

# **SZAKDOLGOZAT**

**Varga Tamás**

**2025**



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem**

**Szent István Campus**

**Műszaki Intézet**

**Mechatronikai mérnök alapképzési szak**

**„Recycling” újraextrudálás hatása a 3D nyomtatható filamentek  
mechanikai anyagjellemzőire**

<b>Belső konzulens:</b>	Dr. Zsidai László Tanszékvezető, egyetemi tanár
<b>Belső konzulens intézete/tanszéke:</b>	Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok tanszék
<b>Külső konzulens:</b>	Nincs
<b>Készítette:</b>	<b>Varga Tamás</b>

**Gödöllő**

**2025**

**MŰSZAKI INTÉZET**  
**MECHATRONIKA ALAPSZAK**  
**Gépipari mechatronika specializáció**

**SZAKDOLGOZAT**

feladatlap

*Varga Tamás* (BVW2RZ)

részére

A szakdolgozat címe:

**„Recycling” újraextrudálás hatása a 3D nyomtatható  
filamentek mechanikai anyagjellemzőire**

**Feladatkiírás:**

Bevezetés, szakirodalmi áttekintés, alkalmazott módszerek, filamentek újraextrudálása, szakítóvizsgálatok elvégzése, eredmények és értékelésük, következtetések és javaslatok, gazdasági számítás, összefoglalás

**Közreműködő tanszék:** Anyagtudományi- és Gépipari Folyamatok

**Külső konzulens:** -

**Belső konzulens:** *Dr. Zsidai László, egyetemi tanár, MATE-Műszaki Intézet*

**Beadási határidő:** 2025. november 04

Gödöllő, 2025. szeptember 08

	<b>Jóváhagyom</b>		<b>Átvettem</b>
(tanszékvezető)		(szakfelelős)	(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2025.

(külső konzulens)

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés.....	3
2.1. 3D Nyomtatás gyártástechnológiák, FDM technológia.....	3
2.2. Filament alapanyagok.....	9
2.3. Filament előállítása.....	12
2.3.1. Filament nagyüzemi előállítása.....	12
2.3.2. Labor darálók bemutatása.....	15
2.3.3. Labor extruderek bemutatása.....	16
2.4. Anyagvizsgálati módszerek, szakítóvizsgálat.....	17
2.5. Szakirodalom kritikai értékelése.....	20
3. Alkalmazott módszerek.....	22
3.1. Kutatási- és vizsgálati terv.....	22
3.2. Felhasznált gépek és eszközök.....	24
4. Vizsgálati eljárás részletes bemutatása.....	25
4.1. Alapanyagok előkészítése.....	25
4.2. Darálék előállítása.....	26
4.3. Extrudálás.....	27
4.3.1. Extrudálás előkészítése, elindítása.....	28
4.3.2. Extrudáló csiga fordulatszáma.....	29
4.3.3. Extrudálási hőmérséklet.....	31
4.3.4. Vizsgálendő PLA extrudálása.....	32
4.4. Szakítóvizsgálat.....	32
4.4.1. Mintadarabok előkészítése.....	33
4.4.2. Próbaszakítás, szakítóvizsgáló használata, mérési paraméterek.....	34
4.4.3. Mérések elvégzése, mérési tapasztalatok.....	37
5. Eredmények és értékelésük.....	38
5.1. Mérési eredmények, számított anyagjellemzők bemutatása.....	38
5.1.1. Számítási módszerek.....	39
5.1.2. Eredeti filament szálak.....	41
5.1.3. Egyszeresen újraextrudált szálak.....	43
5.1.4. Kétszeresen újraextrudált szálak.....	45
5.2. Eredmények összehasonlítása, statisztikai kiértékelése.....	47
6. Következtetések és javaslatok.....	51
6.1. Megfigyelt jelenségek értékelése, következtetések levonása.....	51
6.2. Javaslatok.....	53
7. Gazdasági számítás.....	54
8. Összefoglalás.....	55
9. Summary.....	56
10. Köszönetnyilvánítás.....	57
11. Nyilatkozatok.....	58
12. Irodalomjegyzék.....	62

# 1. Bevezetés

A fenntarthatóság napjaink egyik legfontosabb témája mind a környezetvédelem, mind a piaci versenyképesség szempontjából. A műszaki életben aktívan kutatják, hogyan lehet a fenntarthatóság irányába haladni, ezen belül az egyik lehetőség a keletkezett hulladékok újrahasznosítása. Ez több szempontból is előnyös lehet: nem kell foglalkozni a hulladékok tárolásával, elszállíttatásával, valamint kevesebb alapanyag beszerzésére van szükség.

Az újrahasznosítás a gyártási technológiákban sok helyen nehezen valósítható meg, a forgácsoló eljárások során keletkező forgács kenőolajjal szennyezett, újbóli felhasználása problémás. Az additív gyártástechnológiák egyre szélesebb körű elterjedése új lehetőségeket nyit: a nyomtatás során használt műanyag filament, por, gyanta sokkal gazdaságosabban felhasználható, az optimális gyártási beállításokkal minimalizálható a keletkező hulladék mennyisége.

Napjainkban jellemzően nem hosszú távra gyártódnak a termékek, a gyártási segédeszközök rövid ideig használatosak, az optimalizálás utáni csere igényli az eszközök gyakori cseréjét. Itt kerül előtérbe az additív gyártási technológiák szerepe: nem csak megkönnyítik a kisebb darabszámú prototípusok és javított verziók előállítását, hanem az általuk használt alapanyagok tulajdonságai lehetőséget nyújtanak ezen eszközök újrahasznosítására is, miután már szükségtelenné váltak. Ekkor viszont felmerül egy lényeges kérdés: hogyan változnak a műanyag mechanikai anyagjellemzői egyszeres, vagy akár többszörös újrahasznosítás hatására? Dolgozatom célja ezeknek a változásoknak a vizsgálata.

Ennek megfelelően dolgozatomban az FDM (Fused Deposition Modeling) szálleválasztásos eljárásra alapuló nyomtatási technológia alapanyagának újrahasznosíthatóságát fogom vizsgálni. Ezen technológiák hőre lágyuló polimer szállal, úgynevezett filamenttel dolgoznak. Anyaga rengeteg féle lehet, ipari alkalmazásban általában ABS-t és polikarbonátot, míg kisipari vagy otthoni alkalmazásban könnyű kezelhetősége miatt főként PLA-t alkalmaznak. [1] A PLA (Polylactic acid), magyar nevén politejsav, egy részben komposztálható műanyag, melyet főleg kukoricakeményítőből állítanak elő. Széleskörű elterjedtsége, valamint környezetbarát jellege miatt dolgozatomban ezen anyagot fogom vizsgálni. Az újrahasznosítás során először felaprítom a filamentet, ebből egy újraextrudáló berendezés segítségével ismét huzalt állítok elő, majd a huzalt szakítóvizsgálatnak vetem alá. Polimer anyagoknál a molekulaláncok alakítására aprítás, törés, roncsolás, majd újra húzás után az eredeti kialakítástól eltérően rendeződik vissza, amely kihathat a filament mechanikai anyagjellemzőire, amely indokoltá teszi a vizsgálatokat a témában.

## **2. Szakirodalmi áttekintés**

Ebben a fejezetben azon témaköröket fogom áttekinteni, amelyek szorosan kapcsolódnak dolgozatom témájához és szükségesek a probléma mélyebb szintű megértéséhez. Ismertetek néhány fontosabb additív gyártástechnológiát, a legelterjedtebb filament alapanyagokat, a filament tekercek előállításának az elvét mind üzemi, mind laboratóriumi körülmények között, valamint az ehhez szükséges gépeket. Végül kitérek a műanyagokra vonatkozó anyagvizsgálási módszerekre, valamint azon szabványos próbatestekre is, amelyeket a műanyagok vizsgálatakor szokás alkalmazni.

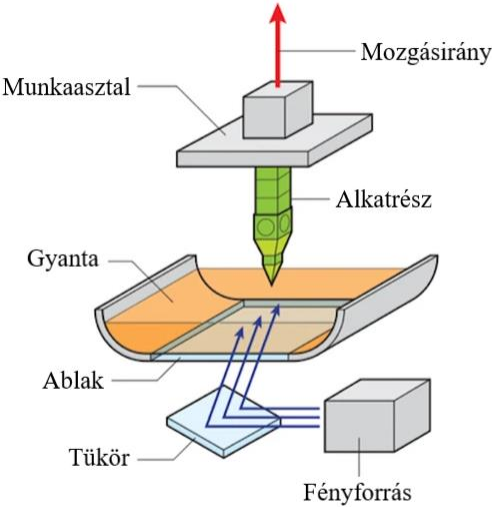
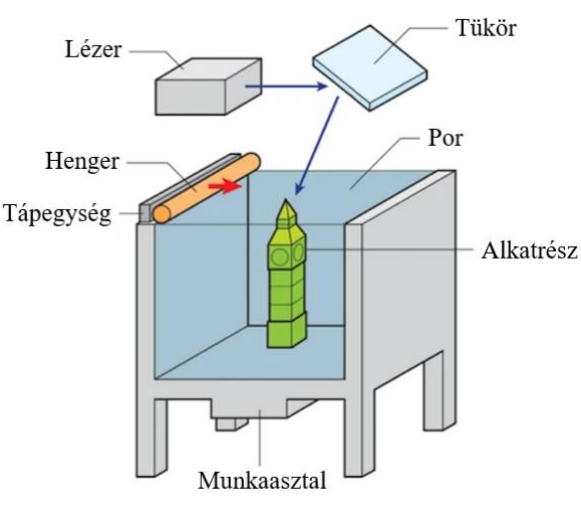
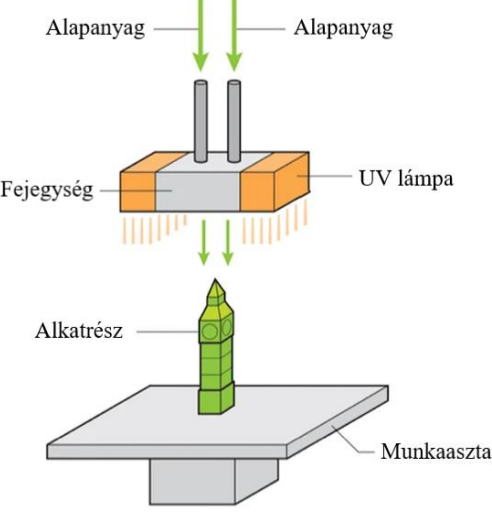
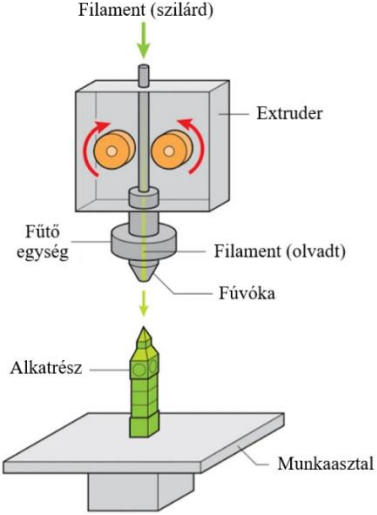
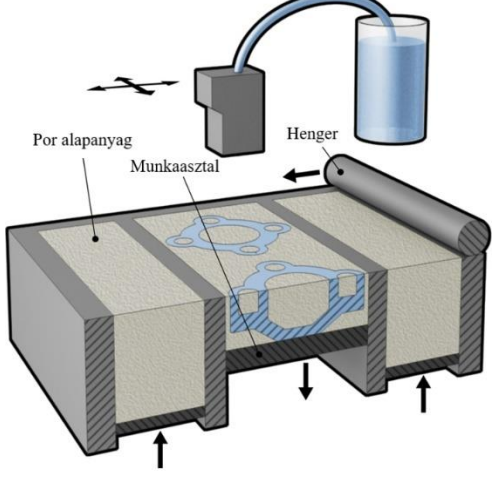
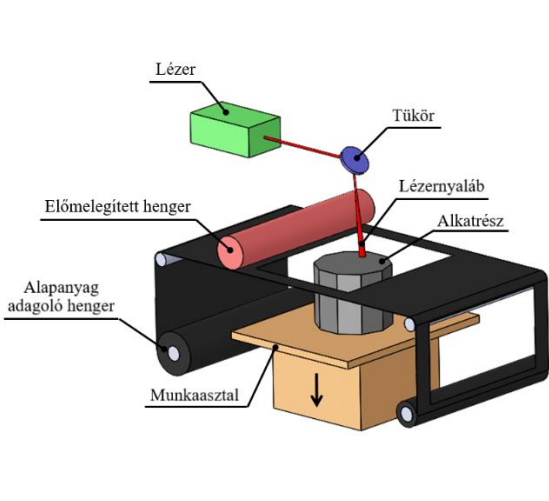
### **2.1. 3D Nyomtatás gyártástechnológiák, FDM technológia**

A 3D nyomtatás, más néven additív gyártás, egy olyan gyártási technológia, amely merőben eltér a hagyományos, anyageltávolításra épülő technológiáktól. Lényege, hogy a digitálisan előállított CAD modellek alapján rétegről rétegre építi fel a munkadarabot, technológiától függően eltérő eljárásokkal. Itt külön kell választanunk az ipari célú és otthoni célra szánt 3D nyomtatást, hiszen az ipari célok és elvárások teljesen eltérnek az otthoni feladatoktól. Míg az iparban fontos szempontok közé tartozik a nyomtatás pontossága, sebessége, felületi minősége, az anyagok mechanikai jellemzői, addig az otthoni felhasználás során ezen elvárások sokkal elnézőbbek, cserébe olcsóbb és elérhetőbb gépeket kínálva. Ezen otthoni felhasználásra is alkalmas gépek szinte mindegyike szárelvasztásos eljárással működő FDM (Fused Deposition Modeling) gép, míg a többi technológia inkább az ipari gyakorlatban jelenik meg. [2] A következőekben ezen eljárásokat fogom röviden ismertetni.

### **Technológiák összehasonlítása, áttekintése**

Először röviden bemutatom a 3D nyomtatási technológiákat, melyek működési elveinek a vázlatait a 2.1. táblázatban gyűjtöttem össze. Az FDM vázlata is ezen az ábrán található, annak ismertetésére különösen nagy hangsúlyt fogok fektetni.

2.1. táblázat: Technológiák elvi ábráinak összehasonlítása, saját szerkesztésű. Forrás: [27][28][29]

SLA	SLS
 <p>Munkaasztal Mozgásirány Alkatrész Gyanta Ablak Tükör Fényforrás</p>	 <p>Lézer Tükör Henger Tápegység Por Alkatrész Munkaasztal</p>
Polyjet	FDM
 <p>Alapanyag Alapanyag Fejegység UV lámpa Alkatrész Munkaasztal</p>	 <p>Filament (szilárd) Extruder Fűtő egység Filament (olvadt) Fűvóka Alkatrész Munkaasztal</p>
Binder Jetting	LOM
 <p>Por alapanyag Munkaasztal Henger</p>	 <p>Lézer Tükör Lézernyaláb Alkatrész Előmelegített henger Alapanyag adagoló henger Munkaasztal</p>

- **LOM technológia**

A LOM (Laminated Object Manufacturing), magyarul rétegelt lemezes gyártás egy olyan eljárás, amelyben az alapanyag egy szalag formájában halad a munkaasztal felett, egy lézer segítségével pedig kivágásra kerül az egyes rétegek geometriája, így építve a munkadarabot rétegről rétegre. Az eljárás során először hozzáragasztják az újabb rétegeket az előzőekhez, majd egy lézer segítségével kivágják a szalagból a kívánt alakzatot, ezt követően pedig az asztal lejjebb süllyed, az előbbi lépések pedig megismétlődnek a következő réteggel. A ragasztás beindítására használhatnak UV sugárzás hatására aktiválódó ragasztót, vagy hőérzékeny ragasztóval bevont alapanyagot. Utóbbi esetében az adagolás során még a munkaasztal elérése előtt felmelegíti a vasalóhenger a tekercset. [3]

A tekercs alapanyaga általános esetben papír, de lehet fém, szövet, valamint szintetikus és kompozit polimerekből készített fólia vagy lemez. A technológia előnyei közé tartozik a költséghatékonyság, hiszen megfizethető alapanyagokkal dolgozik, képes nagy méretű modelleket kinyomtatni, valamint nem ipari körülmények között is alkalmazható. Hátránya, hogy szűkebb az elérhető gépeknek a piaca, a beszerzési ára pedig meghaladja egy FDM nyomtatóét, valamint a nyomtatás pontossága alacsonyabb, bonyolultabb geometriák kinyomtatása pedig csak nehezen, vagy egyáltalán nem megvalósítható. [4]

- **SLS technológia**

Az SLS (Selective Laser Sintering), magyar fordításban szelektív lézerszinterezés egy olyan technológia, amely a finom por állagú alapanyagból lézersugarakkal állítja elő a kívánt tárgyat. Lényege, hogy a nyomtató munkafelületén a kívánt rétegvastagságban egy tömörítő henger teríti el egyenletesen a port, amelyet aztán az elérni kívánt geometriának megfelelően egy lézersugár segítségével olvasztanak, majd szilárdítanak meg. [5] A por már előmelegítve kerül szétterítésre, kevéssel az olvadáspontja alatti hőmérsékleten, hogy később a lézer könnyebben meg tudja olvasztani azt. Az alapanyag azon részei, amelyek nem kerültek megolvasztásra támaszként tudnak szolgálni a későbbi rétegek számára, így külön támaszok nyomtatására nincs szükség. Miután egy réteg elkészült, a munkaasztal egy rétegnivel lentebb süllyed, a tömörítő henger pedig újabb réteg port visz fel a munkafelületre, majd a folyamat a fentebbiek szerint megismétlődik, egészen ameddig kész nem lesz a kívánt tárgy.

