényben.

A faliszt nedvességtartalmának meghatározásához Aquatrac-3E típusú nedvességtartalom mérő berendezést alkalmaztam.

Az átmeneti üvegesedési hőmérséklet meghatározásához DSC Q2000 típusú berendezést alkalmaztam. A vizsgálati hőmérséklettartomány 25-230 °C volt. A vizsgálat fűt-hűt-fűt ciklusban és PLA program szerint történt.

### 3.2.2. Kompaundálás és nyomtatószal gyártás

A 4060D és a faliszt különböző arányokban való kompaundálásához Labtech Scientific LTE 26-44 típusú ikercsigás extrudert alkalmaztam, amelynek L/D aránya 44, a csiga átmérője 26 mm. Az összekevert alapanyag és a faliszt 5, 10, 15, illetve 20 tömegszázalékos adagolása, szárazkeverék formájában, kézi adagolással történt. A csiga fordulatszáma 60 1/perc volt. A 2. táblázat a feldolgozás során alkalmazott hőmérsékletprofil adatai találhatóak. A szerszám hőmérséklete 190 °C volt.

Zóna	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Hőmérséklet [°C]	190	190	185	185	180	180	175	175	170	170

2. táblázat ábra Ikercsigás extruder hőmérsékletprofilja (10: szerszám)

A kompaundálást követően a legyártott zsinórt az LZ-120/VS típusú granuláló berendezéssel aprítottam fel (4. ábra).



4. ábra Granulálógép

A gép beállított előtolási sebessége 45 m/perc, a granulátum beállított hossza 2,5 mm volt. A berendezés a granuláláskor a beállítottnál hosszabb granulátumokat is vágott, így ezeket a felhasználás előtt szét kellett válogatni és eltávolítani.

A nyomtatószálakat a 3Devo Precision 450 típusú berendezéssel gyártottam le (5. ábra).



5. ábra Nyomtatószálgyártó berendezés

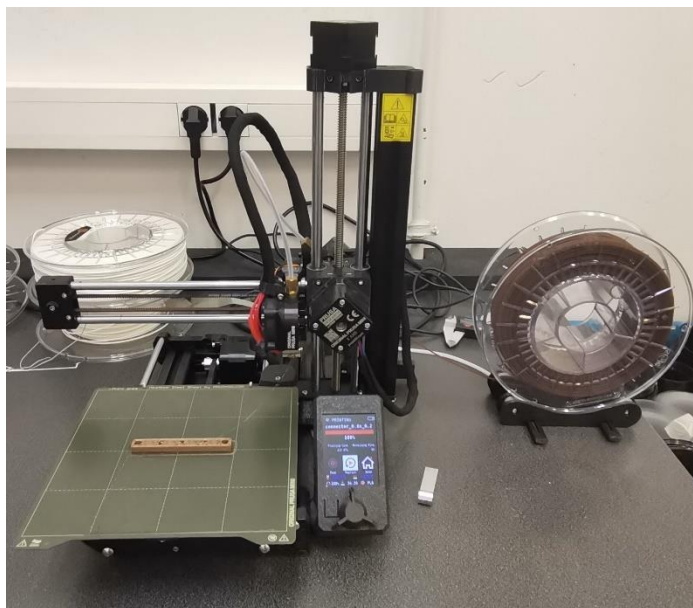
Mivel a 4060D-hez javasolt hőmérsékletprofil használatakor a garatnál összeragadtak a granulátumszemek, így az ott lévő hőmérsékletet alacsonyabbra állítottam. Emellett az utolsó zóna hőmérsékletének kisebbre állításával csökkenteni lehetett az átmérőingadozást, mivel a nyomtatószál így kevésbé viszkózusan került elhúzásra és tekerceslésre. A módosított hőmérsékletprofil adatait a 3. táblázat tartalmazza. A csiga beállított fordulatszáma 3,5 1/perc. A kívánt átmérőméret 1,75 mm.

Zóna	4	3	2	1
Hőmérséklet [°C]	170	195	190	170

3. táblázat Nyomtatószálgyártó berendezés hőmérsékletprofilja

### 3.2.3. Termékgyártás

A 3D termékek nyomtatásához Original Prusa Mini+ típusú 3D nyomtatót használtam (6. ábra).



6. ábra Original Prusa Mini+

A fűvóka hőmérséklete 220 °C, az asztal hőmérséklete 60 °C volt a nyomtatás során. A réteg magassága, köztük az első rétege is 0,2 mm volt. Kerületek száma 3 volt. A felső héj 1,2 mm vastag a 0,2 mm rétegmagassághoz, amelynek minimális vastagsága 1,2 mm. Az alsó héj 0,8 mm vastag a 0,2 mm rétegmagassághoz. A nyomtatószal beállított átmérője 1,75 mm. A fűvóka átmérője 0,8 mm.

Az elkészített granulátumból az Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 típusú gép segítségével fröccsöntött hajlító próbatestet, illetve lapkát is gyártottam. A berendezés záróereje 400 kN, oszloptávolsága 270 mm. A csiga átmérője 30 mm. A gyártás során alkalmazott hőmérsékletprofil a 4. táblázat tartalmazza. A szerszám beállított hőmérséklete 25 °C.

Zóna	5	4	3	2	1	Etetőgarat
Hőmérséklet [°C]	200	200	195	190	185	40

4. táblázat Fröccsöntés hőmérsékletprofilja

Az utónyomás beállításait a 5. táblázat szemlélteti.

Zóna	1	2	3
Térfogatáram [cm <sup>3</sup> /s]	20,0	20,0	20,0
Nyomás [bar]	400	400	100
Idő [s]	0,10	20,00	0,10

5. táblázat Utónyomás beállításai

A befröccsöntéshez tartozó beállítások értékeit az 6. táblázat tartalmazza.

Megnevezés	Érték lapka gyártásakor	Érték hajlító próbatest gyártásakor
Késleltetési idő [s]	0,00	0,00
Adagolási térfogat [cm <sup>3</sup> ]	45,000	45,000
Térfogatáram [cm <sup>3</sup> /s]	44,0	44,0
Nyomás [bar]	1500	1500
Térfogat [cm <sup>3</sup> ]	17,00	8,00

6. táblázat Befröccsöntés adatai

Az adagolás, dekompreszió és a hűtés adatai a 7. táblázatban foglaltam össze.

Megnevezés	Érték
Maradék hűtési idő [s]	60,00
Adagolási sebesség [m/min]	25,0
Adagolási nyomás [bar]	40
Adagolási térfogat [cm <sup>3</sup> ]	45,000
Dekompreszió térfogatárama [cm <sup>3</sup> /s]	5,0
Dekompreszió térfogata [cm <sup>3</sup> ]	5,000

7. táblázat Adagolás, dekompreszió és a hűtés értékei

#### 3.2.4. Anyagszerkezeti vizsgálatok

A szakítóvizsgálathoz Zwick Z005 típusú univerzális szakítógépet alkalmaztam ék formájú befogófejjel (7. ábra).



a)

b)

7. ábra Univerzális szakítógép (a) és ék formájú befogófej (b)

A méréshez 5B típusú szakító próbatesteket használtam. A mérési körülményeket és a mérés során alkalmazott paramétereket a 8. táblázat foglalja össze.

Paraméter	Érték
Páratartalom [%]	58,5
Hőmérséklet [°C]	25,7
Befogási hossz [mm]	45
Húzási sebesség [mm/perc]	5

8. táblázat A szakítóvizsgálat mérési körülménye és paraméterei

A hajlítóvizsgálat Zwick Z020 típusú univerzális szakítógéppel történt hárompontos hajlító feltétellel. A mérési körülményeket és a mérés során alkalmazott paramétereket a 9. táblázat foglalja össze.