Legelterjedtebb alapanyagai a nylon, annak különböző kompozitjai (üveg, karbonszál), a polipropilén, valamint a TPU. Az SLS technológia ideális összetettebb geometriájú alkatrészek előállítására is, amelyek kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek,

szilárdságuk hasonló a fröccsöntött alkatrészekéhez. Legnagyobb hátránya a gépek beszerzési árában, valamint a terjedelmes méretükben rejlik, így irodai vagy otthoni használatuk nem célszerű, viszont gyártósorokban történő felhasználásra tökéletesen alkalmasak. [6]

- **SLA technológia**

Az SLA, avagy sztereolitográfia egy olyan eljárás, amely az alapanyagaként szolgáló fényérzékeny polimer gyantát UV fény segítségével rétegenként irányítottan polimerizálja, ezáltal rétegről rétegre megalkotva a kívánt alkatrészt. A nyomtatás után az alkatrésznek még szüksége lehet UV fényes utókezelésre, ezáltal jelentősen javítva az alkatrész keményégét, hőállóságát. A hőre lágyuló műanyagokkal szemben a polimer gyanta hőre keményedik, ezáltal a munkadarabok elkészülésük után már nem alakíthatóak vissza. Az SLS technológiával szemben itt a kilógással rendelkező alkatrészek igényelnek támaszt is, amit szintén ki kell nyomtatni a gyártási folyamat közben.

A technológiára jellemző a precíz méretpontosság, alkalmas a bonyolultabb részletek megjelenítésére is, valamint nagyon sima felületet eredményez. Ellenben a készített alkatrészek rugalmatlanok, napsugárzás hatására pedig idővel változhat a megjelenésük, mechanikai tulajdonságaik. [7]

- **Binder Jetting**

A Binder Jetting, magyar fordításban kötőanyag-sugaras nyomtatás egy olyan additív technológia, amely kötőanyagok felhasználásával ragasztja össze por állagú alapanyagát a megfelelő helyeken, ezáltal létrehozva a nyomtatandó alkatrészt. A folyamat során először szétterítésre kerül egy vékony porréteg a munkaasztal felett, amelyet utána a nyomtatófej szelektíven becsepegtet kötőanyaggal fűvókákon keresztül, ezáltal összekötve a porszemcséket. Miután az egyes rétegek elkészültek, a munkaasztal lejjebb süllyed, és a lépések folytatódnak előlről, ameddig a tárgy el nem készül. Nyomtatás után a kész darabot hagyják megkötni és erősödni, majd sűrített levegővel eltávolítják a felesleges port.

Alapanyaga rengeteg féle lehet; fémek, kerámiák, bizonyos polimerek, homok, valamint különféle fémötvözetek, felhasználástól függően. A módszer egyik jelentős előnye, hogy szobahőmérsékleten üzemel, ezáltal nagy építési térfogatot biztosítva, továbbá támasztószerkezetekre sincsen szükség a nyomtatás során, hiszen a por önmagában is támaszt nyújt. Hátránya, hogy az alkatrészek pontossága nehezen meghatározható, mivel az utófeldolgozás során zsugorodás léphet fel, valamint az alkatrészek belső üregessége miatt azok jellemzően gyengébb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkeznek. [30]

- **Polyjet technológia**

A Polyjet nyomtatók az SLA technológiához hasonlóan UV sugárzásra szilárduló, fényérzékeny fotopolimereket használnak alapanyagukként. Működési elve a következő: az alapanyagot az alkatrész geometriájának megfelelően felviszi a gép a munkaasztalra vékony rétegekben, majd ezeket UV fény segítségével polimerizálja, minden újabb réteg felvitele esetén. A technológia egyik legjelentősebb előnye, hogy egy nyomtatáson belül több alapanyag használatát is lehetővé teszi. Jellemzően az alkatrész nyomtatásához szükséges támaszok is külön alapanyagból készülnek.

A rétegek vastagsága 16 mikron, az alkatrészeket pedig 0,1 milliméteres pontossággal képes kinyomtatni, ezzel egy kifejezetten pontos eljárássá téve a Polyjetet. Alapanyagok széles skálájával képes dolgozni, legyen az akár gumyszerű, rugalmasabb anyag, akár hőálló anyag vagy polimerek. [8]

## **FDM technológia**

Az FDM (Fused Deposition Modeling) műanyag szálélválasztásos elven működő gépek alapanyaga a filament tekercs, amely egy akár több méter hosszú, néhány milliméter átmérőjű műanyag szál egy dobra feltekercselve. A nyomtatás során ezt a szálát egy léptetőmotor húzza be a felmelegített nyomtatófejbe, ahol megolvad az anyag, majd az így keletkezett olvadék átréselődik egy fűvókán keresztül a munkaasztalra. Ez a megolvasztott réteg nem sokkal a kijutást követően kihűl, miközben a rétegek egymáshoz tapadnak. [9]

A filament beadagolásáért felelős egység az idegen nevén is gyakran használt extruder, amelyet elhelyezkedése szerint kétféleképpen különböztethetünk meg; Direct Drive Extruderről akkor beszélünk, ha az extruder motor a nyomtatófejben helyezkedik el, Bowden Extruderről pedig akkor, ha az adagoló motor a nyomtatófejtől külön helyezkedik el, hozzá egy műanyag csővel kapcsolódva. Beadagolás után a filament szál az úgynevezett hotendbe kerül, amely további négy fő részre osztható: először a hűtőbordákon megy át, amely megakadályozza, hogy a filament elvezesse a hőt, és túl korán meglágyuljon. Tovább haladva eléri a hőtöröt, amely egy kis cső, amelynek egy része a hűtőbordában, egy másik része pedig a fűtőblokkban fut, így összeköttetést biztosítva a két elem között. A fűtőblokkban a filament megolvasztásra kerül, amely hőmérsékletének a szabályozása egy hőérzékelő szenzor segítségével történik. Végül a filament a fűvókán keresztül préselődik ki, amely egy szűkített végű apró cső. Az extruder és nyomtatófej felépítése az 1. mellékleten látható. [10]

A mozgatórendszer megvalósítási módjától függően a nyomtatók kialakítása jelentős változásokat mutathat, de a leggyakrabban előforduló nyomtatók három tengelyes, Descartes-féle koordináta rendszert használnak. Ezen belül a leginkább elterjedt felépítés az úgynevezett cartesian vázttípus, amit még további három kategóriára lehet osztani a tengelyeken való mozgás megvalósításának függvényében. Ezek között a legfőbb különbséget a munkaterület mérete, valamint a nyomtatófej és a tárgyasztal mozgása adja. A legjellemzőbb esetben a nyomtatók a tárgyasztalt mozgatják függőlegesen a Z tengely mentén, míg a nyomtatófej X és Y irányban mozog. [11]

A nyomtatott munkadarab minőségét számos tényező befolyásolhatja, ezek közül a legfontosabbak a következők: [12]

- Rétegvastagság: az egyes rétegek magassága a Z tengely mentén, nagysága a választott fűvóka átmérőjétől függ. Minél kisebb az egyes rétegek vastagsága, a nyomtatási idő annál nagyobb, viszont simább felületet és nagyobb pontosságot eredményez. Az egyes rétegvastagságok közti eltérésekről szemléltetés az 1. mellékletben található.
- Nyomtatási sebesség: a nyomtatófej mozgási sebessége az XY sík mentén. A kisebb nyomtatási sebesség pontosabb nyomtatást és kisebb felületi érdességet eredményez, viszont hosszabb nyomtatási idővel jár.
- Extrudálási hőmérséklet: Az a hőmérséklet, amelyen az extruder megolvasztja a filamentet. A túl alacsony hőmérséklet gyengébb rétegtapadást és alacsonyabb szilárdsági tulajdonságokat okozhat, a túl magas hőmérséklet viszont szálahúzáshoz, felületi hibákhoz vezethet.
- Kitöltési sűrűség: A modell belső, fedett részeinek a kitöltöttségi aránya. Minél nagyobb egy modell kitöltési sűrűsége, annál jobb mechanikai tulajdonságokkal fog rendelkezni a nyomtatott tárgy, viszont nehezebb lesz, több anyagot igényel és hosszabb nyomtatási időre van szüksége.
- Kitöltési mintázat: A modell belső, fedett részeinek kitöltésére használt mintázat. Az egyes mintázatok eltérő mechanikai tulajdonságokat biztosítanak.
- Nyomtatóasztal hőmérséklete: fontos a megfelelő tapadás érdekében, például a PLA alacsonyabb hőmérsékletet igényel (0-70 °C), míg az ABS magasabbat (70-100 °C) [13]

Összességében elmondható, hogy bizonyos határok között maradván nincsenek általánosan jó vagy rossz nyomtatási paraméterek, minden esetben más, hogy mik az ideális beállítások. Ez függhet az alapanyagától is, és a nyomtatandó tárgy felhasználási céljától is.

## 2.2. Filament alapanyagok

Az FDM nyomtatók terjedésével az igény is egyre nagyobbá vált a különféle anyagú filament tekercsek használatára, így napjainkra már bőséges felhozatal közül tudunk választani céljainknak megfelelően. Ebben a fejezetben bemutatom a legáltalánosabban elterjedt alapanyagok tulajdonságait, a PLA-ra különös hangsúlyt fektetve, hiszen dolgozatomban is ezen anyag újrahasznosíthatóságát fogom vizsgálni. Néhány alapanyag, amelyekre nem térek ki bővebben, de említésre méltóak: a kompozit alapanyagok különböző polimerek ötvözeteiből állnak össze, gyakran a PLA és ABS keverékéből, amely felruházza az anyagot az ABS-re jellemző mechanikai tulajdonságokkal, de megtartja a PLA-ra jellemző könnyű nyomtathatóságát. Az anyagjellemzők javítására gyakran erősítik a polimereket üvegszállal vagy karbonszállal, ezáltal olyan kompozitokat létrehozva, amelyek egyaránt rendelkeznek kiváló mechanikai jellemzőkkel, valamint jelentős termikus és kémiai ellenállással is. Előfordulnak még fémporral ötvözött filamentek is, ezekhez szükséges keverni kötőanyagokat, valamint az alkatrész elkészülte után szükség van utókezelésekre, viszont nagy potenciál rejlik bennük kis szériaszámú fémtárgyak gyártása esetén. [14]

### ABS

Az ABS (Akrilnitril-butadién-sztirol) az egyik legelterjedtebb filament alapanyag az iparban, nem véletlenül. Kiemelkedő ütésállósággal és szívósággal rendelkezik, valamint a magasabb hőmérsékletekkel szemben is sokkal ellenállóbbak a belőle készült alkatrészek, mint a PLA esetén. Hátránya, hogy több szempontból is körülményes a nyomtatása. Egyrészt érzékenyebb a hőmérsékletre; az egyes rétegek egyenetlen kihülése az alkatrész vetemedéséhez vezethet, valamint gondoskodni kell a legalsó réteg megfelelő tapadásáról. A nyomtatásakor mérgező vegyületek szabadulnak fel, ezért csak zárt nyomtatóban használható biztonságosan, gondoskodva a levegő elszívásáról, szellőztetéséről. További hátránya, hogy UV sugárzásnak kitéve könnyen elszíneződhet, és rideggé válhat. [15] Az ABS műanyagra jellemző anyagtulajdonságok a 2. mellékletben láthatóak, a méréseket az extrudr által forgalmazott DuraPro filamentből nyomtatott próbatesteken végezték.

### PETG

A PETG, hosszabb nevén polietilén-tereftalát-glikol egy népszerű alapanyag választás, anyagtulajdonságai szerint az ABS és PLA között helyezkedik el. A PLA-nál erősebb és tartósabb, az ABS-nél még rugalmasabb is, valamint nyomtatása is kevésbé körülményes,

viszont itt is oda kell figyelni néhány tényezőre. A tárgyasztalt érdemes 50-80 °C-ra felmelegíteni, ezzel elősegítve a megfelelő tapadást, a ventilátorok fordulatszámát pedig ajánlott lecsökkenteni, körülbelül 25%-os értékre. Jó a kémiai, valamint hővel szembeni ellenállása, viszont a karcolásokra érzékenyebb, mint a PLA. Kedvező tulajdonságai ellenére olcsón elérhető, többek között ezért is ennyire elterjedt. [17] A PETG-re jellemző adatok a 2. mellékletben láthatóak.

## **TPU**

A TPU (Thermoplastic polyurethane) egy meglehetősen rugalmas és nyúlékony anyag, amely tulajdonságait tekintve valahol a gumik és műanyagok között helyezkedik el. Nem csak tartós és hajlékony, de a hőnek és a kémiai vegyületeknek is jól ellenáll. Rugalmasságából következően remek ütközés- és rezgéselnyelő tulajdonságokkal rendelkezik, ebből fakadóan gyakran alkalmazzák sporteszközök gyártásához, valamint a műszaki gyakorlatban. Legfőbb hátrányai a nehezebb nyomtathatóságából, valamint drágább beszerzési árából fakadnak. Nyomtatás után könnyen beleragadhat a nyomtatófejbe a maradvány filament, ezáltal eltömítve azt; ekkor szükséges lehet a nyomtatófej részleges vagy teljes szétszerelése és kitakarítása. A sikeres nyomtatás érdekében ajánlott a nyomtatási sebességet lecsökkenteni körülbelül 20-30 mm/s-ra, valamint érdemes a filament tekercseket száraz helyen tárolni, a nedvesség okozta károsodás megelőzése végett. [19]

Keménységük szerint három osztályba szokták sorolni a TPU-t; puha, közepes, valamint kemény. Minél nagyobb a keménységi osztálya az anyagnak, annál kisebb a szakadási nyúlása, ezáltal annál kevésbé rugalmas. A különböző keménységű TPU-kra jellemző közelítő értékeket a 2. mellékletben lehet látni. [19]

## **PLA**

Mint a korábbiakban már említettem a PLA, avagy politejsav egy komposztálható, könnyen nyomtatható, széles körben elterjedt műanyag. Népszerűsége egyrészt anyagi okokból következik; a nyers PLA előállításához 65%-kal kevesebb energiára van szükség, mint a hagyományos műanyagok esetén, valamint 68%-kal kevesebb üvegházhatású gázt bocsát ki. [21] Növényi eredetű alapanyaga könnyen elérhető, amely általában kukoricakeményítő vagy cukornád. Habár képes lebomlani, önmagától a környezeti hőmérsékleten ez nagyon lassan zajlik, ezért csak ipari körülmények között szokás komposztálni. [22]

Másfelől belépő szintű nyomtatók is tökéletesen alkalmasak a PLA filamentek nyomtatására, hiszen a tárgyasztalt nem szükséges előmelegíteni, a többi anyaghoz képest viszonylag alacsony hőmérsékleten lehet nyomtatni és a munkateret sem kell elzárni nyomtatás közben. A nyomtatási beállítások variálására is kevésbé érzékeny, ezért kezdők számára is ideális, valamint nagyobb nyomtatási sebességek mellett is képes minőségi tárgyakat létrehozni, ezáltal prototípusok alkotására is tökéletes. [23]

A PLA egy meglehetősen merev, rideg anyag, mechanikai tulajdonságai nem különösebben kiemelkedőek, viszont a legtöbb nyomtatási célra megfelelő, ahol nincsen jelentősebb igénybevételeknek kitéve. Ennek ellenére a kitöltési sűrűség növelésével, valamint a célnak megfelelő kitöltési mintázat megválasztásával így is jelentősen lehet növelni a nyomtatott tárgy szilárdsági tulajdonságain. Egyik legjelentősebb hátránya az anyagnak az egyik előnyéből fakad; mivel alacsonyan van az olvadáspontja, ezért az üvegesedési hőmérséklete is alacsony lesz. Ebből következően nagyobb hőnek a hatására könnyen deformálódhat a nyomtatott alkatrész is, ezért kültéri alkalmazásra nem javasolt, ahol a nap közvetlen rá tud sütni. [23] A PLA-ra jellemző adatok a 2.2. táblázatban láthatóak.

A felsorolt anyagokon kívül még rengeteg közül lehet válogatni a filamentek vásárlásakor. Ilyenek például a PA, ismertebb nevén Nylon, mely egy nehezebben nyomtatható, de jó szilárdságú anyag, vagy a polikarbonát, amely a fentebb soroltaknál már egy jóval strapabíróbb, áttetsző anyag. [25] Összességében elmondható, hogy minden anyagnak megvan a maga felhasználási területe, amely a felhasználási céloktól és elérhető anyagi kerettől is függ. A PLA a legtöbb felhasználási célra, dizájn elemek nyomtatására tökéletesen megfelelő. Ha a nyomtatni kívánt modell már kisebb-közepes igénybevételnek is ki lesz téve, akkor már a PETG ideálisabb választás lehet kissé hosszabb nyomtatási idő, valamint enyhén nagyobb költségek árán. Ha pedig egy hajlékony, rezgéselnyelő, rugalmas anyagra van szükség, akkor a TPU lesz a megfelelő választás, viszont akkor jobban oda is kell figyelni a nyomtatásra.

2.2. táblázat: PLA-ra jellemző adatok. Forrás: Saját szerkesztés az extruder műszaki adatlapja alapján [24]

PLA filamentre jellemző adatok		Mérési szabvány
Nyomtatási hőmérséklet:	200-230 °C	-
Lágyulási hőmérséklet:	55 °C	ASTM E2092
Szakítószilárdság:	53 MPa	ASTM D882
Szakadási nyúlás:	6%	ASTM D882

## **2.3. Filament előállítása**

Mivel dolgozatom témájának szerves részét képezi a filament szálak reprodukálása, ezért elengedhetetlen megismerni, hogy ez milyen módon történik. De mielőtt rátérnék az előállítási folyamatra, fontos utánajárni maguknak a filament tekercseknek, hogy milyen előforduló méretek vannak, és hogy milyen tényezőkre szükséges odafigyelni az extrudálás során.

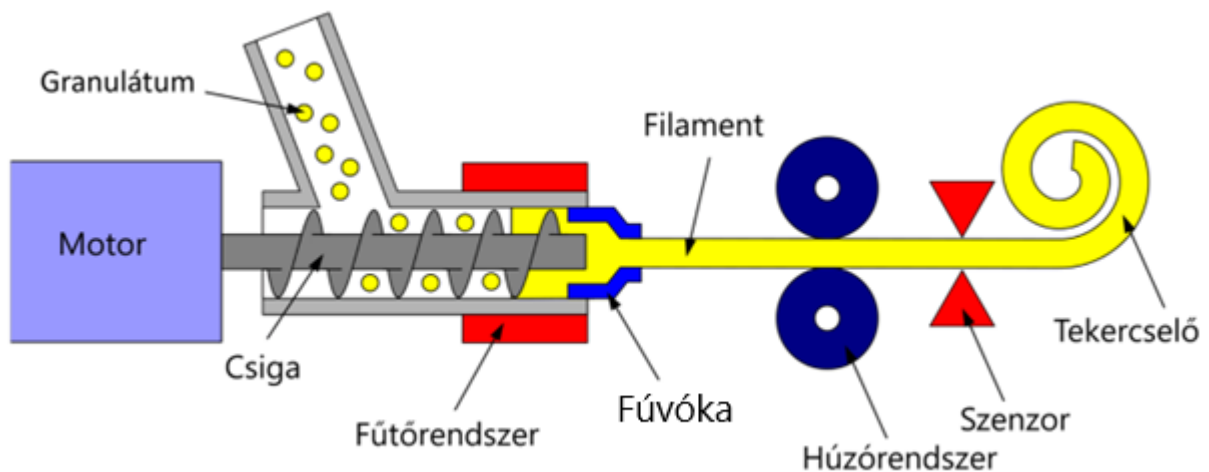
Mint a fentebbiekben már említettem, a filament egy szabványos, dobra feltekercselt műanyag szál, amelyet a száleválasztásos elven működő 3D nyomtatók használnak. Ha filamentet szeretnénk vásárolni, akkor tekercsek rendkívül széles kínálata közül tudunk választani; rengeteg féle szín, méret, anyag, valamint gyártó közül választhatunk, viszont a szálak átmérőjét tekintve már kisebb a szórás. Két féle szabványos méretben elérhetőek: a legelterjedtebbek az 1,75 mm átmérőjű szálak, de 2,85 mm vastagságban is fellelhetőek, ez utóbbiak néha 3 milliméteresként is lehetnek feltüntetve. A tekercsek paramétereit illetően nincsenek egyezményesen szabványos méretek, gyártónként eltérőek, viszont leggyakrabban 1 kilogrammos kiszerezésekben fordulnak elő.

Ideális esetben a filament keresztmetszete a szál teljes hossza mentén megegyező lenne, viszont ez gyártástechnológiailag nem megoldható, csak megközelíthető, ezért a cél az, hogy az átmérő egy szűk tűréshatáron belül maradjon. Hogy ezt sikerüljön elérni, az átmérőt szenzorok segítségével folyamatosan megfigyelik, eltérés esetén pedig automatikusan beavatkozás történik. A frissen kinyomott filament szálak fontos a megfelelő hűtéséről minél előbb gondoskodni, mert a még forró szál elég képlékeny ahhoz, hogy megnyúljon, elvékonyodjon a keresztmetszete, ezáltal selejtté válva. [26] A gördülékeny nyomtatás érdekében még szükséges a tekercs megfelelő felcsévéelését is biztosítani, hiszen ha menet közben megakad a filament szál az az adagoló motor túlterheléséhez, de legjobb esetben is a nyomtatás megállásához vezethet.

### **2.3.1. Filament nagyüzemi előállítása**

A filamentek előállítási elve nagyüzemi és laboratóriumi körülmények között lényegében egyező, viszont a gépek kivitelezése merőben eltérhet egymástól a kapacitási igények különbözőségéből következően, ezért ebben az alfejezetben az előállítási folyamatra, valamint az extruder kialakításokra fogok kitérni.

A folyamat kiindulási anyaga a polimer granulátum, amit igény szerint más anyagokkal összekeverve kompozitok is létrehozhatóak. A polimerek hajlamosak vizet felvenni a levegő páratartalmából, amely az extrudálás során gőzzé alakulhat, ezzel apró buborékokat létrehozva a filament belsejében, rontva a minőségét; hogy ezt ki lehessen küszöbölni, a folyamat első lépése a granulátumok kiszárítása. Ha a szárítás megtörtént, akkor az alapanyag bekerül az extrudáló egységbe, ahol először megolvasztásra kerül, majd átnyomódik egy adott átmérőjű fúvókán keresztül, ezáltal filament szálát képezve. Közvetlenül a kinyomás után a szál hűtése következik, amely általában hűtővízzel történik, de ventilátorral sem ritka. Mindeközben a szál keresztmetszete folyamatos megfigyelés alatt van, ezzel lehetőséget adva a kinyomott szál keresztmetszetének a szabályozására. Ha a szál megfelelt az elvárt paramétereknek, akkor utolsó lépésként következik a szálnak a dobra való felcsévélése, majd becsomagolása. [31] A folyamat elve a 2.1. ábrán látható.



2.1. ábra: Filament előállításának egyszerűsített rajza. Forrás: [32]

Mint ahogy azt az ábrán is lehet látni, a filament előállítás az magában az extruderben történik, ezért fontos annak a részeit is megismerni. Az alapanyag jellemzően egy tölcseren keresztül kerül bele a hengerbe, ahol aztán egy villamos motor által hajtott csiga tolja előre az anyagot a fúvóka felé. Az alapanyagot haladás közben a fűtőrendszer olvasztja meg a henger falán keresztül átadva a hőt, így a fúvókán való átréselésével végül felveszi annak keresztmetszetét.

Jellemzően két fajta kialakítás szerint különböztetjük meg az extrudereket, amely a csigák száma alapján történik; így beszélhetünk egycsigás, valamint kétcsigás extruderekről. Előbbi inkább a laboratóriumi alkalmazásban, míg a másik az ipari életben jellemzőbb. Az egycsigás extrudereket könnyebb üzemeltetni és karbantartani, valamint kisebb a beszerzési költsége is, viszont több különböző alapanyag esetén kevésbé hatékony az

összekeverésükben. A két csigával dolgozó extruderek ezzel ellentétben alaposabban összekeverik az eltérő anyagokat, ezáltal alkalmasabbak kompozitok és adalékanyagok feldolgozására. Jellemzően a két csiga egymástól eltérő irányban forog, ezzel is biztosítva a megfelelő keverést. [33]

A megfelelő minőségű filament előállításában szintén kritikus szerepet játszik, hogy az az optimális paraméterek mellett történjen. Ezek közül a legfontosabbak a henger hőmérséklete, az újraextrudálás sebessége, a hűtés mértéke, valamint az alapanyag összetétele. [35] Jelen esetben a PLA előállításához szükséges paramétereknek fogok utánajárni, hiszen későbbi munkám során erre lesz szükségem.

Martin és munkatársai azt vizsgálták (2024), hogy PLA filament laboratóriumi előállítása során milyen hőmérséklet esetén lesznek a kapott filamentnek a legkedvezőbbek a tulajdonságai. [34] Munkájuk eredményéül arra a következtetésre jutottak, hogy szinte minden szempontból 175 °C a legideálisabb hőmérséklet, amelyre a hengert fel kell melegíteni. A filament keresztmetszete ekkor ért el leginkább folytonos értékeket, valamint ekkor érte el a legjobb mechanikai tulajdonságokat is. Ha a hőmérséklet akár 10 °C-kal is több vagy kevesebb volt, mindkét jellemző romlást mutatott. A nyomtathatóságot figyelembe véve azt vették észre, hogy kisebb olvasztási hőmérséklet esetén kis mértékben romlott a nyomtatott alkatrész minősége is, viszont nagyobb hőmérséklet esetén már jelentős deformálódást tapasztaltak az alkatrészen. Chang és társai (2021) az átmérő méretepontosságát vették górcső alá, és vizsgáltak különböző szempontok szerint. [35] Az eredmények a következők voltak: a henger ideális hőmérséklete 184 °C, a csiga előtolási sebessége 490 mm/perc, a ventilátornak a fúvókától vett távolsága 57,5 mm, valamint mivel nem tisztán granulátumokat használtak alapanyagként, hanem újrahasznosított PLA darálékot is keverték hozzá eltérő arányokban, így a 40%-ban újrahasznosított PLA-t tartalmazó egyvelegnek volt a legpontosabb eredménye.



Habár a két tanulmányban az ideális extrudálási hőmérsékletek látszólag ellentmondanak egymásnak, az látható, hogy a kedvező tartomány nagyjából 175 °C és 185 °C között helyezkedik el. Ezen eltérések következhetnek a mérések körülményei közti különbségből, mint például a kialakítási konstrukció; laboratóriumi vagy otthoni extrudálás során a legjobb eredmények érdekében saját mérésekre lenne szükség. Ez viszont nem feltétlen szükséges, mert nem annyira jelentős a minőségbeli eltérés, hogy a kapott filament használhatatlan lenne, a lemért eredmények viszont nagyszerű irányértékeként tudnak szolgálni, hogy milyen paramétereket állítsunk be.

### 2.3.2. Labor darálók bemutatása

Ha a filamentet nem granulátumból szeretnénk előállítani, hanem nagyobb méretű darabokból, például műanyag hulladékból, akkor az újraextrudálást megelőzően az anyagot kisebb méretű részecskékre kell bontanuk, aprító berendezések felhasználásával.

A két leggyakrabban alkalmazott darálótípus a késes daráló, valamint a lassú fordulátú aprító. Az utóbbi típusra nem találtam jól leíró magyar megnevezést, ezért az angol „shredder” néven fogok rá hivatkozni. A késes darálók éles pengékkel vágják apróbb darabokra az anyagot, ezáltal viszonylag homogén szemcseméretet elérve, valamint kisebb méretű és egyszerűbb felépítésük miatt olcsóbbak is. Hátrányuk, hogy nagyobb anyagdarabokkal nehezebben boldogulnak, és a kések kopását is figyelembe kell vennünk. A shredderek egy vagy több, tompa élű késekkel felszerelt tengellyel dolgoznak, melyek gyakorlatilag széttépik az aprítani kívánt anyagot. Ezek az aprítók a nagyobb méretű tárgyak aprítására is alkalmasak, viszont a kapott részecskeméret kevésbé homogén, és gyakran túl durvák a közvetlen extrudáláshoz, így szükséges lehet a további finomítás. Ha fontos a pontos szemcseméret elérése, akkor mindkét típus esetén alkalmazható rosta, mely csak a megfelelően kis méretű részecskéket engedi át. [50] A 2.3. számú táblázatban 2 darab shreddert mutatok be.





2.3. táblázat: Labor darálók összehasonlítása, saját szerkesztésű. Forrás: [51][52]

Daráló	Leírás
<p>Precious Plastic Shredder</p> 	<p>Kapacitás: 10 kg/óra Motor: 220 V, 1,5 LE Állítható fordulatszám, forgási irány Ár: ~ 2830 €</p>
<p>Felfil Shredder 750</p> 	<p>Kapacitás: 4 kg/óra Max. teljesítmény: 625 W Pengék száma: 12 db. Nyomaték: 36 Nm Max. fordulatszám: 33 1/perc Ár: ~ 1650 €</p>

### 2.3.3. Labor extruderek bemutatása

Az alábbi, 2.4. számú táblázatban 4 különböző interneten elérhető, laboratóriumi extrudert fogok röviden ismertetni, szemléltetesként az elvi kialakítások különböző megvalósításaira. Fontos, hogy az egyéb kiegészítő elemeket nem tartalmazzák, mint például a hűtés vagy a felcsévélés.

2.4. táblázat: Labor extruderek összehasonlítása, saját szerkesztésű. Forrás: [36][37][38][39]

Extruder	Leírás
<p>Wellzoom B-pro</p> 	<p>Extrudálási sebesség: 250 mm-1500 mm/perc  Fúvóka méretek: 1,75 mm és 3 mm  Méretpontosság: 1,75mm → +-0,05mm; 3mm →+-0,1mm  Maximum hőmérséklet: 320 °C  Teljesítmény: 140 W  Mérete: 500x160x200 mm  Adagoló űrtartalom: 400 ml  Ár: ~ 824 €</p>
<p>Filabot EX2</p> 	<p>Extrudálási sebesség: 0,91 kg/óra  Fúvóka méretek: 1,75 mm és 2,85 mm  Méretpontosság: +-0,05 mm  Maximum hőmérséklet: 450 °C  Teljesítmény: 500 W  Motor fordulatszám/nyomaték: 0-35 1/perc; 9,6 Nm  Mérete, tömege: 457x178x229 mm; 12,7 kg  Ár: ~ 2756 €</p>
<p>filafab PRO 350 EX</p> 	<p>Extrudálási sebesség: 1 kg/óra  Fúvóka méretek: 1,75 mm és 2,85 mm  Maximum hőmérséklet: 250 °C  Fűtő teljesítmény: 200 W  Motor teljesítmény: 250 W  Motor fordulatszám: 0-25 1/perc  Mérete, tömege: 640x190x240 mm; 18 kg  Ár: ~ 2146 €</p>
<p>Felfil Evo</p> 	<p>Extrudálási sebesség: 100-150 g/óra  Fúvóka méretek: 1,75 mm és 2,85 mm  Maximum hőmérséklet: 250 °C  Max teljesítmény: 180 W  Motor fordulatszám: 0-9 1/perc  Adagoló űrtartalma: 1 liter  Mérete, tömege: 350x180x108 mm; 5 kg  Ár: ~ 800 €</p>

## **2.4. Anyagvizsgálati módszerek, szakítóvizsgálat**

Mint a dolgozatom elején kitértem rá, mérésem célja az eredeti, valamint az újrahasznosítás után kapott filament szálaknak a szilárdsági összehasonlítása. Ahhoz, hogy ez lehetséges legyen, szükségünk van egzakt, számmal kimutatható, egymással összehasonlítható értékekre, amelyek az anyag mechanikai tulajdonságait egyértelműen jellemzik. Erre szolgálnak eszközül az anyagvizsgálati módszerek, melyeket ha szabványos eljárással végzünk, akkor nem csak a saját mérési eredményeinket tudjuk egymással összehasonlítani, hanem minden más, szabványnak megfelelő mérés eredményével is. A következő fejezetben azon anyagvizsgálati módszerekre fogok röviden kitérni, amelyeket leggyakrabban alkalmaznak műanyagok jellemzésre, a szakítóvizsgálatot kiemelve közülük.

### **Keménység vizsgálat**

Egy anyag keménysége azt fejezi ki, hogy mekkora az ellenállása egy, a felületébe hatoló más test behatolásával, karcolásával, vagy deformációjával szemben. Ha polimerek keménységét szeretnénk megmérni, akkor a legelterjedtebb eljárás az ISO 868-as szabvány, mely két skálával dolgozik: Shore A, valamint Shore D. A Shore-féle vizsgálatkor az anyagnak egy rúgó által előfeszített, túszerű mérőműszer nyomódik neki; a műszer geometriája, valamint a benyomódás ereje a skálától függ. Minél mélyebbre hatol be a műszer, annál alacsonyabb lesz a keménységi osztályzata a vizsgált anyagnak, valamint minél keményebb az anyag, annál jobban fog ellenállni a műszernek. [40] A geometriai paraméterek, valamint a mérés elvi rajza a 3. mellékleten látható.

### **Ütésállósági vizsgálat**

Amikor egy anyagon ütésállósági vizsgálatot végeznek, akkor a mérés célja azt meghatározni, hogy az adott anyag mennyire képes ellenállni a hirtelen mechanikai behatásoknak, mennyire viselkedik szívósan. Jellemzően egy inga kalapáccsal ütést mérnek a próbatestre, amely azt áttörve továbblendül az inga túloldalára. A kalapács kitérés szöge rögzítésre kerül a kiindulási magasságban, valamint az ütés után elért maximális magasságában is. Ezen adatok, valamint az inga és a kalapács paramétereinek ismeretében kiszámítható a próbadarab törésekor elnyelt energia, amelyből az anyag ütési szilárdságáról lehet következtetéseket levonni. Ebből következően minél magasabbra lendül a kalapács az ütközés után, az anyag annál kevésbé alkalmas az ütések elnyelésére. [41] Az eljárás menetének elvi ábrája, valamint a próbatest kialakítása a 3. mellékletben látható.

## Hajlítóvizsgálat

Amikor egy anyagot hajlítóvizsgálatnak vetünk alá, akkor arról kapunk információt, hogy hogyan reagál az az adott anyag a hajlítónyomatéki igénybevételre, mennyire képes ellenállni annak. Ez legelterjedtebben úgynevezett hárompontos hajlítóvizsgálat keretein belül szokott történni, amelynek körülményeit műanyagok esetén az ISO 178-as szabvány fogalmazza meg. A vizsgálat során a próbatest két vége kitámasztásra kerül, a közepe pedig egy él mentén fokozatosan növekvő terhelésnek van kitéve. A folyamat illusztrációja az 3. mellékleten látható.