Paraméter	Érték
Próbatest hossza [mm]	182
Próbatest szélessége [mm]	10
Próbatest vastagsága [mm]	4
Páratartalom [%]	43,9
Hőmérséklet [°C]	23,9
Alátámasztási távolság [mm]	64

Terhelés sebessége [mm/perc]	5
------------------------------	---

9. táblázat A szakítóvizsgálat mérési körülménye és paraméterei

A faliszt és PLA közti adhézió vizsgálatához az elkészült nyomtatószálból levágott hosszabb szálaból folyékony nitrogén alkalmazásával kriogénis töretet készítettem, majd JEOL JEM1010 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal megvizsgáltam a töretfelületet.

A sűrűségméréshez Radwag PS200/2000.R1 típusú mérleget használtam.

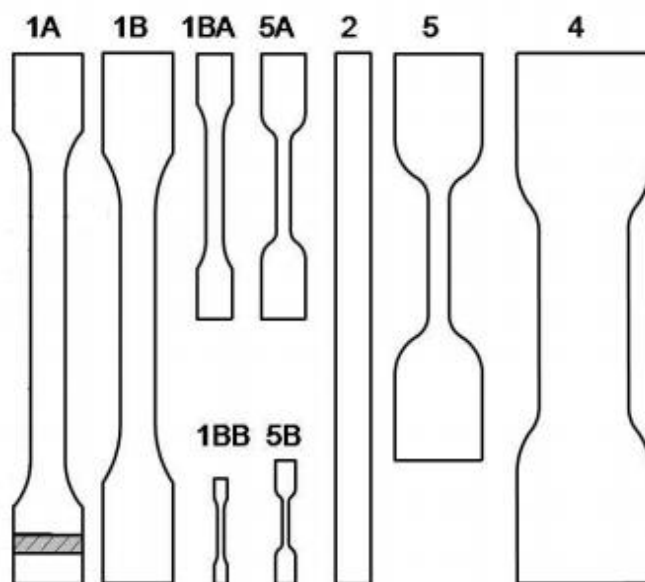
Mivel a faliszt szemcseméretéről nem állt rendelkezésre információ, így annak meghatározásához Keyence IM-7020 típusú mérőprojektort alkalmaztam

### 3.3. Vizsgálati módszerek

Az előállított nyomtatószálabból 3D próbatesteket nyomtattam, majd azokat különböző vizsgálati módszerek segítségével értékeltem. Így megfigyelhető, hogy milyen változásokat okoz az anyag mechanikai tulajdonságaiban a falisztatalom növelése.

#### 3.3.1. Szakítóvizsgálat

A vizsgálat előírásait az MSZ EN ISO 527-es szabvány tartalmazza. A vizsgálandó próbatest geometriája és mérete szintén szabványosítva van (8. ábra).



8. ábra Szabványos szakító próbatestek



A próbatest két vége a szabvány szerint előírt távolságra kerül megfogásra, és egytengelyű húzó igénybevétel terheli azt. A mérés a próbatest elszakadásáig, vagy bizonyos százaléku erő visszaeséséig tart.

A polimer próbatestek jellemzően piskóta alakúak. Ennek célja a befogásnál történő szakadás elkerülése. A mérés során az erő és az elmozdulás értékeit monitoroztam. Kutatómunkám során az erőt erőmérő cellával, az elmozdulást a befogópofák elmozdulásából mértem. Utóbbi mérésére pontosabb eredményt ad, ha a próbatestre adott távolságra két vízszintes csíkot rajzolunk, majd annak változását vizsgáljuk meg, vagy ha nyúlásmérő bélyeget alkalmazunk. A mért adatok ábrázolásával megkapható az erő- elmozdulás görbe, amelyről leolvashatjuk a maximális feszültséget és a húzószilárdságot. Amennyiben az anyag ridegen törik, abban az esetben ez adja meg a próbatest szakítószilárdságát is, ami a szakadás előtti pillanatban lévő húzófeszültség. A korábban említett feszültségértékekhez különböző nyúlást kifejező mennyiségek vannak: húzószilárdsági, illetve szakadási nyúlás. A görbe meredekségéből meghatározható a vizsgált anyag rugalmassági modulusa, amelyet polimerek jellemzése esetében a húr modulust használják. Ennek számítását az (1) képlet mutatja meg.

$$E_h = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

ahol  $E_h$  a húrmodulus [MPa],  $\sigma$  a próbatestben keletkező feszültség [MPa] és  $\varepsilon$  a nyúlás [-]. A próbatestben keletkező feszültség kiszámítási módját a (2) képlet adja meg.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

ahol  $\sigma$  a próbatestben keletkező feszültség [MPa],  $F$  a mért erő [N],  $A_0$  a kiindulási keresztmetszet [mm<sup>2</sup>].

A nyúlás értékének kiszámítási módját a (3) képlet szemlélteti.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3)$$

ahol  $\varepsilon$  a nyúlás [-],  $L$  a próbatest aktuális hossza [mm] és  $L_0$  a próbatest kezdeti hossza [mm].

Mivel méréseim során ék formájú befogófejet alkalmaztam, amely esetében a szakítógörbe első, lineáris szakasza nem ad valós eredményeket, így a vizsgálat kiértékelése során az 1 és 2 milliméteres megnyúlás közti görbemeredekséget használtam. Amennyiben a szakadási nyúlási értékek nagyok, akkor az anyag szívósan viselkedik. Ellenkező esetben rideg viselkedés jellemzi az anyagot.

A mérés elvégzésekor fontos a szakítási sebesség helyes megválasztása, ugyanis túl nagy érték esetén rideg, merev viselkedésű lesz a vizsgált polimer, ugyanakkor a szilárdsága nagyobb értékű lesz. A szakítóvizsgálat során fontos feljegyezni a környezet hőmérsékletét és páratartalmát, ugyanis ezek is hatással vannak a mérés eredményeire. Nagyobb hőmérséklet és nedvességtartalom mellett lágyulás jellemző a polimerekre.

Mivel nyomtatott próbatesteket használtam, amelyeket porózusság jellemez, így szükséges volt a mérési eredményeket fajlagosítani, mivel a korábbi számítások során a keresztmetszetet tömörnek vettem. Fajlagosítás esetében a kapott értékeket a sűrűségmérés során kapott eredményekkel osztottam el. A (4) egyenlet ennek a kiszámítási módját mutatja be feszültség esetében.

$$\sigma_{fajl} = \frac{\sigma_{elm}}{\rho} \quad (4)$$

ahol  $\sigma_{fajl}$  a fajlagosított feszültség értéke [MPa],  $\sigma_{elm}$  az elméleti feszültség értéke [MPa],  $\rho$  a sűrűség [ $\frac{g}{cm^3}$ ].

### 3.3.2. Hárompontos hajlítóvizsgálat

A hajlítóvizsgálat menete és a próbatest geometriája szintén szabványosítva van. A mérés során a próbatest két vége meg van támasztva, és a próbatest közepét meghatározott sebességgel nyomó igénybevétel terheli. A vizsgálat során az erő és a lehajlás kerül detektálásra, amely ábrázolásával megkapjuk a mérési görbét. Hárompontos hajlító vizsgálat esetében a mérési görbe kiértékelése során megkapjuk a jellemző szilárdságot és a hajlító rugalmassági modulus.

A mérés során fontos a mérési körülmények, azaz a hőmérséklet és a nedvességtartalom felírása, ugyanis, mint a szakítóvizsgálat esetében, itt is befolyásolja az eredményeket ezeknek az értéke.

Mivel a polimereket, mint viszkoelasztikus anyagokat, kis rugalmassági modulus jellemzi, fontos figyelembe venni, hogy a túl nagy lehajlás esetén a szokásos számítási képletek nem érvényesek. Éppen ezért a mérés során a lehajlást az alátámasztási távolság 10%-áig mérjük, amelyet határlehajlásnak nevezünk, amelynek kiszámítását a (5) képlet szemlélteti.

$$f^* = L \cdot 0,1 \quad (5)$$

ahol  $f^*$  a határlehajlás [mm],  $L$  az alátámasztási távolság [mm].