## Szakítóvizsgálat

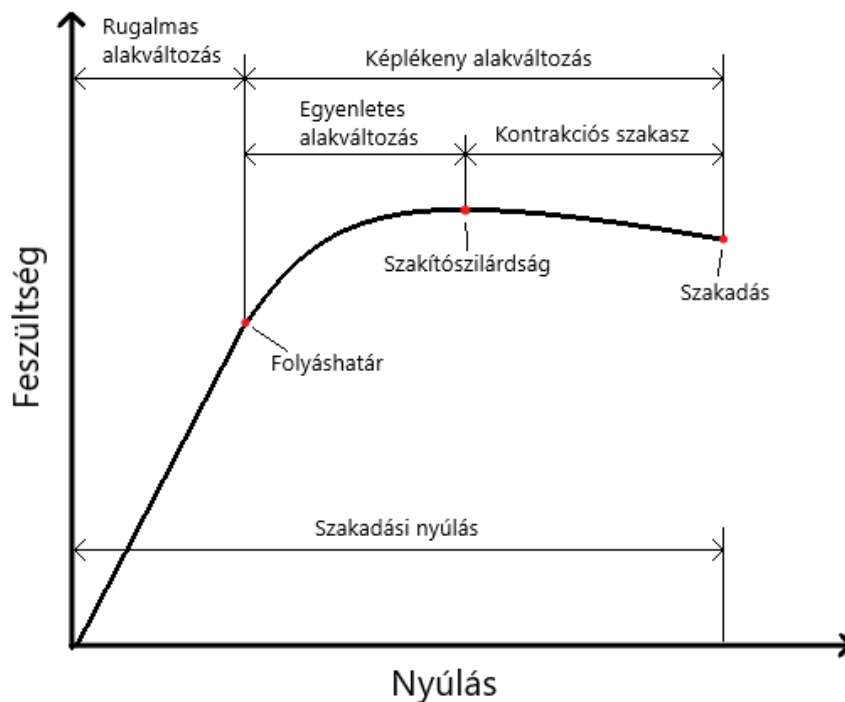
A szakítóvizsgálat egy széles körben elterjedt anyagvizsgálati módszer, melynek eredményeképp egy függvényt kapunk, mely megmutatja, hogy egy adott anyagból készült, szabványos próbatest milyen mértékben nyúlik meg a fokozatosan növekvő húzófeszültség hatására. Ezen függvényt jellemzően szakítódigramnak is szokás nevezni. A vizsgálat során a próbatestet a szakítógéppel a két végénél fogva húzza szét folyamatosan, egészen addig, amíg a mintadarab el nem szakad, rögzítve a nyúlási- és húzóerő értékeket.

A műanyagokon végzett szakítóvizsgálatokat jellemzően az ISO 527-es szabvány szerint szokták elvégezni, mellyel nyomtatott próbatestek esetén az a probléma, hogy a szabvány nem az additív gyártáshoz lett kifejlesztve. Nem veszi figyelembe a nyomtatás során kialakuló, réteges szerkezetét a próbatesteknek, így azoknak az orientációja és nyomtatási paraméterei jelentősen befolyásolhatják az eredményeket. Adrian és munkatársai egy 2023-ban publikált kutatásban [48] azt vizsgálták felül, hogy az ISO 527-es szabványban leírt próbatestek mennyire alkalmasak a nyomtatott alkatrészek vizsgálatára. Eredményül arra jutottak, hogy a jellemzően kompozit műanyagok vizsgálatára használt, ASTM D3039 szabványban meghatározott, téglatest szerű próbatestekkel megbízhatóbb eredményekkel lehet húzóvizsgálatokat végezni, feltételezhetően azért, mert jobban modellezi az additív próbatestek irányfüggő mechanikai viselkedését. A próbatestek kialakítása a 4. számú mellékleteken látható.

A szakítódigramon ábrázolt függvényt az anyag nyúlása szerint jellemzően három szakaszra szokás felosztani, melynek szemléltetésére a 2.2. ábrán egy polimerekre jellemző, feliratozott szakítódigram szolgál. Az első szakasz a rugalmas alakváltozás szakasza, melyen az alakváltozás és a húzóerő közti függvénykapcsolat közel lineáris, a terhelés megszűnése esetén pedig a mintadarab ismét felveszi eredeti hosszát. A második szakasz az egyenletes

alakváltozás szakasza, ahol már képlékenyen megy végbe az alakváltozás, mely azt jelenti, hogy a terhelés megszűnése után már nem alakítható vissza a deformáció. Elnevezését onnan kapta ezen szakasz, hogy a próbatest húzott részének keresztmetszete mindenhol azonos, egyenletes. A harmadik szakasz a kontrakció szakasza, mely akkor következik be, amikor egy ponton elkeskenyedik a mintadarab, majd ezt követően el is szakad az elvékonyodott keresztmetszet mentén. Jellemzően ezen a szakaszon már egyre kevesebb erő szükséges a próbatest további nyújtásához.

A szakítódiaagramról leolvasható nevezetes pontok többnyire ezen szakaszok kezdeteihez és végeihez köthetőek. Folyáshatárnak nevezzük azt a feszültségértéket, amely alatti terhelést az anyag még maradandó alakváltozás nélkül elvisel, ez a rugalmas alakváltozási tartomány felső határértéke. Szakítószilárdságnak azt a maximális feszültséget nevezzük, amelyet az anyag törés nélkül elbír. Ez sokszor a kontrakciós szakasz kezdetekor lép fel, de ridegebb anyagok esetén a szakadás bekövetkeztekor is lehet maximális a feszültség, vagy akár egybeeshet a folyáshatár értékével is. Az ábráról leolvasható továbbá a szakadási nyúlás is, mely az a megnyúlási érték, amelynél a próbatest szakadása bekövetkezett. Még fontos anyagjellemző a rugalmassági modulus, mely nem csak a hajlítóvizsgálat során számítható ki, hanem a szakítódiaagram alapján is meghatározható, és értéke a rugalmas alakváltozási szakaszra felírható közel lineáris egyenesnek a meredekségével egyenlő. [42][43]



2.2. ábra: Polimer anyagra jellemző szakítódiaagram. Forrás: saját szerkesztés a [44] forrás alapján.

## 2.5. Szakirodalom kritikai értékelése

Ebben a fejezetben a szakirodalom feldolgozása során érintett területeket fogom felsorolni, valamint ahol szükséges, kritikus szemlélettel kiértékelni.

Először áttekintettem néhány relevánsabb additív gyártástechnológiát, amelyek eltérő előnyöket és hátrányokat kínálnak. Az SLA kiváló részletgazdagságot és sima felületet biztosít UV-fényre keményedő gyanta felhasználásával, ellenben az így nyomtatott alkatrészek rugalmatlanok, és utókezelést igényelnek. A PolyJet technológia szintén UV fényre szilárduló gyantával dolgozik, mely nagy precizitást és színes, több anyagból álló nyomtatást tesz lehetővé, viszont magas anyagköltséggel jár. Az SLS por alapú, lézersugarakkal dolgozó eljárás, amely erős és komplex alkatrészeket eredményez, azonban költsége és nagy helyigénye hátrányt jelenthet. A Binder Jetting technológia az SLS-hez hasonlóan poralapú anyagokat használ, melyeket kötőanyaggal ragaszt össze, így lehetővé téve a nagy méretű, színes modellek készítését, amelyek viszont önmagukban gyengék, és utókezelést igényelnek. A LOM olcsón előállítható nagyméretű modellekhez ideális, azonban részletgazdagsága és geometriai szabadsága korlátozott. Végül a gyártási eljárások közül kiemelttem az FDM, azaz szálleválasztásos elven működő gépeket, melyek a nyomtatás során hőre lágyuló polimer szálból állítják elő az alkatrészt. Ezen gépek habár gyártási hatékonyságban vagy pontosságban sok esetben elmaradnak a többi technológiához képest, viszont könnyű elérhetőségük, kezelhetőségük, méretük, valamint ár-érték arányuk miatt ipari felhasználáson kívül is széles körben elterjedtek.

A második alfejezetben a legnépszerűbb filament alapanyagokat tekintettem át; az ipari felhasználásban az egyik legelterjedtebb anyag az ABS, mely a kiváló ütésállóságából, szívósságából, valamint hőállóságából is fakad, viszont körülményes nyomtathatósági tulajdonságai miatt az ipari felhasználáson kívül nem nyert magának nagy teret. A PETG nyomtatása már kevésbé körülményes, viszont meglehetősen jó tulajdonságokkal bír, ezért belőle az olyan alkatrészek nyomtatása ajánlott, melyek nagyobb igénybevételre vannak tervezve. A TPU a filamentek között egy egészen különleges tulajdonságokkal rendelkező anyagnak számít, hiszen rendkívül nyúlékony és rugalmas, remek rezgéselnyelő képességei vannak, és puhaságától függően akár hossza 10x-esére is megnyúlhat mielőtt elszakadna. Hátránya a nehéz nyomtathatóságából, valamint magas anyagárából fakad. Utoljára bemutattam a PLA-t, mely nem véletlenül a legelterjedtebb filament alapanyag: könnyen és gyorsan nyomtatható, olcsó, széles körben elérhető, de mégis strapabíró anyag. Az ABS-nél és a PETG-nél merevebb, szakítószilárdsága viszont a kettő között helyezkedik el. Egyik

legfőbb hátránya a nagyon alacsony üvegesedési hőmérséklete, viszont ennek köszönhetően nyomtatni is egyszerűbb belőle.

Továbbhaladva, áttekintettem a filament tekercsek jellemző tulajdonságait, majd kitértem az előállítási elvükre; ez igen hasonló a nagyüzemi és laboratóriumi körülmények között, a lényeges különbség a folyamatok optimalizáltsága között rejlik, hiszen az iparban a piaci versenyképesség sokkal nagyobb hatékonyságot követel meg, mint otthoni felhasználásban. Az optimális extrudálási paramétereket vizsgáló források száma csekély volt; a legjelentősebb paraméternek a henger hőmérséklete bizonyult, mely PLA esetében 180 °C környékére esett. Itt volt kisebb ellentmondás, hiszen 10 °C különbség volt a két kutatás eredménye között, viszont egy irányérték mutatósára tökéletesen megfelelnek.

Mivel az újrahasznosítás során nem kis szemcseméretű, homogén alapanyagokkal dolgozunk, hanem különböző méretű, nagyobb darabokkal, ezért újraextrudálás előtt feltétlenül szükséges az alapanyag ledarálása is, így tettem egy rövidebb kitekintést a laboratóriumi darálók felé is. Műanyagok darálása esetén szinte kizárólagosan lassú fordulató aprítókkal találkoztam, amelyekből kettő darabot be is mutattam röviden; ezek ára hasonló szinten mozgott a labor extruderekével. A filament előállítási folyamat legkritikusabb része az magában az extruder egységben történik, így itt is több internetről megvásárolható, laboratóriumi extrudernek is utánanéztem, melyek ára 800 és 2800 € között mozgott, és termelési kapacitásuk jellemzően összefüggésben is volt az árukkal. Olyan forrással nem találkoztam, amelyben filament extrudálási eljárással polimereket hasznosítottak volna újra, jellemzően kereskedelmi alapanyagból, granulátumokból állították elő a filamentet.

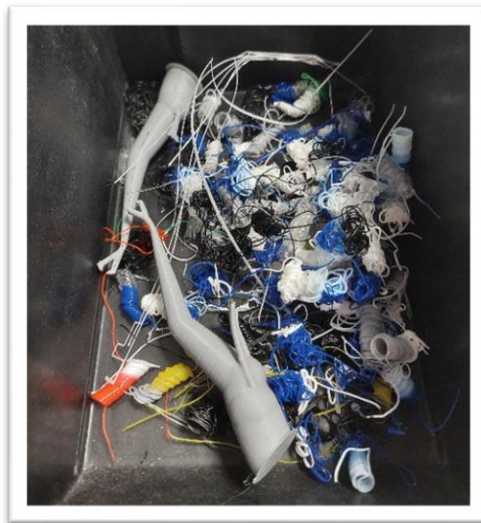
Végül átnéztem a műanyagok szilárdsági vizsgálatára leggyakrabban használt szabványosított eljárásokat; ezek mindegyike fontos vizsgálat, eredményükképp olyan anyagminőségi jellemzőket kapunk meg az adott anyagról, melyek segítségével tudjuk méretezni a belőle készült alkatrészeket és szerkezeteket, valamint számszerűen összehasonlíthatjuk azt más anyagokkal, ha egyező szabványok szerint lettek vizsgálva. Az áttekintett anyagvizsgálati módszerek közül a legjelentősebb a szakítóvizsgálat, melynek megfelelő elvégzése esetén rengeteg anyagminőségi jellemzőt nyerhetünk ki a vizsgálni kívánt anyagból.

### 3. Alkalmazott módszerek

Mint ahogy azt a bevezetésben is kitűztem, dolgozatom célja annak a vizsgálat, hogy a polimer anyagokból újrahasznosított filament mechanikai jellemzői milyen módon változnak újrahasznosítás hatására. Ehhez először áttekintettem a releváns témákhoz elérhető szakirodalmat, most pedig arra készítek tervet, hogy a vizsgálat menete hogyan fog lezajlani. Első lépésként felvázolok egy általánosan érvényes kutatási tervet, amelyben meghatározom a kutatás felhasználási célját, majd pedig készítek egy vizsgálati tervet is, amelyben annak a menetét írom le, hogy a vizsgálatom során pontosan milyen lépések mentén fogok haladni, ezt követően pedig bemutatom a vizsgálat során felhasznált eszközöket.

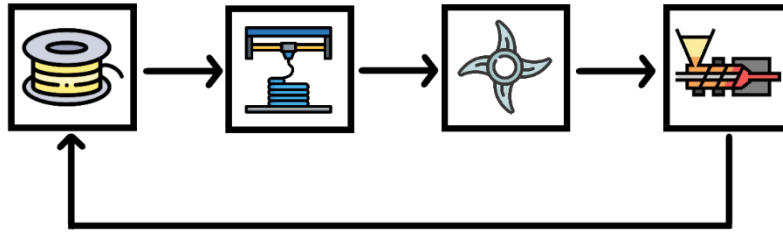
#### 3.1. Kutatási- és vizsgálati terv

Az újrahasznosítandó filament vizsgálatának kiindulási pontja az új, eredeti filament tekercs. Ebből kinyomtatásra kerül egy adott alkatrész, amelyre miután már nincsen szükség, felmerül az újrahasznosítása iránti igény. Fontos megjegyezni, hogy a nyomtatás során elkerülhetetlenül is keletkezik műanyag hulladék, amely több okból is keletkezhet; ilyen lehet például a szeletelő programtól függő, nyomtató felületre nyomtatott kalibrációs hulladék, a támaszok, több színű alkatrész esetén pedig a törőtorony vagy a filamentek cseréjéből adódó színátmeneti hulladék. A 3.1. ábrán ezek a hulladékok láthatóak.



3.1. ábra: 3D nyomtatás során keletkező technológiai PLA hulladékok. Forrás: saját készítésű fénykép

Miután összegyűjtésre kerültek az újrahasznosítandó anyagok, következik az összedarálásuk, hogy az extruder csiga képes legyen összekeverni, és kellőképpen meg tudjon olvadni az anyag. Ezt követi az extrudálás, amely eredményeképp megkapjuk az újrahasznosítással előállított filament tekercset.

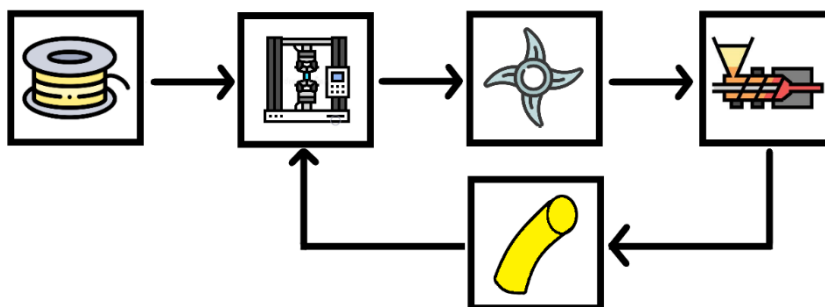


3.2. ábra: kutatási terv folyamatábrája. Forrás: saját szerkesztésű ábra, szimbólumok forrása: [45][46]

Az újrahasznosított filamenten ekkor megismételhetjük az előző lépéseket a 3.2. ábrán illusztrált módon, hiszen semmi nem szab gátat annak, hogy többször is újra lehessen hasznosítani egy adott anyagot, viszont aggályos, hogy a filament szál minden alkalommal amikor újrahasznosításra kerül, akkor degradálódnak az anyagjellemzői. Hogy ezt ki lehessen deríteni, szükséges a vizsgálati terv, amelyben kifejtem, hogy milyen módon is fogom megvizsgálni ezen változásokat, feltéve, hogy az újrahasznosítás hatással lesz egyáltalán a szilárdsági jellemzőire a filamentnek.

A vizsgálati tervnél a kutatási tervhez hasonlóan, vizsgálataim kiindulási anyaga az eredeti filament tekercs. Itt viszont egyből felmerül egy jelentős eltérés; a filament nem fog átmenni a nyomtatási folyamaton, nem az irodalomfeldolgozásban említett szabványos próbatestekben fogom az anyagvizsgálati méréseket elvégezni, hanem egy speciális befogó fejen keresztül közvetlenül a szálát fogom vizsgálni, több okból is. Ennek az egyik oka az, hogy ha a nyomtatási folyamaton is átmenne, akkor plusz bizonytalanságot adna a méréshez a nyomtató pontossági szórása. A másik ok pedig az, hogy így a tömör filament szálról fogok eredményt kapni, így a lehető legközvetlenebbül fogom tudni összehasonlítani az eredeti szállal az újrahasznosított darabokat.