Amennyiben ez az érték előtt eltörik az anyag, úgy a töréshez tartozó erőnek az értékét használjuk fel a számítások során. Ekkor kiszámítható a hajlítószilárdság a (6) képlet szerint.

$$\sigma_{bh} = \frac{3 \cdot F_t \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (6)$$

ahol  $\sigma_{bh}$  a hajlítószilárdság [MPa],  $F_t$  a töréshez tartozó erő [N],  $L$  az alátámasztási távolság [mm],  $b$  a próbatest szélessége [mm],  $h$  a próbatest vastagsága [mm].

Abban az esetben, ha nem törik el a határlehajlás előtt a próbatest, úgy a (7) képlet alapján megkapható a határhajlító feszültség értéke.

$$\sigma_h = \frac{3 \cdot F_h \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (7)$$

ahol  $\sigma_h$  a határhajlító feszültség [MPa],  $F_h$  a határlehajláshoz tartozó erő [N],  $L$  az alátámasztási távolság [mm],  $b$  a próbatest szélessége [mm],  $h$  a próbatest vastagsága [mm].

A kezdeti rugalmassági modulus meghatározásához használt egyenletet a (8) képlet mutatja be.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (8)$$

ahol  $E$  a rugalmassági modulus [MPa],  $\sigma_2$  és  $\sigma_1$  a szilárdság [MPa],  $\varepsilon_2$  és  $\varepsilon_1$  a megnyúlás [-].

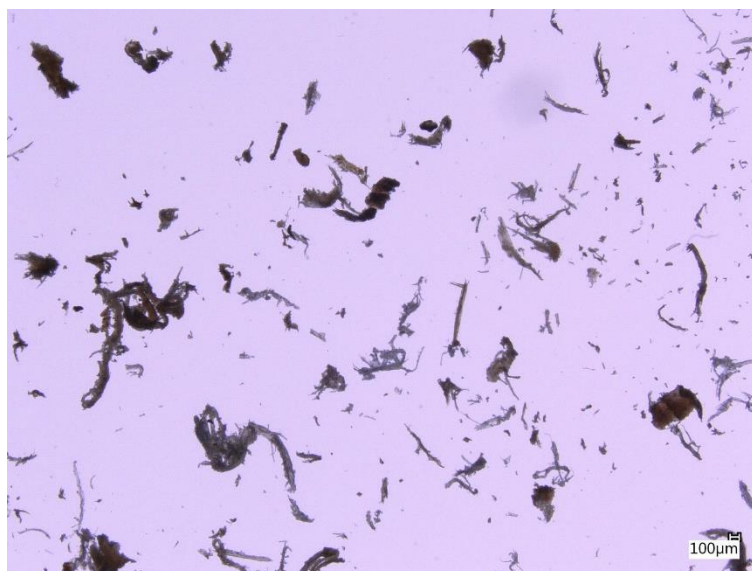
Szabványos mérés esetében a (8) képletben szereplő  $\varepsilon_2=0,0025$  és  $\varepsilon_1=0,0005$ .

#### 4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

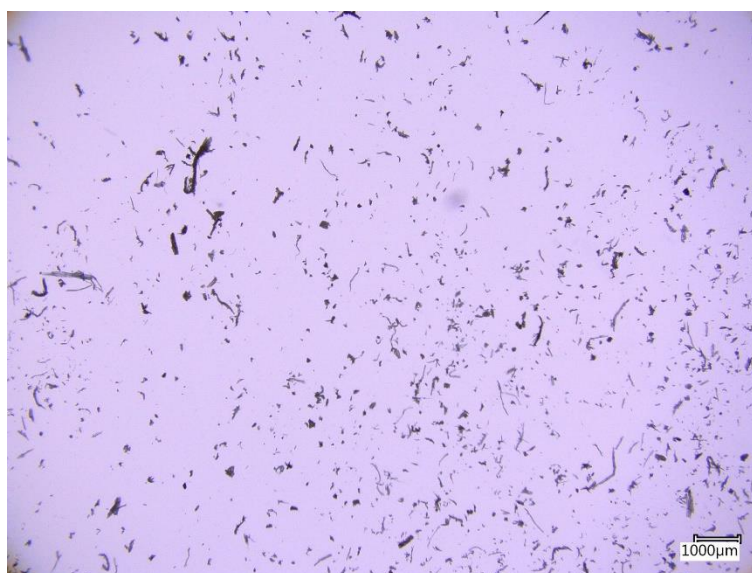
Ebben a fejezetben az általam elvégzett mérések eredményeit ismertetem.

##### 4.1. Faliszt szemcseméretének vizsgálata

A faliszt szemcseméretéről készült képeket a 9. és 10. ábra mutatja be.



*9. ábra Faliszt mikroszkópi kép*



*10. ábra Faliszt mikroszkópi kép 2*

A faliszt mikroszkópi képén jól látható, hogy a szemcsék egyenletlen alakúak, sok esetben még össze is vannak gabalyodva, így a szemcseméret meghatározásánál a legnagyobb átmérő értékét vettem szemcseméretnek (9. ábra). A képek és az eredmények alapján megállapítható, hogy a

felhasznált faliszt főként nagyon apró, maximum 100 µm nagyságú szemcsékből áll (10. ábra), viszont emellett található több jelentősebb méretű, 1000 µm feletti méretű szemcse is, amely az átlagos szemcseméretet értékét jelentősen felhúzza. Az elkészült 20 mérési pont adatai alapján az átlagos szemcseméret 78 µm, míg a legnagyobb szemcseméret 2086 µm, ami feltehetően több összeragadt, hosszabb lehántolt faliszt szemcse eredménye.

#### 4.2. Kompaundálás ikercsigás extruderrel

A megfelelő arányban előre összekevert 4060D és faliszt adagolása kézi adagolással történt. Ennél a megoldásnál tapasztalható volt, hogy a két anyag a különböző mérete és tömege miatt az adagolás során hajlamos volt szétválni; elsőként a nagyobb szemű PLA granulátumot, majd a falisztet sikerült adagolni. Ennek kompenzálására egyszerre csak kis mennyiséget adagoltam, ám nagyobb mennyiség gyártása esetén érdemesebb lehet más módszert pl. por és volumetrikus granulátum adagolókat alkalmazni. Az adagolás közben a garatnál keletkezett pára arra enged következtetni, hogy a 3.2.1 pontban említett szárítási körülmények nem voltak megfelelőek, vagy túl sokáig voltak a feldolgozás közben az alapanyagok a szabad levegőn. A keletkező pára miatt 15 és 20 m% faliszttartalom mellett jelentős beboltozódás volt tapasztalható. Annak érdekében, hogy a keletkező két szál (kétfuratos extruder szerszám) szét lehessen választani és ne tapadjanak össze, lassú elhúzást és hűtést kellett alkalmazni (11. ábra). Ezzel a módszerrel a 30 m% faliszttartalommal rendelkező kompozit gyártása nem volt lehetséges.



a)

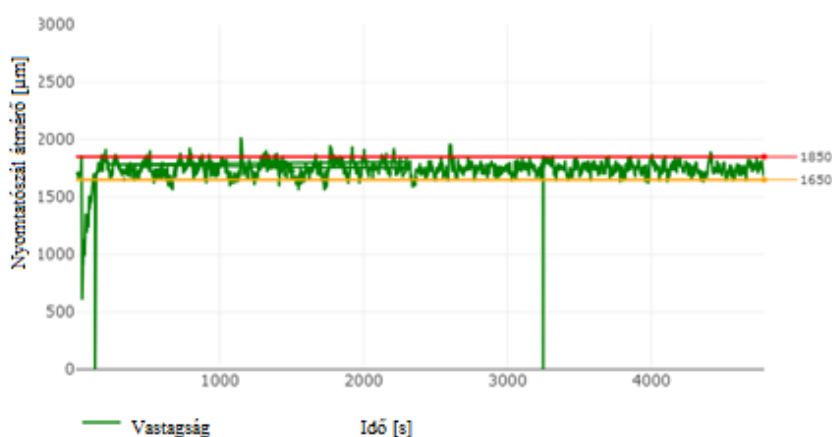


b)

11. ábra Kompaundált szálak összeragadt (a) illetve szétválasztott (b) esetben

### 4.3. Nyomtatószal gyártás

A 3.2.2. pontban leírt módosított hőmérsékletprofil alkalmazásával 5, 10, 15, illetve 20 tömegszázalékos esetben is sikeresen lehetett nyomtatószalakat gyártani anélkül, hogy tekerceselés közben eltörne az anyag. Annak érdekében, hogy ne ragadjanak össze a granulátumok súlya alatt a garatnál lévő szemek, egyszerre csak kisebb mennyiség került adagolásra. Habár jelentős átmérőingadozással járt a folyamat, a legyártott nyomtatószal így is felhasználható volt. Az átmérőingadozást szemlélteti a 12. ábra, amely a 15 m% falisztartalommal rendelkező PLA filament gyártása során mért átmérő értékeit mutatja be.



12. ábra 15 m% falisztet tartalmazó PLA nyomtatószal átmérőingadozása

Az ábrán előforduló 0 µm vastagságúnak „mért” átmérő a gép hibájából adódik, mérési hibaként nem vettem figyelembe a minimális átmérő megállapításkor. Emellett a kezdeti szakaszt, amelynek értéke bőven a megengedett alatt van, szintén nem vettem figyelembe, ugyanis az a gép tisztításakor előállított átmérő értékeit detektálta, ami nem került tekerceselésre.

Ennél a tömegszázaléknál a legnagyobb átmérő értéke 2020 µm, míg a legkisebbé 1436 µm volt. A nyomtatás során használt 0,8 mm-es fúvóka körülbelül 1,9 mm-es átmérőig képes akadás nélkül nyomtatni, tehát a nyomtatószalgyártás során keletkezett olyan szakasz is, amelyet nem lehet felhasználni. Emellett a kisebb átmérőket ugyan felhasználja a nyomtató, de hiányos nyomtatást és próbatestet eredményez.

#### 4.4. 3D nyomtatás

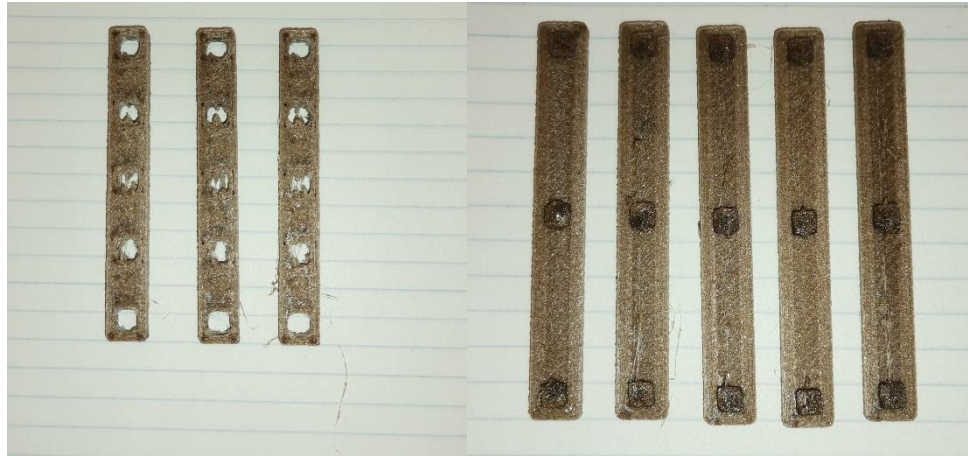
A legyártott nyomtatószákkal a 3.2.2 pontban leírt paraméterekkel sikeresen lehetett nyomtatni, a nyomtatószálok nem törtek el adagolás közben sem (13. ábra). A korábban is említett átmérőingadozások miatt néhány próbatest gyártása nem volt sikeres, ugyanis nyomtatás közben a nagyobb átmérőjű nyomtatószál beragadt a nyomtatófejbe és eltömítette azt. Habár a 4.3 pontban említett, nyomtatószálgyártás során alkalmazott módosított hőmérsékletprofil javított az eredményeken, a probléma nem szűnt meg teljes mértékben.



*13. ábra Nyomtatott próbatest*

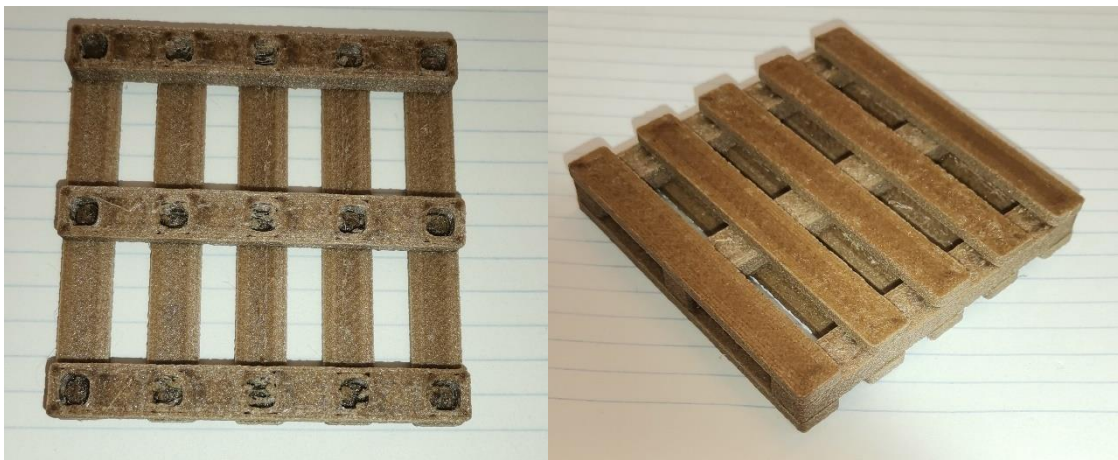
A 13. ábraán látható nyomtatott próbatesten, amelyhez a 10 m% falisztartalommal rendelkező nyomtatószálat használtam, észrevehető, hogy egy réteg nyomtatása során zavaró lehet az átmérőingadozások okozta anyaghiányosságok, amelyek nem csak esztétikailag rontanak a terméken, hanem a mechanikai tulajdonságokra is negatívan hat. Továbbá észrevehető, hogy a termék nyomtatása során előfordulhat a beégés is. Ennek elkerülése érdekében érdemes lehet 1,00 mm-es fűvókát alkalmazni. Így megakadályozható, hogy a nyomtatószál a szükségesnél több időt töltsön a felfűtött fűvókában, és ezáltal beégjen. Ugyanezeket az eredményeket kapták Mirko Kariz és társai [18] a kutatásuk során.

Az általam alkalmazott receptúrák színre, zsugorodásra és összeszerelhetőségre gyakorolt hatását is vizsgáltam kicsinyített raklap próbatestek alkalmazásával. (14. és 15. ábra) A 3D modellt a Printables [26] nevezetű oldalról töltöttem le. Keresésem során olyan modellre szűrtem a találatokat, amelyeket kimondottan fatöltésű polimer nyomtatószállhoz ajánlanak.



a)

b)



b)

d)

14. ábra Középső elemek (a), lécek (b), félkész összeszerelés (b), összeszerelt állapot (d)



15. ábra Nyomatott raklap próbatest színhatása (balról haladva növekvő falisztartalommal)

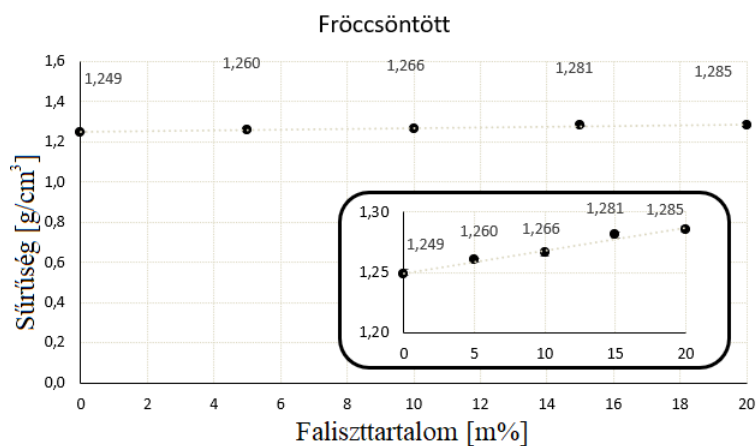
Összességében megállapítható, hogy 5, 10, 15 és 20 tömegszázalék faliszt alkalmazása esetében sem volt számottevő zsugorodás tapasztalható. Az összeszerelés nehézségét minden esetben a nyomtatás és a nyomtatószál pontatlansága adta, ennek ellenére összeszerelhető volt a