Az eredeti szálakon történő szakítóvizsgálat elvégzése után már a kutatási terv során is ismertetett lépések fognak következni, melyek a 3.3. ábrán láthatóak; a filament szál ledarálásra kerül, majd az extrudáló berendezéssel újra filamentet állítok elő belőle, az így kapott szálakat pedig ismét szakítóvizsgálatnak vetem alá, majd megismétlen a folyamatot.



3.3. ábra: vizsgálati terv folyamatábrája. Forrás: saját szerkesztésű ábra, szimbólumok forrása: [45][46][47]

## 3.2. Felhasznált gépek és eszközök

Az alábbi fejezetben azon gépek és eszközök műszaki jellemzőit fogom ismertetni a 3.1. táblázatban, amelyeket a vizsgálat során felhasználtam.

3.1. táblázat: A mérések során felhasznált gépek és eszközök. Forrás: saját készítésű fényképek

Műszaki jellemzők	Berendezések
<p><b>Késes daráló</b>            Szériaszám: 1166            Modell: Mkynek lab HZ-1            Névleges feszültség: 230 V            AC kialakítás            Névleges felvett áram: 6,3 A            Üzemi frekvencia: 50 Hz            Beállítható darálási időzítővel rendelkezik            Helyszín: MATE AGFO Labor, Gödöllő</p>	
<p><b>Extrudáló berendezés</b>            Modell: Wellzoom filament extruder B            Extrudálási sebesség: 0,25~0,66 m/perc            Felszerelt fűvóka átmérője: 1,75 mm            Névleges pontosság: +- 0,05 mm            Max hőmérséklet: 300°C            PID szabályozás pontossága: +- 1°C            Teljesítmény: 120 W            Helyszín: MATE AGFO Labor, Gödöllő</p>	
<p><b>Digitális tolómérő</b>            Mérési tartomány: 150 mm            Mérési felbontás: 4 digit / 0,01 mm            Mértékegység: hüvelyk / milliméter            Helyszín: MATE AGFO Labor, Gödöllő</p>	
<p><b>Szakítógép</b>            Típus: Instron 5965            Maximális terhelhetőség: 5 kN            Fügőleges vizsgálati tér: 1256 mm            Visszatérési sebesség: 3200 mm/perc            Cserélhető befogó fejek            Adatátviteli szoftver: Bluehill 3            Gyártási év: 2011            Teljesítmény: 500 W            Helyszín: MATE Gépszerkezettani Labor, Gödöllő</p>	

## 4. Vizsgálati eljárás részletes bemutatása

Ebben a fejezetben azt fogom részletesen ismertetni, hogy az újrahasznosítási folyamat és a vizsgálandó próbadarabok előkészítése, valamint vizsgálata során milyen lépések szerint haladtam, milyen paraméterekkel dolgoztam az egyes gépeken, valamint milyen megfigyeléseket tettem.

Azt fontosnak tartom már az elején kiemelni, hogy a szabványos 1,75 mm szálátmérő elérése és fenntartása nem volt célja a vizsgálataimnak, hiszen a dolgozatomnak nem egy gyártói paraméterekkel rendelkező filament reprodukálása volt a célja, hanem az újraextrudálást követő mechanikai anyagjellemzők romlásának kimutatása, vizsgálata, amely eredmények eltérő szál átmérők mellett is jól összehasonlíthatóak. A szálak keresztmetszetének folytonossága ebben viszont kritikus szerepet játszik, hiszen a szakítóvizsgálatnál feltételezhetően ott fog elszakadni a szál, ahol a keresztmetszete a legkisebb, amely mérési bizonytalansághoz, pontatlansághoz vezethet. Hogy ezt elkerülhessem, a filamentek extrudálása során elsődlegesen arra törekedtem, hogy elő tudjak állítani olyan szálakat, melyek átmérőjének tűrése egy kis tartományon belülre esik.

### 4.1. Alapanyagok előkészítése

Vizsgálataim során két alapanyaggal dolgoztam: az egyik a vizsgálandó alapanyag volt, míg a másikat az extruder tesztelésére és kísérletezésre használtam, hogy a szakítandó anyagnál már célirányosan a megfelelő paramétereket és eljárást használjam.

Az extruder bejáratásához használt alapanyag egy sárga színű PLA volt, mely különböző nyomtatási hulladékok formájában állt rendelkezésemre. A kiindulási hulladék a 4.1. ábrán látható.



4.1. ábra: PLA nyomtatási hulladék. Forrás: saját készítésű fénykép, MATE AGFO Labor, Gödöllő.

A vizsgálat alapjául szolgáló anyag egy SUNLU gyártmányú, fehér színű, 1,75 mm szálátmérőjű PLA filament tekerecs, mely a 4.2. ábrán látható. A gyártó által meghatározott anyagjellemzői a következők: [53]

- Szakítószilárdság: 61 MPa  
(ASTM D638)
- Young modulus: 3500 MPa
- Nyúlás szakadáskor: 3,1 %
- Lágulási hőmérséklet: 63 °C
- Olvadáspont: 164 °C
- Nyomtatási hőmérséklet: 200-210 °C
- Sűrűség: 1,23 g/cm<sup>3</sup>



4.2. ábra: Vizsgált filament. Forrás: saját készítésű fénykép, MATE AGFO Labor, Gödöllő.

## 4.2. Darálék előállítása

A darálék előállításához a 3.2. fejezetben ismertetett laboratóriumi késes darálót, valamint egy kézi erővágót használtam. Az erővágóra azért volt szükség, hogy az alapanyagot kellően kis méretűre tudjam darabolni a daráló számára. A sárga PLA és a filament szál mivel különböző formában álltak rendelkezésemre, ezért a darálás előtti előkészítésük is kissé eltért egymástól; először ismertetem a nyomtatási hulladék aprítása során gyűjtött tapasztalataimat, majd folytatom a vizsgálati filamenttel.

Fontos különbség volt a két alapanyag között, hogy mivel a nyomtatási selejtek és hulladékok anyaga technológiai okokból nem tömör, ezért a darálónak is könnyebb dolga volt a darálásuk közben. Ebből főleg két dolog következik; egyrészt a hulladékokat elegendő volt nagyobb darabokra szeletelni, ez a darálónak nem okozott gondot, másrészt a darálás utáni végeredmény egy sokkal finomabb darálék lett. Egy adagnyi darálékhoz körülbelül 60%-osan töltöttem meg a csészét, azt követően pedig három ciklusban daráltattam le, 4 másodperces intervallumokban. Azért a 60%-os feltöltésre törekedtem, mert nagyobb mennyiség esetén egyrészt kockázatot jelentett volna a pengét forgató motor indítási túlterhelése, másrészt lehet, hogy nem tudtam volna felszerelni a darálóra az alapanyagot is tartalmazó csészét, melybe a

PLA-t pakoltam. A darálási időnek azért csak 4 másodpercet állítottam be, mert aprítás közben a pengék és ezáltal a műanyagok is jelentős hőmérséklet emelkedésen mennek át, amely a már finomabbra darált port könnyen megolvaszthatja.

A vizsgálandó filament darálása esetén is hasonló eljárást követtem, kisebb eltérésekkel. Mivel itt nagyobb, egyező méretű darabkák kerültek betöltésre a darálóba, ezért a megolvadás nem okozott akkora fenyegetést, így kétszer 5 másodperces ciklusban végeztem el a darálást. Ezt követően granulátum szerű darálékot kaptam, melyben a szemcseméreték igen nagy tartományon belül vettek fel értékeket, 1- és 15 mm között. A darálékok kiindulási és aprítást követő állapota a 4.1 táblázatban látható.

4.1. táblázat: PLA darálást megelőző és követő állapota. Forrás: saját készítésű fényképek, MATE AGFO Labor, Gödöllő.

	Kiindulási állapot	Darálást követő állapot
Hulladék filament		
Vizsgálandó filament		

### 4.3. Extrudálás

Ezen fejezetben szintén először leírom, hogy a kísérleti sárga PLA-val milyen lépések szerint haladtam, ezeknél milyen tapasztalatokat gyűjtöttem, végül pedig, hogy milyen paraméterekkel értem el a legjobb eredményt. Ezek után a fehér PLA-nál már nem térek ki minden részletre, hanem csak a kifejezetten hozzá kapcsolódó tapasztalatokra, részletekre.

### 4.3.1. Extrudálás előkészítése, elindítása

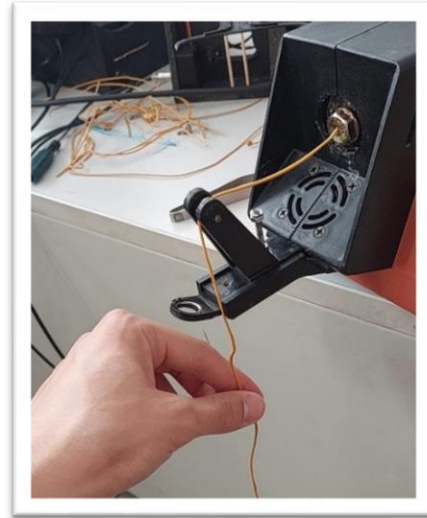
Az extrudálás első lépéseként beletöltöttem a filament darálékot az adagoló tölcserbe, majd ezt követően a PID szabályzón beállítottam a fűtőegység hőmérsékletét 200°C-ra. Nagyon fontos megjegyezni, hogy hidegen, vagy ameddig nem ért el egy kellő hőmérsékletet a fűtőegység, addig nem szabad beindítani az extruder csigáját, mert a hideg darálék vagy granulátum megakadhat a csigában, ami a motor és a hajtás károsodásához vezethet, vagy a csiga és a henger felülete megsérülhet a súrlódás és a túlzott terhelés következtében. Miután kellően felmelegedett a henger, a csigát a legalacsonyabb fordulatszámra állítva el lehet indítani, hogy a kezdeti szükséges indítási nyomaték meglegyen a darálék ellenállásának leküzdésére. Ezt követően lehet a csiga fordulatszámát emelni, ha pedig az anyag elérte a fűvókát, akkor onnantól már a filament is jönni fog az extruderből. Ha nem az üres extruderbe töltjük be az alapanyagot, hanem már alapból volt benne darálék, akkor is ugyan ezen szempontokra kell odafigyelni, viszont ott a motor beindítását követően már azonnal jönni fog a filament szál.

Onnantól, hogy a fűvókából jön ki az olvadt filament, nem szabad hagyni, hogy lefolyjon, mert akkor csak ráolvadna a fűvókát körülölelő területre, valamint a ventilátorra is rá tudna folyni. Helyette érdemes például egy csipesz segítségével megfogni a filament végét, és tartani a 4.3. ábrán látható módon, valamint húzni olyan tempóban, amilyenben a csiga nyomja át a fűvókán az anyagot. Ha ennél gyorsabban húzzuk, akkor a filament szál megnyúlik, ha pedig lassabban, akkor meg a szükségesnél jobban fog lelőgni a filament a fűvóka utáni részen, ami azért nem előnyös, mert akkor görbülten fog lehúlni. Miután már elegendő hosszúságú filament szálát sikerült így előállítani, akkor igény szerint már lehet gondoskodni a felesévéletről, vagy a szál manuális adagolásáról.

A filamentek extrudálása során nekem az a módszer bizonyult a leginkább egyszerűnek és pontosnak, hogy a már elegendő hosszúságú filamentet elhúztam az extruder elején található kalibráló egység felső vezető csigájáig, majd onnan szinte önmagával derékszöget bezárva egyenletesen lefelé húztam a szálát, úgy, hogy a fűvóka utáni résznek legyen egy minimális belógása, de ne túl sok. Erre a fentebbi bekezdésben ismertetett okokból volt szükség; a szál nyúlásának vagy görbülésének elkerülése. A 4.4. ábrán egy fénykép látható, melyet ezen szempontoknak megfelelően, a filament húzása során készítettem.



4.3. ábra: filament végének megfogása a kezdeti fázisban. Forrás: saját készítésű fénykép, MATE AGFO Labor, Gödöllő.



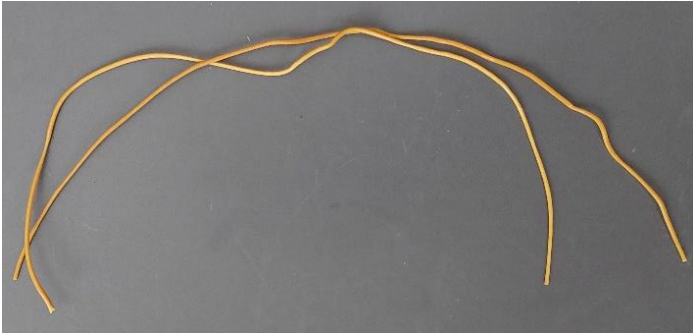



4.4. ábra: Filament manuális húzása, tartása. Forrás: saját készítésű fénykép, MATE AGFO Labor, Gödöllő.

A motor fordulatszámát közvetlenül a beindítást követően minimális értéken tartottam. Nem csak a magas indítási nyomaték miatt, hanem a filament könnyebb kezelhetősége miatt is; magas fordulatszám esetén a filament sokkal gyorsabban jött volna ki a fűvókából, amely egy már bejáratott folyamat esetén előnyös, de a kezdeti fázisban csak megnehezítette volna a szál irányítását a túlságosan képlékeny állapot és egyenetlen húzás miatt. Miután sikerült átvezetnem a szálát a terelő csigán, és kellő hosszúságú, egybefüggő szállal rendelkeztem, akkor már magabiztosan növeltem a motor fordulatszámát, akár maximális értékre is. A filament húzását kézileg végeztem, mert egyrészt nem volt szükség nagy mennyiség újraextrudálására, így nem származott volna sok előnyöm egy megfelelően működő felcsévélő mechanizmus összeállításából, másrészt így nagyobb ráhatásom volt a filament szál átmérőjének értékére, valamint folytonosságára.

#### 4.3.2. Extrudáló csiga fordulatszáma

Az extrudáló csiga megfelelő fordulatszámának beállítása kritikus tényező a filament előállításánál, hiszen egyrészt ettől függ, hogy adott idő alatt mekkora hosszúságú szálát vagyunk képesek előállítani, másrészt pedig a szál jellemzőire is közvetlenül vagy közvetve hatással van, mint például hogy a lehülési fázisban mennyire görbül meg, a keresztmetszete mekkora és értéke mennyire folytonos. Az ideális fordulatszám keresése során négy fő értéket vizsgáltam, melyek a következők: a potméteren beállítható legalacsonyabb érték (minimális fordulatszám), a potméter 50%-ra állítva, 75%-ra állítva, valamint teljesen feltekerve (maximális fordulatszám). A beállított hőmérséklet minden sebességnél azonos volt; 180°C. A teszt eredményei a 4.2. táblázatban láthatóak.

4.2. táblázat: Különböző hőmérsékleten extrudált filament szálak összehasonlítása.  
 Forrás: saját készítésű fényképek. MATE AGFO Labor, Gödöllő

<b>Tapasztalatok</b>	
<b>Potméter minimumon</b>	<p>A filament szál túl hamar kihűlt, még az előtt, hogy ki tudott volna egyenesedni, ezért jelentős görbülések lépnek fel a szálon. Az átmérő szórása jelentős volt, 1,5 és 2 mm között mozgott, az átlagos átmérő körülbelül 1,75 mm lett.</p> 
<b>Potméter 50%-on</b>	<p>Kisebb görbületek még előfordultak a szálon belül, de már nem olyan mértékben, mint minimális fordulatszámnál. Az átmérő szórása még mindig számottevő volt, 1,6 és 1,95 mm között vett fel értékeket, de legjellemzőbben az átmérő 1,65 mm körül volt.</p> 
<b>Potméter 75%-on</b>	<p>Kisebb görbületek itt is megfigyelhetők, viszont az átmérő szórása már kisebb volt, jellemzően 1,6 mm körüli értéket vett fel a szálátmérője.</p> 
<b>Potméter maximumon</b>	<p>Itt már a szálak görbülése minimálisnak mondható, az átmérőjük egyenletes, megfelelő húzás mellett könnyedén egy kisebb tűrésmezőn belül tartható volt. Amire figyelni kellett, hogy a szál érzékenyebb a húzásra, könnyebben megnyúlt.</p> 

Mindent összevetve a maximális fordulatszám mellett kaptam a legkedvezőbb eredményeket, hiszen egyrészt a folyamat is így volt a leggyorsabb, másrészt a szál átmérőjének egyenletessége is így volt a leginkább folytonos. Ebből következően a vizsgálandó PLA szálakat már célirányosan maximális fordulatszámmal fogom extrudálni. Ez a fordulatszám a berendezés műszaki leírása alapján 660 mm/perc előtolási sebességnek feleltethető meg, mely eltér a szakirodalom feldolgozásában említett 490 mm/perc ideális sebességtől. [35] Ezen ellentmondás következhet az extruder berendezések különbözőségeiből, a PLA-k különböző összetételéből, vagy akár a filament szál elvezetési és felcsévélési módszerének eltérésétől.

### **4.3.3. Extrudálási hőmérséklet**

Az extruder csiga fordulatszáma mellett a másik nagyon fontos paraméter az extruder henger hőmérséklete. Ha túl alacsony, akkor a darálék nem olvad meg kellőképpen, ezért az egyenetlen áramlású, magas viszkozitású massa túlterhelheti a csigát hajtó motort, a nagyobb darabkák keverés közbeni eltörése is nagyobb terhelés jelent, valamint a filament minősége is rosszabb lesz a nem megfelelő elkeveredés következtében. Ha pedig túl magas a hőmérséklet, akkor a magas viszkozitás miatt a fűvókát frissen elhagyó, még olvadt filament sokkal nehezebben lesz kezelhető.