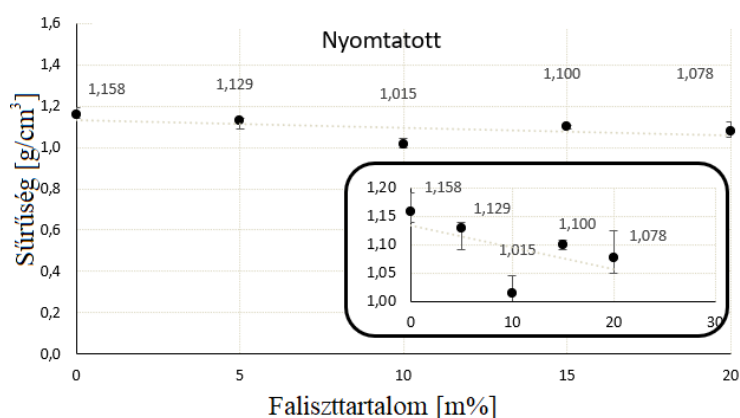
próbatétel. A 15. ábrán látható a nyomtatott próbatétek színének változása a növekvő faliszttartalom mellett. Érdekes tapasztalat, hogy a szín változása nem hozható összefüggésbe a faliszttartalom növekedésével; míg a legvilágosabb próbatéteket 10 tömegszázalék, addig a legsötétebb próbatéteket 15 tömegszázalék esetében tapasztalható.

#### 4.5. Sűrűségmérés

Habár a nyomtatás során a próbatétek nem azonos méretűek lettek, a sűrűség számításakor az elméleti térfogattal számoltam, ezzel kiküszöbölve, hogy a tolómérő használatával több hibát vigyek bele a mérésbe. A 16. ábrán jól látható, hogy a faliszt tartalom növelésével a nyomtatott és fröccsöntött próbatétek sűrűsége nem változik jelentősen.



a)



b)

16. ábra Sűrűségmérés eredménye fröccsöntött (a) és nyomtatott (b) próbatétnél

Az eredményeket közelebbről megvizsgálva észrevehető, hogy eltérő tendenciát mutat a két gyártási folyamat. Nyomtatás esetében kis mértékben, de csökken, míg fröccsöntés esetében

kis mértékben, de nő a sűrűség. Ugyanezt a tendenciát kapta Mirko Kariz és társai [18] a nyomtatott próbatestek vizsgálatakor. A nyomtatott és fröccsöntött próbatest sűrűségvizsgálatakor tapasztalható ellentétes tendencia oka a technológiában rejlik. Amíg nyomtatás esetén maga a technológia hozza a porózusságot, addig a fröccsöntés esetében a termékre ható nagy nyomás összepréseli a fát, és kipréseli a zárványokat. Nagyobb falisztartalom mellett jelentősebb a préselés hatása.

#### 4.6. Mechanikai tulajdonságok vizsgálata

A mechanikai tulajdonságok vizsgálatával különböző tendenciák állapíthatók meg a falisztartalom és a vizsgált tulajdonságok között, amelyek megfelelő értelmezése segít a termék továbbfejlesztési javaslatainak a megfogalmazásában.

##### 4.6.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat során elszakított próbatesteket a 17. és 18. ábra szemlélteti.



17. ábra Törött PLA próbatestek



a)

b)



c)

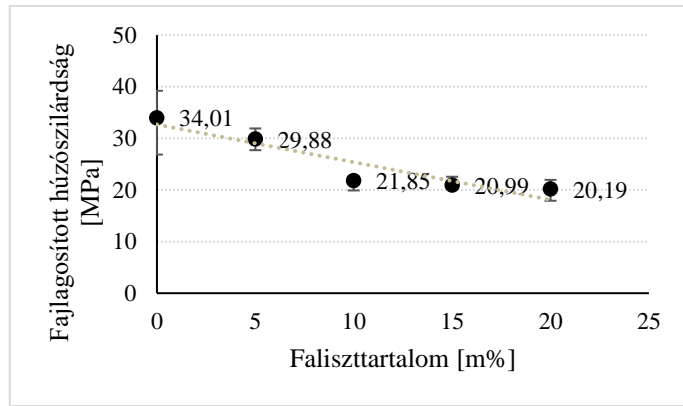
d)

18. ábra Vizsgált próbatestek 5 m% (a), 10 m% (b), 15 m% (c) és 20 m% (d) falisztartalom esetében

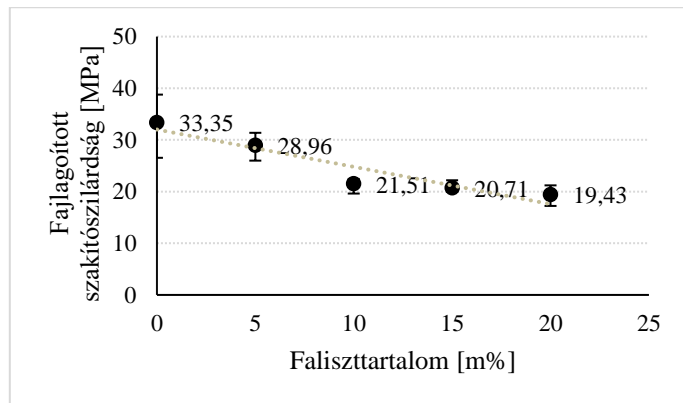
Az ábrákon megfigyelhető, hogy a próbatestek nem minden esetben ugyanazon a szakaszon törtek el, tehát az eredményeket nem nyomtatási hiba okozta.

A szakítóvizsgálatok esetében a mért értékeket minden esetben a sűrűséggel fajlagosítottam annak érdekében, hogy jól összehasonlíthatok legyenek az eredmények.

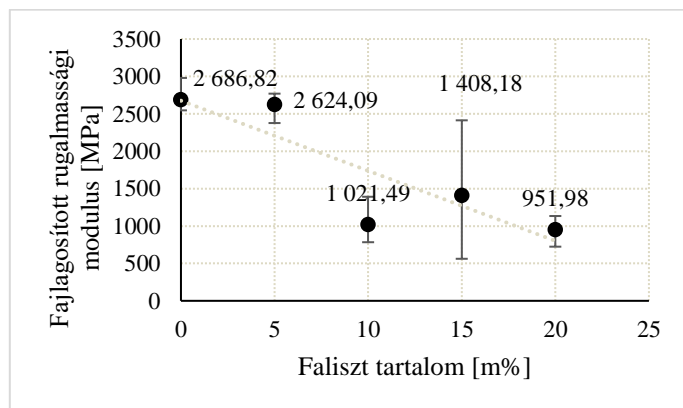
A 19. ábrán látható, hogy a húzószilárdság, a szakítószilárdság, és a rugalmassági modulus számottevően csökken a falisztartalom növelésével. Ez alapján levonható az a következtetés, hogy az anyag a falisztöltés hatására lágyult, ami ellentmond az elvárásainknak. Ennek oka a feldolgozás során anyagba kerülő nedvességben rejlik.



a)



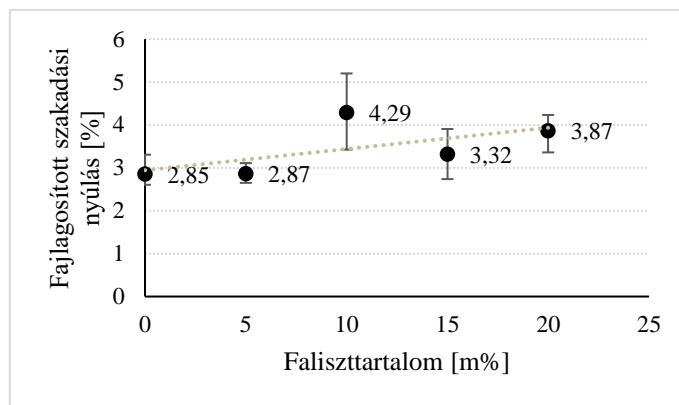
b)



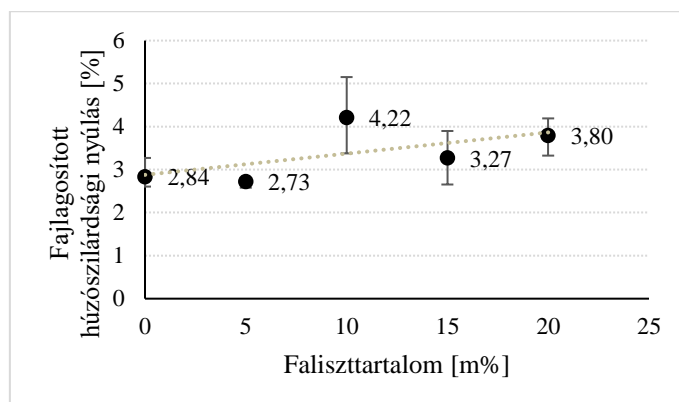
c)

19. ábra Húzószilárdság (a), szakítószilárdság (b) és rugalmassági modulus (c) fajlagosított értéke

A 20. ábrán megfigyelhető, hogy a faliszt mennyiségének a növelésével arányosan nő a szakadási nyúlás és a húzószilárdsági nyúlás, ami szintén az anyag nedvességtartalmára vezethető vissza.



a)



b)

20. ábra Szakadási nyúlás (a) és húzószilárdsági nyúlás (a) értéke fajlagosított esetben

#### 4.6.2. Hajlítóvizsgálat

A 21. és 22. ábrán a fröccsöntött és nyomtatott hajlító próbatetek láthatóak 0, 5, 10, 15 és 20 tömegszázalék falisztartalom mellett. Fontos megemlíteni, hogy a 4.5 pontban tárgyalt sűrűségvizsgálatot is ezekkel a próbatetekkel végeztem el.



21. ábra Fröccsöntött (balra) és nyomtatott (jobbra) PLA hajlító próbatetek



a)

b)

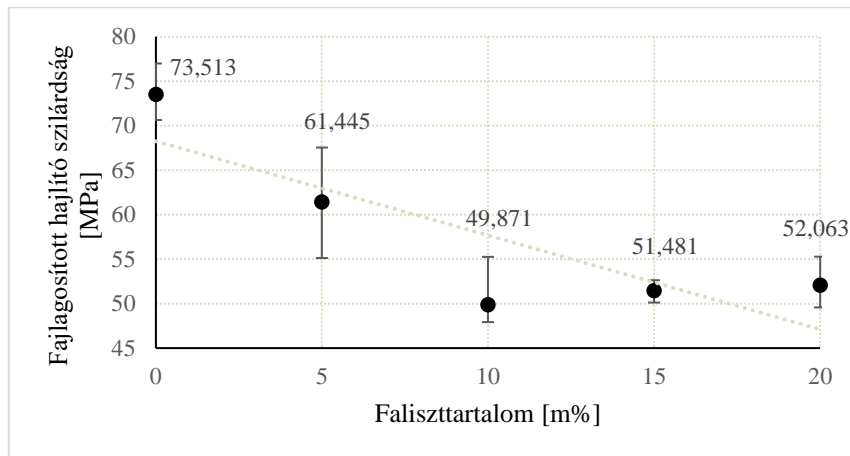


c)

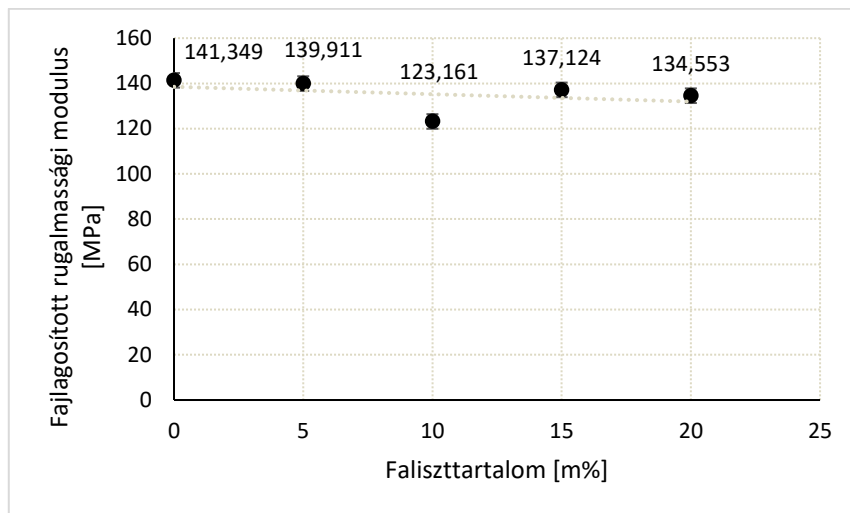
d)

22. ábra Fröccsöntött (balra) és nyomtatott (jobbra) PLA hajlító próbatestek 5 m% (a), 10 m% (b), 15 m% (c) és 20 m% (d) falisztartalom mellett

A szakítóvizsgálathoz hasonlóan, húzóvizsgálatok esetében is az összehasonlíthatóság érdekében a mért értékeket a sűrűséggel fajlagosítottam. A húzószilárdsági eredmények azt mutatják, hogy míg a hajlító szilárdság a falisztartalom növelésével drasztikusan csökken, addig a rugalmassági modulus értéke eleinte csökken, majd nő, majd ismét csökken (23. ábra). A szilárdságcsökkenést ebben az esetben is a nedvességtartalom befolyásolja.



a)

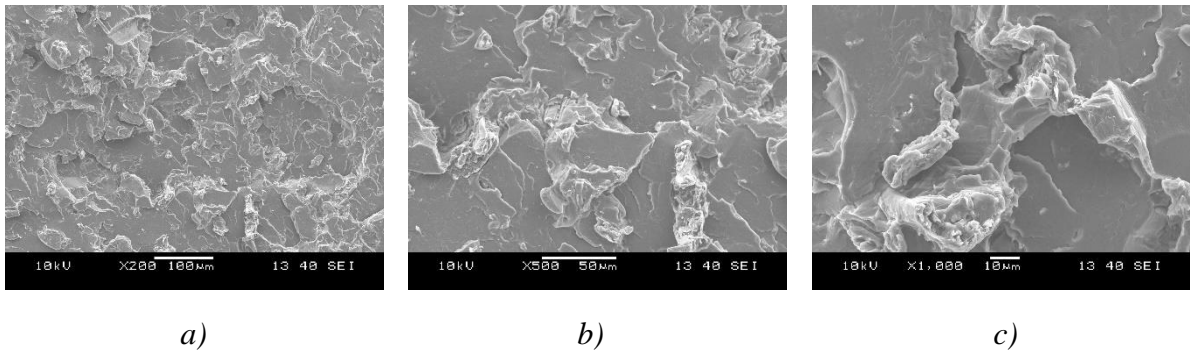


b)

23. ábra Hajlítószilárdság (a) és rugalmassági modulus (b) fajlagosított értékei

#### 4.6.3. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

Annak érdekében, hogy pontosabb képet kapjunk a PLA és faliszt kapcsolatáról, fontos megvizsgálni a két anyag közti adhéziót. A mérést 5, 10, 15, illetve 20 tömegszázalék faliszttartalom mellett is elvégeztem. A 24.ábrán 20 m% faliszt tartalommal rendelkező 4060D látható.