Az ideális hőmérsékleti tartomány egyszerre széles és nehezen behatárolható; de körülbelül úgy tapasztaltam, hogy 175 és 195 °C közötti hőmérsékleteken nincs lényegesebb eltérés. Ha ennél kisebb a hőmérséklet, akkor még egy darabig a filament minőségében nem lesz szemmel látható romlás, viszont a csiga hangján már hallani, hogy nagyobb kihívást jelent számára a darálék keverése, törése, előtolása. Ha ennél magasabb a hőmérséklet, akkor az olvadt polimer illatán kezd egy változás megjelenni, valamint a magasabb viszkozitás és hosszabb lehűlési idő is érezhetővé válik, hiszen a szál előfeszítését biztosító húzás hatására a szál már nem kiegyenesedik, hanem megnyúlik, elvékonyodik.

Mindezek tekintetében a bizonytalanul meghatározott tartománynak a középértéket választottam ki a további vizsgálatok lebonyolításához, amely így 185 °C lett. Ezen értéket egy a szakirodalomfeldolgozásban is említett kutatás is alátámasztotta [35], mely ideális hőmérsékletnek 184 °C-ot hozott ki eredményül.

#### **4.3.4. Vizsgálható PLA extrudálása**

A vizsgált PLA-ból a fentebb említettek szerint maximum fordulatszámon és 185 °C hőmérsékleten állítottam elő filamentet. A szakítóvizsgálathoz megfelelő szálak előkészítésének az volt a kritériuma, hogy körülbelül fél méteres hosszúságú, a hossz teljes mentén közel állandó átmérőjű szálakat tudjak félretenni. Ebben az esetben a közel állandót egy  $\pm 0,05$  mm-es tűrészónával határoztam meg; ha a szál legnagyobb és legkisebb átmérőjének a különbsége nagyobb volt mint 0,1 mm, akkor a szál nem felelt meg.

Eleinte extrudálás közben is ráellenőriztem a filament átmérőjére, viszont ez sokszor megszakította a szál előhúzásának folytonosságát, mivel nem tudtam teljesen odafigyelni a húzására. Ezért inkább úgy csináltam, hogy kivártam, amíg összegyűlik egy elegendően hosszú, szemrevételezés alapján egyenes szakasz, azt csípőfogóval gyorsan elvágtam, majd félretettem és folytattam tovább a folyamatot. Miután már több szál is összegyűlt, akkor végigmértem az összes szálát a tolómérőn lassan áthúzva, úgy, hogy a tolómérő minden pontban rászoruljon a szálra, majd különválogattam a megfelelő és nem megfelelő szálakat. Ha valamelyik nem megfelelő szálnak csak a szélén volt nagyobb eltérés, akkor előfordult, hogy a rossz részt lecsíptem belőle, a maradékot pedig a jó darabokhoz raktam.

A mérésekhez újrahasznosítási lépcsőfokok szerint 6 darab szálát tettem félre. A ledarált filament mennyiségből annyit extrudáltam újra, hogy legyen 6 jó mintadarabom, valamint ezen felül még annyi filamentet, hogy azok ismét ledarálva is biztonságosan elegendőek legyenek további 6 darabra. Miután megtörtént a kellő mennyiségű filament extrudálása, félretettem a mintadarabokat, a többi filamentet pedig ledaráltam. Ezt követően ismét megvártam, hogy kifusson az éppen benne lévő filament, majd betöltöttem az újextrudált filament darálékát. Ebből szintén 6 mintadarabot tettem félre, a fent ismertetett mód szerint.

#### **4.4. Szakítóvizsgálat**

Miután elkészültem az összes mintadarabbal, következett az anyagvizsgálat, melyre a legtöbb anyagjellemzőt kimutató módszer a szakítóvizsgálat. A mérés során kettő paramétert vizsgáltam; a szakítószilárdságot, valamint a kontrakciós szakasz arányát a teljes nyúlási hosszhoz viszonyítva. Az előbbi mutató az anyag legnagyobb szakadás előtt felvett feszültségét mutatja meg, az utóbbi pedig az anyag szivóssági tulajdonságiról enged következtetéseket levonni.

Ezen két paraméteren felül szándékomban állt kifejezni a mintadarabok rugalmassági modulusát és szakadási nyúlását, viszont a mérés körülményei miatt ezeknek a megbízható kiszámítására nincs lehetőség, mivel relatív nyúlást nem tudok mérni. Habár a pofák kezdeti, valamint a szakadás pillanatában mért távolsága rendelkezésemre áll, a befogó pofák lentebb taglalt kialakítása következtében a filament szálak pontos befogási hossza nem mérhető le egyértelműen, hiszen a szál rátekerése miatt nincs egy pontosan behatárolható kezdőpont, így nehéz meghatározni, hogy a pofán belül pontosan hol kezdődik a rögzítés. A másik, és egyben jelentősebb probléma, az a filament szálak megcsúsúzása a húzás közben. A megcsúszások pillanatában a pofák úgy távolodnak el egymástól, hogy közben nem növekszik az általuk kifejtett húzóerő, sőt, jellemzően csökken is, viszont a feszültség-nyúlás diagramon mindez a távolság ugyan olyan nyúlásnak számít, mint amikor tisztán nyúlik a mintadarab. Mindezek következtében a diagram torzul, a mérési eredményekről pedig nem lehet megbízható következtetéseket levonni. Erre a problémára megoldást jelenthetne egy úgynevezett extenzométer, közismertebb nevén nyúlásmérő berendezés használata, mely abban az esetben alkalmazható is lenne, ha behatárolható lenne egy kisebb szakasz, ahol a szakadás várhatóan végbemenne, viszont ebben az esetben a megcsúszások és minden egyéb körülmény figyelembevételével könnyen lehet, hogy a szakadás nem a kezdeti, pofák közti befogási szakaszon menne végbe, hanem azon kívül, amelyet nem lehet a nyúlásmérővel vizsgálni, hiszen a mintadarabok közel állandó keresztmetszete miatt bárhol bekövetkezhet a szakadás.

A szakítóvizsgálatokat a 3.2. fejezetben ismertetett Instron gyártmányú szakítóvizsgáló géppel végeztem el. A fejezetet az előkészített minták ismertetésével fogom kezdeni, majd egy próbaszakításon keresztül bemutatom a vizsgálat menetét, lépéseit, végül pedig ismertetem a mérések lefolyását, és a mérések során gyűjtött tapasztalataimat.

#### **4.4.1. Mintadarabok előkészítése**

Mint az előző fejezetben már említettem, a méréseket 6 mintadarabon végeztem el, 3 féle újrahasznosítási állapotot elkülönítve; a 0. állapot az új, eredeti filament, az 1. állapot az új filament ledarálásából és újraextrudálásából kapott filament, a 2. állapot pedig ennek az újrahasznosított filamentnek az ismételt újrahasznosításával kapott filament. Az így, lépcsőfokként elkülönített mintadarabok az 5. mellékletben találhatóak. Így összesen 18 szálát szakítottam el a vizsgálat során, valamint ezen felül egy darab eredeti filament szálát.

#### **4.4.2. Próbaszakítás, szakítóvizsgáló használata, mérési paraméterek**

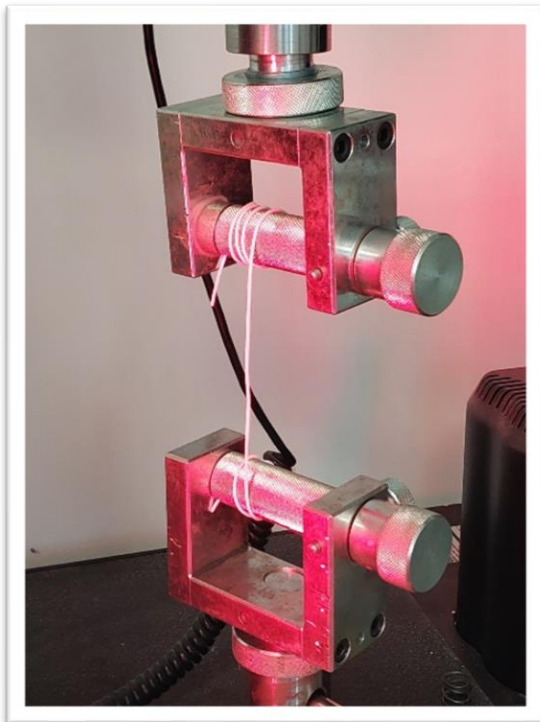
Miután már rendelkezésemre állt minden szükséges mintadarab, következett a szakítóvizsgáló gép beüzemelése és használata. Első lépésként áram alá kellett helyezni a berendezést a főkapcsoló használatával, majd be kellett kapcsolni a hozzá tartozó számítógépet, valamint elindítani az Instron Bluehill nevű szoftvert.

A szoftver kifejezetten kutatási célokra készült, az Instron univerzális anyagvizsgáló gépekhez kifejlesztve, az adatgyűjtési és vezérlési feladatokat ellátva. Tartalmaz előre definiált vizsgálati sablonokat, amelyek megfelelnek az általánosan alkalmazott szabványoknak, de egyéni sablonokat is létre lehet hozni. A vizsgálatokhoz beállíthatóak a méréshez tartozó paraméterek, mint például a vizsgálati sebesség, előterhelés, illetve a megszakítási feltételek. A vizsgálat során a szoftver közvetlenül kapcsolatban áll a berendezés terhelőmechanizmusával és érzékelőivel, ezáltal valós időben meg is jeleníti a mért értékek görbéjét, például az erő – elmozdulás alapú szakítódiagramot. A mérést követően az eredmények könnyen exportálhatóak különböző formátumokban, mint például Excel, PDF, CSV, valamint riportgeneráló funkcióval is rendelkezik a szoftver, a szabványos dokumentálás folyamatát elősegítve.

A filament szálaknak a berendezéshez való rögzítése a befogó pofákon keresztül történik. Az univerzális szakítóvizsgálógépek egyik előnye, hogy a rajta található pofák bármikor könnyedén cserélhetőek a különböző alakú próbatestektől függően. A befogófejek a keresztfejekon keresztül kerülnek rögzítésre a berendezés szerkezetéhez, mely keresztfejekhez rögzítőcsapok segítségével vannak illesztve a pofák. A mintadarabok befogásához a filamentek szakítóvizsgálatához tervezett rögzítőfejek lettek alkalmazva. A szerkezet célja, hogy a kis átmérőjű, csúszásra hajlamos mintadarabok megbízható rögzítését biztosítsa, minimalizálva azok kicsúszásának vagy idő előtti károsodásának esélyét.

A befogópofa fő szerkezeti eleme a tömör fémház, mely közepén egy hengeres tengely helyezkedik el. A tengely felületét érdesítés borítja, mely a filament és a fémfelület közti súrlódási tényezőt segít maximalizálni, a közepén pedig egy, a filament átfűzésére kialakított, ékszerű horony található, mely a henger teljes hosszát átíveli. A tengely egy nagy méretű, szintén érdesített fogantyúval forgatható, mely lehetővé teszi a tengely kézi elforgatását. Hogy el lehessen forgatni, ahhoz egy oldalirányban elhelyezett csapot el kell távolítani, mely a hengerben kialakított furaton keresztül áthaladva nem hagyja azt elfordulni a fémházhöz képest, amíg be van helyezve.

Miután sikeresen kicseréltem a befogófejeket, következett a filament rögzítése. Ehhez először a felső pofa lefele mozgatásával csökkentettem a pofák közti távolságot, hogy elegendő legyen a szál hosszúsága, majd az alsó pofából kihúztam az elfordulás elleni rögzítő csapot. Ezt követően a horony szűkebb végén keresztül átfűztem a szálát, úgy hogy csak egy minimálisan lógjon túl, majd ügyelve rá, hogy a filament ne csússzon ki a horonyból, kettő alkalommal teljesen elfordítottam a tengelyt, majd visszahelyeztem a csapot a furatba. Azért szükséges körbetekerni a filamentet a tengely körül, hogy a kötél súrlódás elvénél fogva minél nagyobb súrlódási erő tartsa stabilan a szálát, lehetőleg csúszásmentesen. A filament alsó pofába való rögzítése után ugyan ezt megismételtem a felső pofa esetén, majd a kezelőpanel segítségével akkora távolságra vittem egymástól a két pofát, hogy a szál éppen ne legyen teljesen feszes, viszont legyen kiegyenesedve is. Az így befogott és vizsgálatra előkészített eredeti filament szál a 4.5. ábrán látható. Ezt követően a szoftverben a „Balance Load” paranccsal nulláztam a terhelés értékét, ezáltal a pillanatnyilag mért erőértéket fogja nullának, így a kiindulási pontnak tekinteni, ennek megfelelően a vizsgálat során kizárólag a mintadarab tényleges terhelésváltozásai jelennek meg. A terhelés viszonyítási pontjának megadása után a gép automatikusan 5 N erővel előterheli a szálát, ezzel is biztosítva a minta feszességét. Ezt követően elindítottam a mérést, a filament szálát pedig egészen addig húzta a gép, ameddig az el nem szakadt, a 4.6. ábrán látható módon.



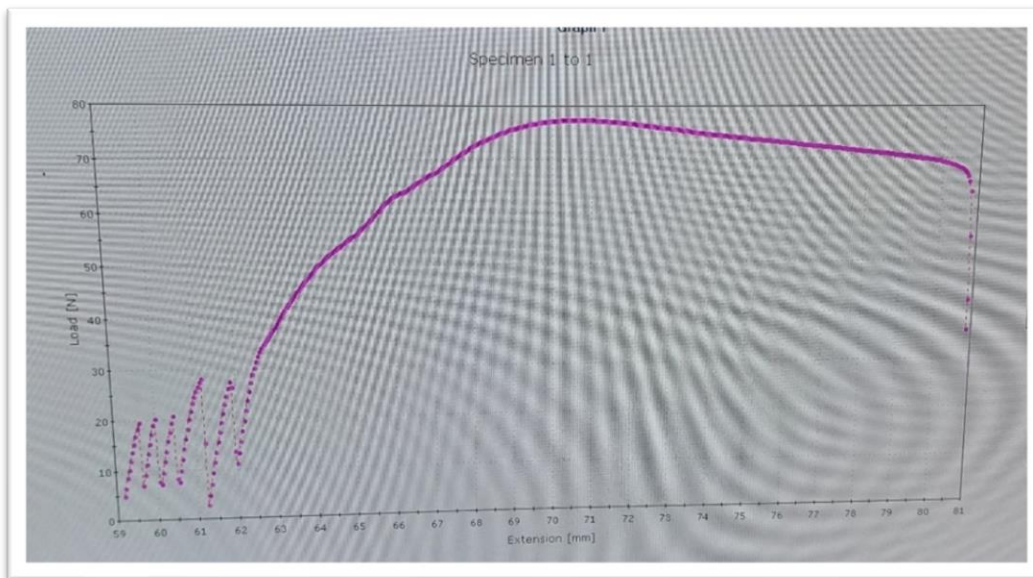
4.5. ábra: A filament befogva a pofák közé.  
Forrás: saját készítésű fénykép, MATE  
Gépszerkezettani Labor, Gödöllő.



4.6. ábra: Az elszakított filament szál. Forrás:  
saját készítésű fénykép, MATE Gépszerkezettani  
Labor, Gödöllő.

A pofa húzási sebességére 40 mm/percet állítottam be, mert a szakítószilárdság erőértékét így is pontosan képes volt meghatározni, valamint a mérések is viszonylag gyorsan lezajlottak. A mérés automatikus befejezésének azt a kritériumot adtam meg, hogy álljon meg, ha a mért erő legalább 40%-kal visszaesik az aktuális maximumhoz képest, hiszen szakadás esetén jelentősen visszaesik a terhelés értéke. Azért 40%-ra esett a választás, mert ha csak kicsit csúszik meg a szál szorítása, de nem enged el, akkor visszaesés lehet a húzóerő értékében, viszont a mérés ettől eltekintve még pontos eredménnyel szolgálhat vissza. Ha ennél nagyobb mértékben csúszna meg, akkor viszont már inkább újra rögzítem a szálát, hogy ne kapjak téves eredményt, hiába lehet, hogy nem csúszott ki teljesen a horonyból a filament.

A mérés során a szoftver folyamatosan rajzolta ki a mérés szakítódigramját; a pillanatnyi húzóerőt a két pofa közti távolság függvényében, mely értékek 0,1 másodpercenként kerültek rögzítésre. A próbamérés során kirajzolt görbéről készített fénykép a 4.7. ábrán látható.



4.7. ábra: Az eredeti filament szakítódigramja. Forrás: saját készítésű fénykép, MATE Gépszerkezettani Labor, Gödöllő.

A diagramról több dolog is leolvasható; a húzás első 3-4 milliméterében enyhe kilengések láthatóak a húzóerő értékében; ez a filament enyhe megcsúszásainak köszönhető, viszont utána láthatóan sikerült stabilizálódnia. Ezt követően a további 7 mm-ben fokozatosan növekedett a felvett terhelés, majd körülbelül 78 N környékén csúcsosodott, és csökkenni kezdett a húzóerő a távolság növekedésével, egészen ameddig 67 N körül el nem szakadt, 20 mm nyúlás után. Ez az ábra jól tükrözi a 2.2 ábrán látható, polimerekre jellemző szakítódigramot; habár a folyáshatár értéke nem olvasható ki egyértelműen, a szakítószilárdság értéke viszont egyértelmű, melyet egy hosszú kontrakciós szakasz követ.