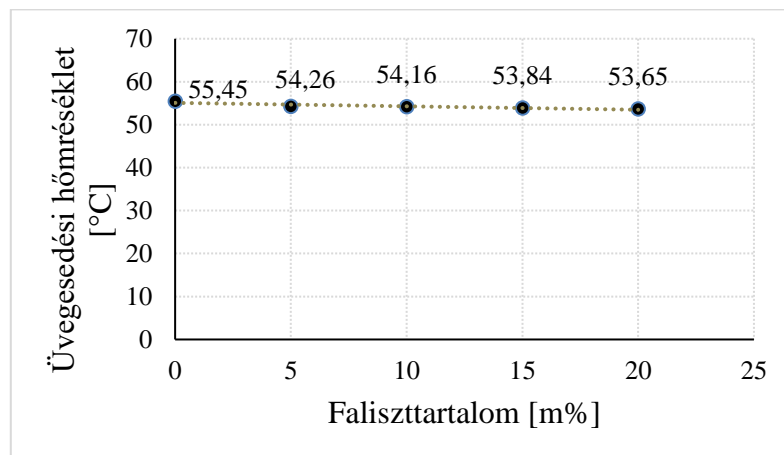


24. ábra Pásztázó elektronmikroszkópi képek 200x (a), 500x (b) és 1000x (c) nagyítás mellett

Habár Yubo Tao és társai [17] a kutatásuk során rossz adhéziót tapasztaltak a PLA 4032D és a faliszt között, azonban a 24.ábrán látható, hogy kutatásom során a faliszt kezelése nélkül is jó adhézió állapítható meg a PLA 4060D és a faliszt között, amelyben nagy szerepe van a nedvességtartalom megválasztásának is.

#### 4.7. Differenciális pásztázó kalorimetria

Érdekes mérést végezni az átmeneti üvegesedési hőmérséklet alakulásáról is, mivel ennek nagyfokú eltolódása jelentősen befolyásolja az anyag alkalmazhatóságát. Az átmeneti üvegesedési hőmérséklet értékeit a 25. ábra szemlélteti.



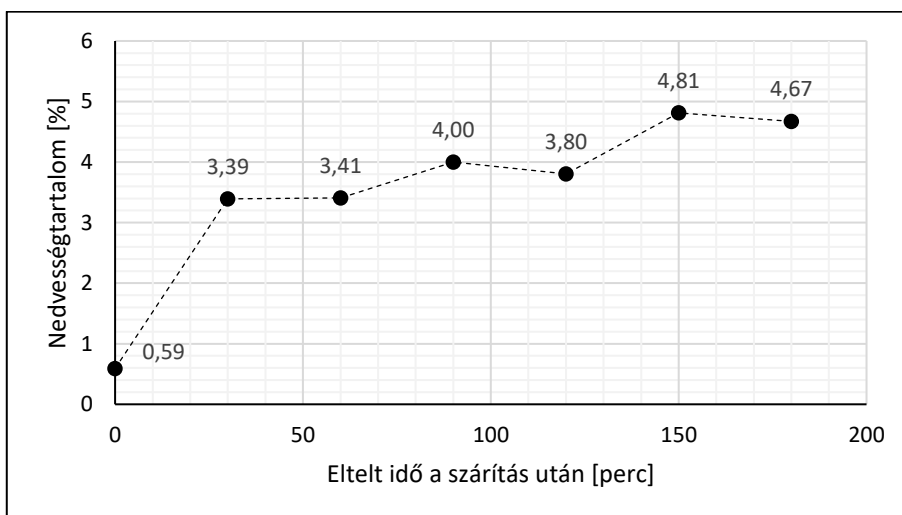
25. ábra Átmeneti üvegesedési hőmérséklet

Az elvárásokkal ellentétben itt is látható az eredményeken, hogy az átmeneti üvegesedési hőmérséklet a töltőanyag hatására kis mértékben, de csökkent, tehát lágyult az anyagunk. Ez szintén a megnövekedett nedvességtartalom miatt lehetséges.



#### 4.8. Nedvességtartalom mérése

Mivel a 4.6.1 és a 4.6.2 pontban leírt eredmények is azt mutatják, hogy a faliszt jelentős nedvességtartalommal rendelkező felhasználás során, így célszerű volt külön mérés során megvizsgálni a faliszt nedvességfelvevő mechanizmusának a sebességét. Mivel az eredmények egyértelműen tükrözik, hogy a 45 °C-on történő szárítás nem volt megfelelő, így a vizsgálatot 80 °C-os szárítás esetében végeztem el. A mérés során a környezeti hőmérséklet 20,7 °C, míg a páratartalom 55% volt. A mérési eredményeket a 26. ábra mutatja be.



26. ábra Faliszt nedvességtartalma a szárítást követően

Ez alapján megállapítható, hogy a feldolgozás során az anyagunk jelentős nedvességtartalommal rendelkezett. Az eredmények alapján szárítás után fél órával már számottevő nedvességfelvétel tapasztalható, ami megnehezíti az anyag gyártását.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS MEGOLDÁSRA VÁRÓ FELADATOK

Ebben a fejezetben a TDK munkámat tapasztalatait és következtetéseit foglalom össze magyar, illetve angol nyelven, majd a megoldásra váró feladatokat fogalmazom meg.

### 5.1. Összefoglalás

Kutatómunkám során PLA 4060D mátrixú 5, 10, 15 és 20 tömegszázalékban adagolt faliszt erősítésű kompaundot gyártottam. A gyártás során az adagolás és a faliszt nedvességfelvétele okoz nehézséget, amelyre a tapasztalataimból kiindulva fejlesztési javaslatokat tettem.

Az előállított kompaundból sikeresen lehetett nyomtatószálat előállítani, aminek során a gondot az inhomogenitásból fakadó átmérőingadozás jelentette. Ezt a kompaundálás módosításával minimalizálni lehet a jövőben.

A leggyártott filamentekkel minden vizsgált összetétellel sikeresen lehetett különféle próbatesteket gyártani. Habár a nyomtatószalak átmérőjének instabilitása miatt különböző hibák (hiányos kitöltés, beégés, ritkább esetben fűvókaeltömődés) voltak tapasztalhatóak, a leggyártott próbatestek használhatóak voltak. Esztétikailag a fa megjelenés dominál, ami a különböző design termékek gyártásakor különleges megjelenést biztosít a gyártott próbatestnek. A nyomtatott próbatestek szerelhetősége nem tökéletes, de használhatóak az elemek. A fejlesztési javaslatokkal az anyagnak ez a gyengesége is javítható.

A mechanikai vizsgálatokból egyértelműen meghatározható, hogy a kompozit gyengébb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a sima PLA. Ennek javítására célszerű lehet a kutatást más mátrixanyag esetében is elvégezni. Az eredményekből továbbá kimutatható, hogy az anyag a növekvő faliszt töltés hatására egyre jobban lágyul, amelynek oka a faliszt mennyiségével bevitt nedvességtartalomban rejlik.

Az optikai vizsgálatok során egyértelműen látható, hogy a korábbi kutatási eredményekkel ellentétben a kutatásom során felhasznált PLA 4060D és a faliszt között kiváló adhézió állapítható meg, amelynek titka a mátrixanyag és a nedvességtartalom megfelelő megválasztásában rejlik.

In my research, I have produced a wood-flour reinforced compound with PLA 4060D matrix in 5, 10, 15 and 20 wt%. During the production process, the feeding and the moisture absorption of the wood cause difficulties, for which I have made suggestions for improvement based on my experience.

The produced compound could be successfully used to produce printing filament, the problem being diameter variation due to inhomogeneity. This could be minimised in the future by modifying the compounding process.

With the produced filament, it was possible to successfully produce a variety of test specimens with all the compositions. Although various defects (incomplete filling, burn-in, and in rare cases nozzle clogging) were observed due to the instability of the filament diameter, the produced test specimens were usable. Aesthetically, the wooden appearance dominates, which gives a special appearance to the produced test specimens when manufacturing different design products. The assemblability of the printed elements is not perfect, but the elements are usable. This weakness of the material can also be improved with the development suggestions.

From the mechanical analyses, it can be clearly determined that the composite has poorer mechanical properties than pure PLA. To improve this, it may be useful to carry out the research for other matrix materials. Furthermore, the results show that the material softens more and more with increasing wood flour content, which is due to the amount of moisture introduced with the amount of wood flour.

The optical investigations clearly show that, contrary to previous research results, excellent adhesion between PLA D and wood flour can be observed, which is due to the choice of the right matrix material and moisture content.

## 5.2. Megoldásra váró feladatok

A kutatás végeztével egyértelművé váltak az anyag előnyei, hátrányai és a gyártás nehézségei. Ezekből a tapasztalatokból kiindulva a következő fejlesztési javaslatokat teszem:

- A vegyes csiszolatpor szemcseméretének változatossága több továbbfejlesztési lehetőséget rejt magában céltól függően. Amennyiben a mátrixanyag erősítése a cél, úgy a hosszabb szálak alkalmazása javasolt. Jelen esetben, amikor a nyomtathatóság fokozása a cél, az apró, gömb, illetve tojás formájú szemcsék alkalmazása javasolt. A faliszt tulajdonságaiból adódóan szitarázó alkalmazásával nem lehet hatékonyan

szétválasztani a csiszolatport szemcseméret alapján, így szükségserűvé válik más megoldás keresése. Egyik módszer egy köztes ciklonos előleválasztó alkalmazása, amelynek hatásfoka mellett ára is kedvező.

- Az eredmények során egyértelmű volt, hogy a faliszt szárítása nem volt megfelelő. Érdekes a faliszt nedvességtartalmának a vizsgálatát fél órára szűkíteni, és ezidő alatt a lehető legtöbb mérési pontot felvenni, ezzel pontosabb képet kapva a faliszt nedvességfelvétel mechanizmusáról. Ajánlott a szárítási hőmérsékletet felvinni 103 °C-ra, és még melegen adagolni az extruderbe. Célszerű olyan adagolást alkalmazni, amely során a faliszt kis felületen érintkezik a levegővel, ezáltal lelassítva a nedvességfelvételt. Amennyiben lehetőség van rá, javallott a környezet hozzáalakítása is, ami jelen esetben körülbelül 20-25% páratartalmat jelent. Fontos megemlíteni, hogy a gyártás során keletkező pára elősegíti a két anyag közti tapadást, így érdemes további kutatásokat végezni a gyártás során az anyagba bekerülő ideális nedvesség mennyiségét illetően.
- A kompaundálás során a keverék extruderben töltött ideje hatással van a két anyag közti tapadásra. A nagyobb mennyiségű termelés, illetve a megfelelő tapadás érdekében érdemes további kutatásokat folytatni az optimum megtalálása érdekében.
- A mérési eredmények során a 10 m% falisztartalommal rendelkező kompozit értéke szemmel láthatóan eltér a többi eredménytől. Ennek oka, hogy e tömegszázalék előtt a tejsav, utána a faliszt tulajdonságai dominálnak. Érdekes a továbbiakban kisebb felosztásokban, például 8 és 12 tömegszázalékos esetben megvizsgálni, hogy hogyan változnak a mért értékek.
- Belátható, hogy egyszeri kompaundálás során a granulátumok között nagy az inhomogenitás. További fejlesztési lehetőség van a granulátum újrakompaundálása általi homogenitás növelésére. Emellett a kétszeri kompaundálás lehetővé teszi a nagyobb tömegszázalékú faliszt adagolását.
- Javasolt a faliszt fafaj szerinti felhasználása is, aminek megvizsgálása után szélesebb skálában lehet lehetőség a tulajdonságok módosítására.
- A mátrixanyag módosításával szintén széleskörűen felhasználhatóvá válhat a termék.

## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Balogh B., Kovács P. Z., Szávai Sz.: Szimulációs eljárással támogatott 3D nyomtatás. Multidiszciplináris tudományok, 9. kötet, 4. szám, 535-547 (2019)
- [2] Rákosi Sára, Sebők István, Szalai Tamás, Vég Róbert László: A 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. Műszaki Katonai Közlöny, 33. évfolyam, 1. szám, 133-148 (2023)
- [3] Alpár Tibor, Csóka Levente, Németh Gábor: Faipari melléktermékek hasznosítása és a CO<sub>2</sub>-kibocsátás. In Magyar Asztalos és Faipar konferencia. Nyugat-magyarországi Egyetem, Magyarország. 92 (2011.05.)
- [4] Huszár István: Tárgyasult ötletek. BBS-INFO Könyvkiadó és Informatikai KFT., H-1163 Budapest, Datolya utca 33. (2021)
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/S.\\_Scott\\_Crump](https://en.wikipedia.org/wiki/S._Scott_Crump) (2023.11.05)
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Stratasys> (2023.11.05)
- [7] <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/> (2023.11.05)
- [8] [Csökkent a világ műanyagtermelése - autopro.hu](https://www.autopro.hu) (2023.11.03)
- [9] Béla, T. D. P.: A műanyagipar és a műanyag-felhasználás környezeti hatásainak csökkentése. Magyar Kémikusok Lapja, Különszám, 28-32 (2020.december)
- [10] Szabó Ádám Zsombor: Természetes töltőanyagokkal kezelt politejsav (PLA) lemezek vizsgálata. Szakdolgozat. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Kerámia és Polimermérnöki Intézet (2020)
- [11] Horváth Tibor: A poli(l-tejsav) szintézise, a politejsav láncok kapcsolódása és a tejsav társítása 3-hidroxiadamantán-1-karboxilsav, 2-etil-2-hidroxivajsav, 1-borkósav és borostyánkősav komponensekkel, PhD értekezés. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológia Doktori Iskola (2022)
- [12] Pázmán Judit, Kovács-Bokor Éva: Biológiailag lebomló polimerek. Dunakavics, IX.évfolyam V.szám, 5-44 (2021)
- [13] [nezzuk-meg-alaposabban-milyenek-a-biodegradalható-polimerek-05.pdf \(quattroplast.hu\)](https://www.quattroplast.hu) (2023.11.03)
- [14] <https://www.fainfo.hu/a-faanyag-nedvessegtartalma-i/> (2023.11.03)
- [15] <https://www.fainfo.hu/a-faanyag-nedvessegtartalma-ii/> (2023.11.03)

- [16] Michael Carus és társai: Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 202 and Futura Trends in Automotive and Construction, WPC/NFC Market Study, 2014-10 (Update 2015-06)
- [17] Yubo Tao és társai: Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. *Materials*, 10, 339 (2017)
- [18] Mirko Kariz és társai: Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communication*, 14, 135-140 (2018)
- [19] Hiral H. Parikh és társai: Flexural response of 3D printed wood dust reinforced polymer composite. *Materials Today* (2023)
- [20] Adam M. Pringle és társai: Wood Furniture Waste-Based Recycled 3-D Printing Filament. *Forest Products Journal*, 68 (1): 86-95 (2018)
- [21] <https://variometrum.hu/hu/pla-fa-anyagu-filament-175mm-1kg> (2023.10.27)
- [22] <https://azurefilm.hu/hu/fa-filamentek> (2023.10.27)
- [23] [https://www.fila-ment.hu/Primaselect-wood-termeszetes-barna-filament-1-75MM?gclid=CjwKCAjwv-2pBhB-EiwAtsQZFPKMjwgyc0B2ETrotWeqaDA8zx8vVzGpoXe-cl1-5cNQZuS4ZE3EIhoCOK8QAvD\\_BwE](https://www.fila-ment.hu/Primaselect-wood-termeszetes-barna-filament-1-75MM?gclid=CjwKCAjwv-2pBhB-EiwAtsQZFPKMjwgyc0B2ETrotWeqaDA8zx8vVzGpoXe-cl1-5cNQZuS4ZE3EIhoCOK8QAvD_BwE) (2023.10.27)
- [24] [https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet\\_4060D\\_films\\_pdf](https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4060D_films_pdf) (2023.10.27)
- [25] <https://markofaipar.hu/>
- [26] <https://www.printables.com/> (2023.11.03)