### 4.4.3. Mérések elvégzése, mérési tapasztalatok

Miután sikeresen elvégeztem a próba szakításokat, készen álltam a tényleges mérések elvégzésére is. Ezek többnyire gond nélkül lezajlottak; egyszer fordult elő, hogy az egyik eredeti filament szál mérését újra kellett végezni, mert a filament kicsúszott a pofából a mérés közben, de az újravégzett mérés már megfelelő eredményt adott. Néha a mérések során a kirajzolt görbe szaggatott volt a filament befogásának kisebb megcsúszásai miatt, mely főleg az egyszerűen újrahasznosított filamenteknél fordult elő. A filamentek pofába való befogása során a próbákhoz hasonlóan arra törekedtem, hogy kétszer teljesen legyenek körbetekerve a henger körül, viszont, ha a minta nem volt elegendő hosszú hozzá, akkor esetenként csak egyszer fordítottam körbe, mely jellemzően még így is megfelelő súrlódási erőt biztosított, viszont nagyobb esélye volt a kicsúszásra.

A mérések technikai körülményeinek tisztázása után érdemes megvizsgálni magának a filamentnek a szakadás közbeni viselkedését; a 4.8. ábrán egy a szakítóvizsgálat után lefotózott mintadarab látható, a szakadás helyénél. A szál eredeti átmérője 1,65 mm volt, míg a megnyúlt, elvékonyodott szakaszon 0,9 mm-re csökkent. Ez az úgynevezett nyakasodás jelensége, mely az anyag kontrakciós szakaszban végbement nyúlásának a következménye. A szakadás előtti jelentős átmérő csökkenés arra utal, hogy az anyag nem rideg módon tört el, hanem előtte jelentősen megnyúlt, maradandóan. A nyak kialakulása után a terhelés további növekedésével a lokális deformáció egyre inkább koncentrált erre a szakaszra, míg végül akadt egy olyan keresztmetszete a filamentnek, amely nem tudott tovább ellenállni, és bekövetkezett a szakadás. Mindez kivehető az ábráról is, mely tehát jól szemlélteti az új állapotú filament szálak szívós viselkedését, amikor a szál jelentősen megnyúlik, majd a leggyengébb pontján, a legkisebb keresztmetszet helyén elszakad.



4.8. ábra: PLA filament szakadás előtti nyakasodása. Forrás: saját készítésű fénykép, MATE Gépszerkezettani Labor, Gödöllő.

## 5. Eredmények és értékelésük

Az alábbi fejezetben a szakítóvizsgálatok során kapott mérési eredményeket fogom bemutatni, kiértékelni. A feldolgozás során táblázatok és szakítógörbék segítségével ismertetem a kapott adatokat, valamint az ezekből számított anyagjellemzőket. Az eredmények értékelését követően összehasonlítom őket statisztikai módszerekkel, valamint mindhárom újrahasznosítási „lépcsőfok” legjellemzőbb nyúlás-feszültség görbéinek összevetésével is.

### 5.1. Mérési eredmények, számított anyagjellemzők bemutatása

Az eredmények közzlése előtt fontosnak tartom megjegyezni, hogy a nyers adatokat közvetlenül nem fogja tartalmazni a dolgozatom, hiszen rengeteg mérési eredmény született a magas adatrögzítési frekvencia miatt, de minden egyes minta feszültség-nyúlás görbéi ábrázolásra kerülnek, melyek az imént említett, átszámított adatokat szemléltetik áttekinthető formában. Mivel a szakítóvizsgáló szoftver közvetlenül a húzóerő értékeket rögzítette, ezért az egyes mintadarabok szakítódiagramjainak összehasonlíthatósága érdekében már a diagramok létrehozása előtt célszerű volt azokat mechanikai feszültséggé átalakítani, a szálak átmérőinek függvényében. Ezen összefüggésnek az egyenlete lentebb kerül ismertetésre, a „Számítási módszerek” című alfejezetben, ahol továbbá definiálom az általam korábban említett, egyéni paramétert, mely a kontrakciós szakasz arányára ad százalékos értéket.

Az eredmények és számított jellemzők három alfejezetre lesznek szétosztva az újraextrudálás fokozata szerint, egymáshoz hasonló felépítési mintát követve. Ezekben belül először az egyes minták szakítógörbéit fogom ábrázolni tömbösített formában, mindhárom mérési sorozatot a hozzá tartozó 6 darab méréssel. Ezt követően táblázatos formában fogom ismertetni az egyes mérésekhez tartozó szálátmérőt, szakítószilárdságot, valamint kontrakciós szakasz arányt, mely adatokhoz oszlopdiagramot is csatolok. Minden táblázatban lesz egy-egy mérés, mely értékei piros színnel kerülnek feltüntetésre. Ezen mérések eredményei a statisztikai számításokban nem lesznek figyelembe véve kiugró értékeik miatt, melyekre minden esetben fel is fogom hívni a figyelmet.

### 5.1.1. Számítási módszerek

Az adatok feldolgozását és az eredmények kiértékelése során felmerült számításokat kizárólagosan a Microsoft Excel táblázatkezelő szoftverben végeztem el, melyet a Microsoft 365 programcsomaghoz tartozóan a dolgozat írásakor a legfrissebb verziójában alkalmaztam (2508 buildverzió 16.0.19127.20192). A számításokhoz hasonlóan, minden táblázatot és diagramot mely a mérési eredményeket szemlélteti vagy ismerteti, szintén ebben a program hoztam létre.

Az egyik ilyen fentebb említett számítás a mintadarabok szakítószilárdsága, melynek mielőtt ismertetném a matematikai összefüggését, először fontosnak tartom, hogy szöveges formában is definiáljam. Mint a 2.4. fejezetben már említettem, egy anyag szakítószilárdsága az a legnagyobb mechanikai feszültség, amelyet az a húzó igénybevétel során károsodás nélkül el tud viselni. Ezt tovább bontva, a mechanikai feszültség egy olyan mérték, amely megmutatja, hogy mekkora belső erő jut egy adott keresztmetszet egységére az anyagban, amikor külső igénybevétel éri. Legjellemzőbb mértékegysége a MPa, mely az mutatja meg, hány Newton erő jut egységnyi mm<sup>2</sup> felületre.

Ebben az esetben a külső igénybevétel az a pofák húzóereje, mely tiszta húzásként jelenik meg, mivel a mintadarabra ható erő hatásvonala egybeesik annak a hosszanti tengelyével, így nem keletkezik hajlító- vagy csavarónyomaték. Az adott keresztmetszet a szál bármelyik pontban nézett keresztmetszete, mely bár nem pontosan ugyanakkora a szál teljes hosszát tekintve, sőt, minimálisan mértékben minden pontban eltér egymástól, de az egyszerűség és számíthatóság érdekében minden keresztmetszetet egyenlőnek tekintek a számítás során. Ezekből következően a feszültség egyenlete a következő:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

ahol

- $\sigma$ : a mechanika feszültség, mértékegysége: [MPa],
- F: a pofák által kifejtett húzóerő, mértékegysége: [N],
- A: a szál keresztmetszete, mértékegysége: [mm<sup>2</sup>].

Habár a szál keresztmetszetét közvetlenül nem tudtam megmérni, viszont figyelembe véve azt, hogy a vizsgált mintadarab szál alakú és közelítőleg kör keresztmetszetű, így a felület meghatározásakor a szál átmérőjének lemérésével közvetetten a keresztmetszetét is

meg tudom határozni. A kör területe és átmérője közti összefüggés a jól ismert geometriai képletből adódik:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

ahol

- A: a szál keresztmetszete, mértékegysége: [mm<sup>2</sup>],
- d: a szál átmérője, mértékegysége [mm].

Ha a feszültség összefüggésébe behelyettesítjük a keresztmetszet (A) helyére a fentebbi egyenletet, akkor egy olyan összefüggést kapunk, ahol már ismerünk minden paramétert. Ha ezt némileg rendezzük, és a maximális terhelést helyettesítjük be, akkor megkapjuk a szakítószilárdság összefüggését, melynek jelölése gyakran szerepel úgy is, mint  $R_m$ . Így a képlet a következőképpen alakul:

$$R_m = \frac{4 \cdot F_{max}}{\pi \cdot d^2}$$

ahol

- $R_m$ : a mintadarab szakítószilárdsága, mértékegysége: [MPa],
- $F_{max}$ : a legnagyobb mért húzóerő, mértékegysége: [N],

A másik, fentebb említett paraméter a kontrakciós szakasz aránya. Ez azt hivatott megmutatni, hogy miután az anyag már elérte a maximum terhelését, mennyit nyúlik még tovább, mielőtt elszakadna. Ez azért fontos jellemző, mert segítségével összehasonlíthatók az egyes mintadarabok, ridegségi/képlékenységi szempontból.

Számítása során az egyes mérések adathalmazából a teljes nyúlási hosszából kivontam azt a nyúlást, ahol a terhelés a maximum értékét vette fel, majd az így képzett különbséget elosztottam a teljes szakasz hosszával. Hogy ebből százalékos értéket kapjak, továbbá felszoroztam százzal. Az összefüggés így a következő alakot vette fel:

$$k_c = \frac{S_{teljes} - S_{szakító}}{S_{teljes}} \cdot 100\%$$

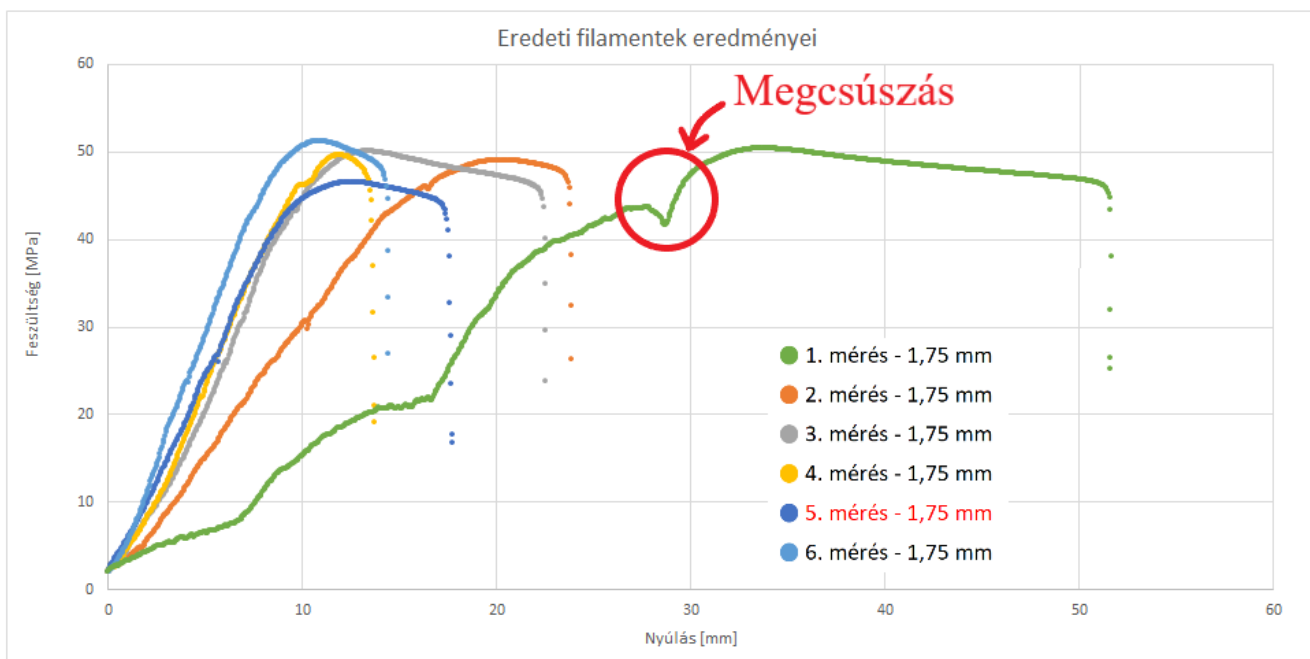
ahol

- $k_c$ : kontrakció szakasz aránya, mértékegysége: [%],
- $S_{teljes}$ : teljes nyúlás hossza, mértékegysége: [mm],
- $S_{szakító}$ : nyúlás hossza a legnagyobb terhelés elérésekor, mértékegysége: [mm].

## 5.1.2. Eredeti filament szálak

Az eredeti filamentek szakítóvizsgálata során hat mintadarabot szakítottam el, melyek szakítógörbéi az 5.1. ábrán láthatóak. Látható, hogy a görbék szakítószilárdsága - az ötödik mérés kivételével - mind egy szűk tartományon belülre esnek, 50 MPa körül. Az első mérés görbéje látványosan hosszabb; ez okolható egyrészt a nagyobb kezdeti befogási távval, másrészt a mérés közben bekövetkező megcsúszásokkal. Egy tipikus megcsúszásnak a helyét fel is tüntettem az ábrán, mintaképp. A sorozaton belüli többi mintánál ilyen jelenség vagy nem fordult elő, vagy csak minimális mértékben.

Az első mérés kivételével a többin jól megfigyelhető, hogy a görbék nyúlásának mintegy 60-70%-a a rugalmas nyúlás közel lineáris tartományába esik. Ezt egy rövidebb képlékeny alakváltozási szakasz követi, majd a maximális feszültség elérését követően a maradék nyúlás, mely a teljes hosszak nagyjából a 20-30%-át teszi ki, esik a kontrakciós szakasz tartományába. Ezek arra utalnak, hogy az eredeti filament szálak meglehetősen rugalmasak, hiszen jól kivethető rugalmas alakváltozási tartománnyal rendelkeznek, valamint a viszonylag hosszabb kontrakciós szakaszok képlékeny tulajdonságokra utalnak. A kontrakciós szakaszok arányát illetően a szakítószilárdságokhoz képest már kevésbé egységesek a görbék, így ezt nehezebb vizuálisan megítélni.



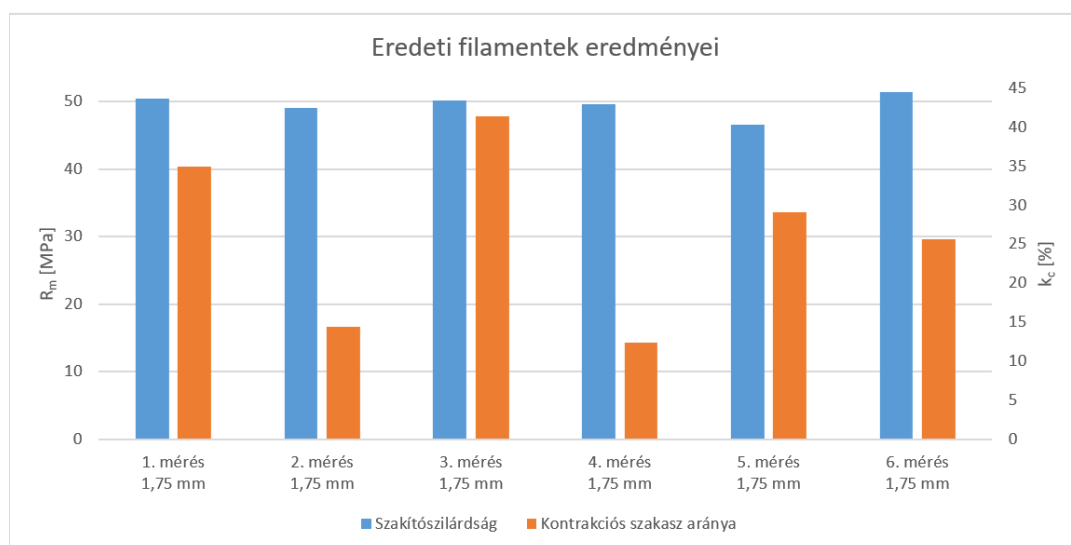
5.1. ábra: Eredeti filament minták szakítóvizsgálatának feszültség-nyúlás görbéi.  
Forrás: saját szerkesztésű ábra a mért adatok alapján.

Hogy számszerűen is össze lehessen őket hasonlítani, az 5.1. táblázatban láthatóak a szakítóvizsgálatok legfontosabb eredményei. Az „i” oszlop a mérések sorszámát mutatja, a további oszlopokban pedig rendre a szálátmérő, a szakítószilárdság, valamint kontrakciós szakasz arány szerepel. A szálak átmérői egységesen 1,75 mm nagyságúak voltak. A szakítószilárdság értékek megerősítik az 5.1. ábra elemzésekor tett megállapítást: az értékek döntően 50 MPa körül koncentrálódnak. Ez alól kivételt képez az ötödik mérés, amely 46,56 MPa-os értékével ugyan csak kis mértékben, de egyértelműen eltért a többitől, így ez a későbbi statisztikai számításoknál nem lesz figyelembe véve. A kontrakciós szakaszok aránya ezzel szemben viszont lényegesen nagyobb eltérést mutatott: a legalacsonyabb, 12,43%-os érték (4. mérés) és a legmagasabb, 41,36%-os érték (3. mérés) között több mint háromszoros különbség volt megfigyelhető.

5.1. táblázat: Eredeti filament minták szakítóvizsgálatának számszerű eredményei.  
 Forrás: saját szerkesztésű táblázat a mért és számított adatok alapján.

i	Eredeti		
	d <sub>i</sub> [mm]	R <sub>mi</sub> [MPa]	k <sub>c</sub> [%]
1	1,75	50,41	34,88
2	1,75	49,10	14,39
3	1,75	50,18	41,36
4	1,75	49,65	12,43
5	1,75	46,56	29,09
6	1,75	51,34	25,66

Az 5.2. ábra oszlopdiagram formájában szemlélteti a táblázatban szereplő adatokat. Ezen jól látható, hogy míg a szakítószilárdsági értékek között csak csekély eltérések figyelhetők meg, addig a kontrakciós szakaszok arányaiban jelentős a szórás.



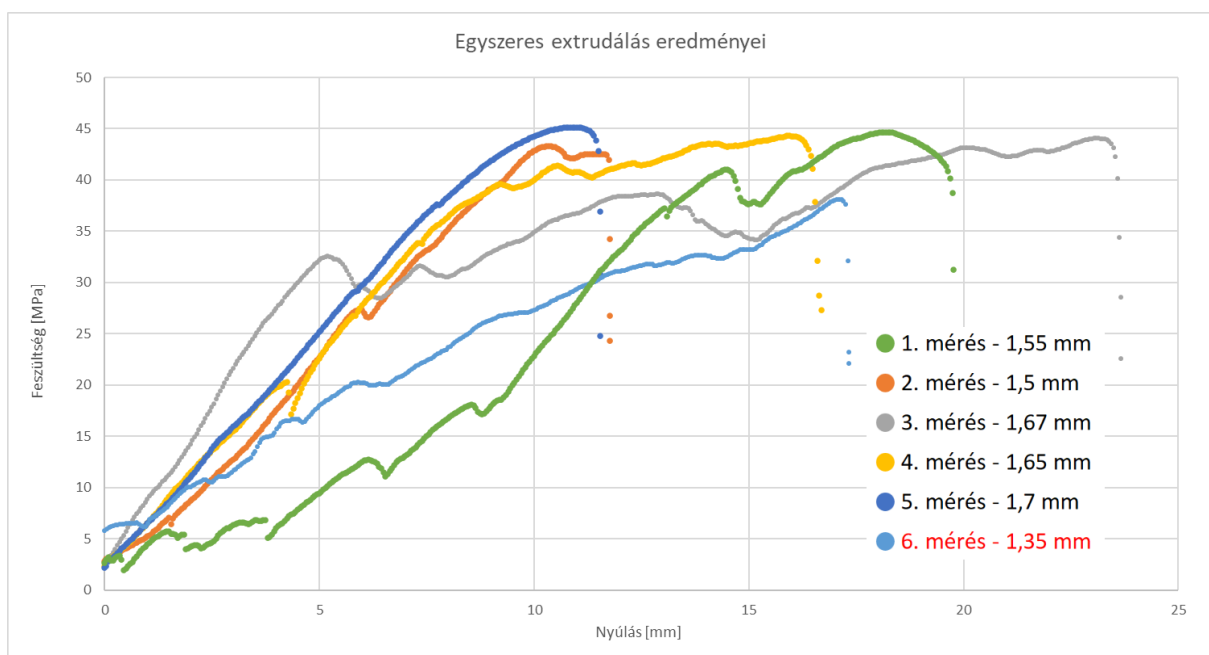
5.2. ábra: Eredeti filament minták szakítóvizsgálatának eredményei oszlopdiagramos formában.  
 Forrás: saját szerkesztésű diagram a mért és számított adatok alapján.

### 5.1.3. Egyszeresen újraextrudált szálak

Az eredeti szálak vizsgálatához hasonlóan, az egyszeresen újraextrudált mintákból is hat darab lett elszakítva, melyek eredményei az 5.3. ábrán találhatóak. A görbék ebben az esetben már jóval kevésbé mutatnak egységes képet: az 5. mérés kivételével mindenhol megfigyelhetők kisebb-nagyobb megcsúszások, mely jelentős mértékben hozzájárul a görbék zajosságához. A 6. mérésen kívül – mely kiugró értéke miatt nem lesz figyelembe véve a statisztika számítások során – a minták szakítószilárdsága láthatóan 40 és 45 MPa közötti értékeket vett fel.

A szakítógörbéken felül az ábrán láthatóak az egyes mintadarabokhoz tartozó átmérő értékek is, melyek 1,35 mm-től egészen 1,7 mm-ig terjedtek. Habár a 6. mérés esetén a legkisebb átmérőhöz tartozott a legkisebb szakítószilárdság is, viszont a többi görbe esetén egyértelmű összefüggés nem állapítható meg az átmérő is a szilárdsági tulajdonságok között.

A gyakori megcsúszások miatt több mérés esetében a rugalmas nyúlás lineáris tartománya nehezen különíthető el, leginkább az 5. mérés görbéjén figyelhető meg tisztán, ahol a teljes nyúlási szakasz mintegy 70–80%-át teszi ki. Hasonló okból a képlékeny alakváltozási szakaszok hossza sem minden esetben azonosítható egyértelműen. Ugyanakkor a szakítószilárdság elérését követő viselkedést – vagyis a kontrakciós szakaszt – már nem befolyásolta a pofákban történő megcsúszás, így az minden mérésnél jól értelmezhető. Ez a szakasz a teljes nyúlásnak csupán csekély részét tette ki.



5.3. ábra: Egyszeresen újraextrudált filament minták szakítóvizsgálatának feszültség-nyúlás görbéi.  
Forrás: saját szerkesztésű ábra a mért adatok alapján.

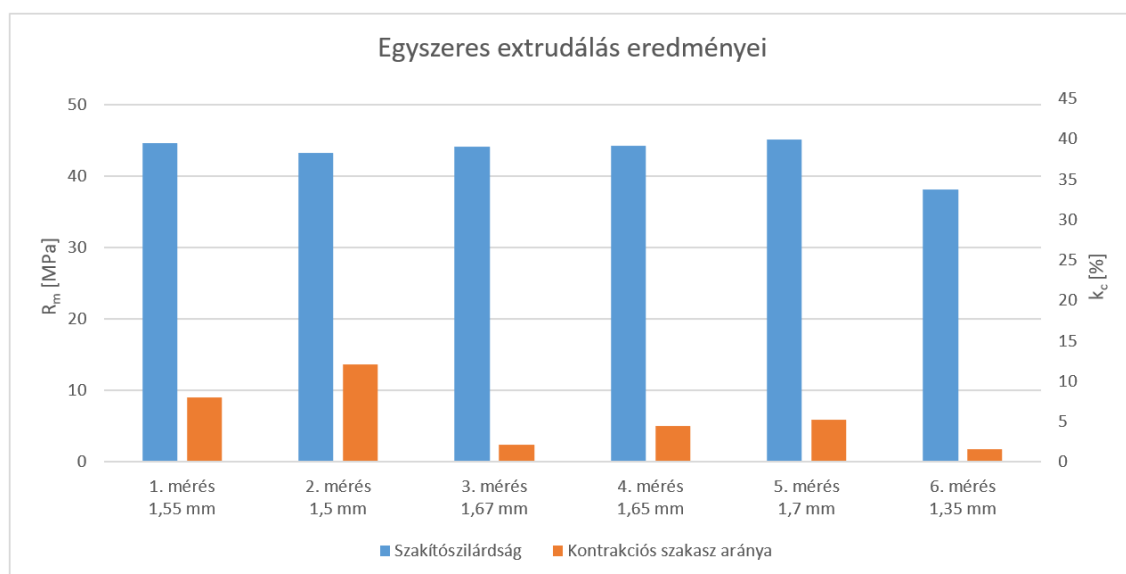
Habár nem feltűnő, de kis mértékben kivehető az ábráról, hogy az egyes görbék kezdőpontjai nem pontosan ugyan arról az értékről indulnak, míg az eredeti filamenteknél az összes görbe ugyan abból a pontból indul ki. Ennek az oka egyszerű; az összes mérés egy kezdeti 5 N terhelésről indult, mely az egységesen 1,75 mm átmérőjű filamenteknél a mechanikai feszültségben nem jelentett különbséget. Az újraextrudált szálaknál viszont már a minták átmérői eltérnek egymástól, így hiába kapnak ugyan akkora terhelést, a bennük ébredő feszültség már eltérő lesz, így görbékük kezdőpontja is.

Az egyes mérések eredményei az 5.2. táblázatban találhatóak, melyből már egyértelműen kiderül, hogy az átmérő és a szakítószilárdság között nincs összefüggés. Látható az is, hogy ez utóbbi tulajdonság értékei 43,28 és 45,15 MPa közé estek, míg a kontrakciós szakasz arány értékei 2,19 és 12,06% között foglaltak helyet – ha a 6. mérést nem vesszük figyelembe – mely továbbra is jelentős szórást jelent.

5.2. táblázat: Egyszeresen újraextrudált filament minták szakítóvizsgálatának számszerű eredményei.  
 Forrás: saját szerkesztésű táblázat a mért és számított adatok alapján.

i	Egyszer extrudált		
	$d_i$ [mm]	$R_{mi}$ [MPa]	$k_c$ [%]
1	1,55	44,67	8,00
2	1,5	43,28	12,06
3	1,67	44,08	2,19
4	1,65	44,30	4,49
5	1,7	45,15	5,23
6	1,35	38,11	1,60

Az 5.4. ábrán ezen eredmények oszlopdiagram formájában kerültek bemutatásra, amelyen a fentiek vizuálisan is jól nyomon követhetőek.

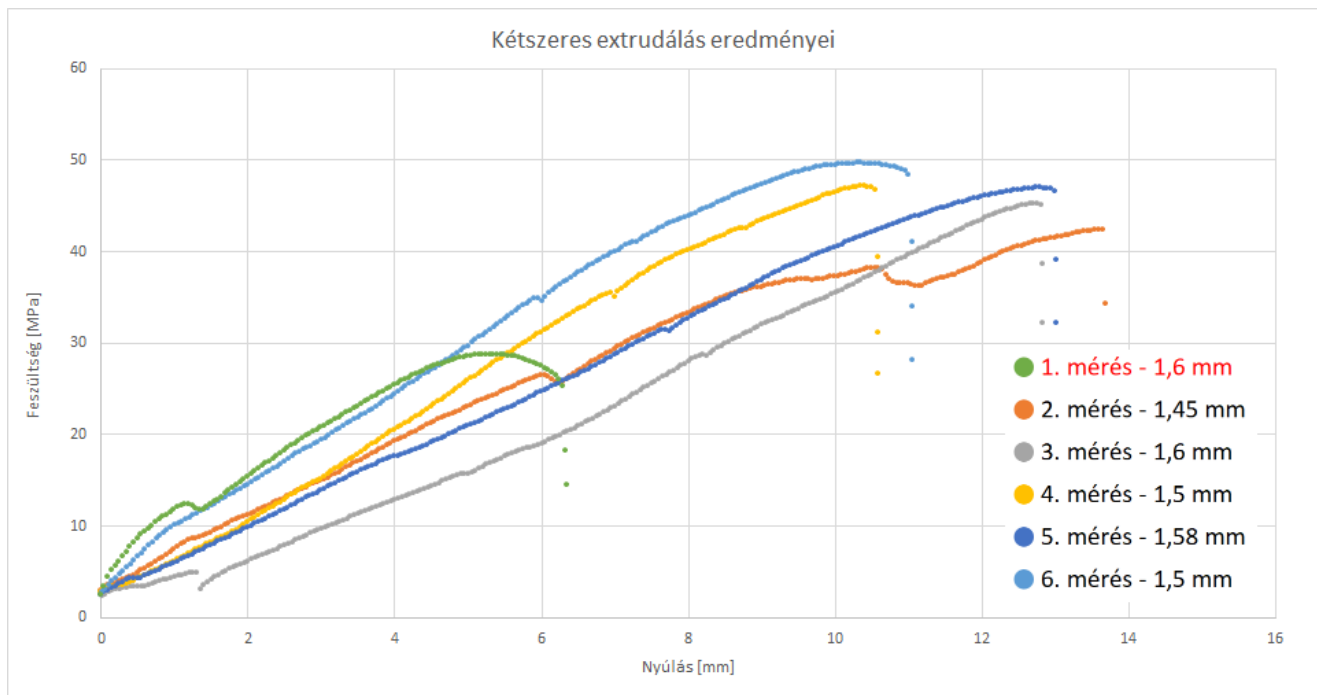


5.4. ábra: Egyszeresen újraextrudált filament minták szakítóvizsgálatának eredményei oszlopdiagramos formában. Forrás: saját szerkesztésű diagram a mért és számított adatok alapján.

#### 5.1.4. Kétszeresen újraextrudált szálak

Az előző mérési sorozatoknak megfelelően, a kétszeresen újraextrudált filamentek szakítóvizsgálata során is hat mintadarabot vizsgáltam. A szakítógörbéket az 5.5. ábra szemlélteti. Az 1. mérés görbéje szembetűnően eltér a többiétől, így a továbbiakban nem lesz figyelembe véve. A görbék szakítószilárdságaiban kisebb szórás fedezhető fel, 40 és 50 MPa között vettek fel értékeket.

Az egyes mintadarabok átmérőjét illetően méréselt eltérés tapasztalható, ám nem jelentős, értékeket 1,45 és 1,6 milliméter között vettek fel. A szálak megcsúszásával láthatóan nem volt jelentősebb probléma, így a görbék közel folytonosak, ebből következően az egyes szilárdsági szakaszok is könnyebben felismerhetők. A rugalmas alakváltozási szakaszok hosszát – a folytonos görbék esetén – 80-90%-ra becsültem, a maximális terhelést megelőző képlékeny alakváltozás szakaszát 5-10%-ra, a kontrakciós szakasz pedig egységesen elhanyagolhatónak bizonyult.



5.5. ábra Kétszeresen újraextrudált filament minták szakítóvizsgálatának feszültség-nyúlás görbéi.  
Forrás: saját szerkesztésű ábra a mért adatok alapján.

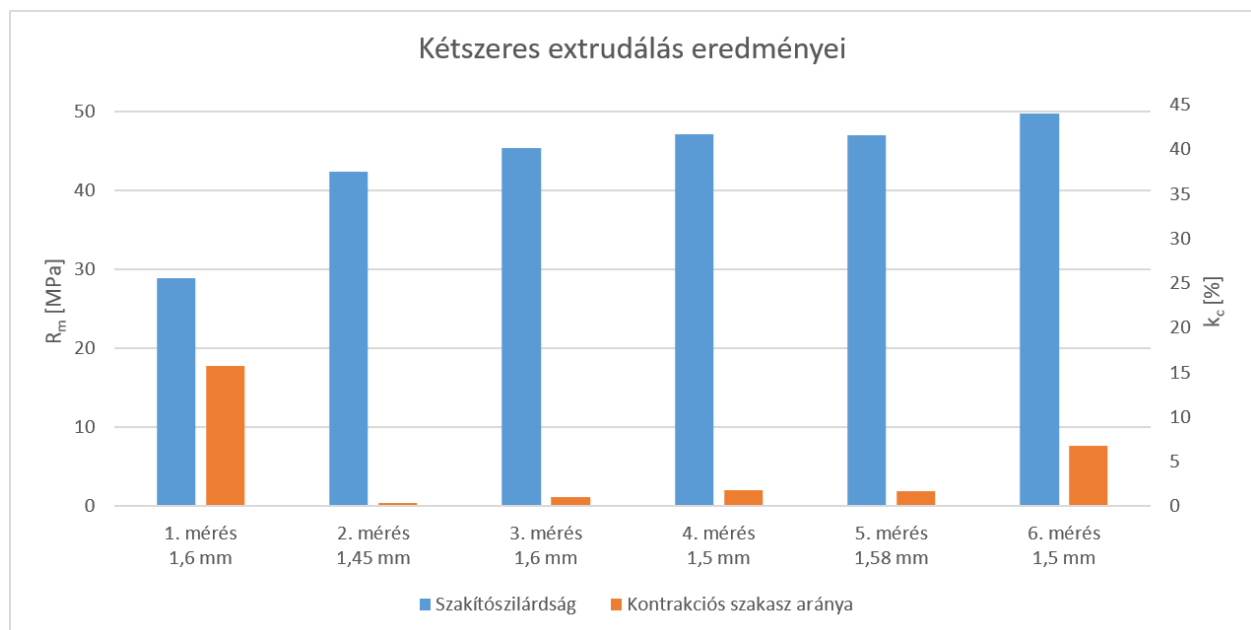
A mérési eredmények az 5.3. táblázatban kerültek feltüntetésre. Amint az itt is megfigyelhető, az 1. mérés eredményei jelentősen eltérnek a többi értéktől, mindkét vizsgált paramétert illetően. Az értékelésbe bevont mintadarabok szakítószilárdsága 42,37 és 49,78 MPa között egyenletesen oszlik el, annyi megjegyzéssel, hogy 47 MPa körüli érték két

mintadarabnál is előfordult. A kontrakciós szakaszok aránya 4 mintadarabnál is minimális volt (2% alatt), míg a 6. mérés esetében ettől eltérően 6,78% lett, ugyanakkor ez az érték is viszonylag rövidnek tekinthető.

5.3. táblázat: Kétszeresen újraextrudált filament minták szakítóvizsgálatának számszerű eredményei.  
Forrás: saját szerkesztésű táblázat a mért és számított adatok alapján.

Kétszer extrudált			
i	$d_i$ [mm]	$R_{mi}$ [MPa]	$k_c$ [%]
1	1,6	28,84	15,71
2	1,45	42,37	0,35
3	1,6	45,37	1,04
4	1,5	47,17	1,81
5	1,58	47,02	1,73
6	1,5	49,78	6,78

Az eredmények szemléltetését az 5.6. ábra segíti elő, oszlopdiagramos formában. Jól megfigyelhető rajta, hogy az 1. mérés értékei jelentős mértékben eltérnek a többi mintától, míg az utóbbiak a szakítószilárdság és a kontrakciós szakasz tekintetében csak viszonylag kis szórást mutatnak.



5.6. ábra: Kétszeresen újraextrudált filament minták szakítóvizsgálatának eredményei oszlopdiagramos formában.  
Forrás: saját szerkesztésű diagram a mért és számított adatok alapján.

## 5.2. Eredmények összehasonlítása, statisztikai kiértékelése

Az egyes mérési sorozatok eredményeinek kiértékeléséhez különböző statisztikai módszereket alkalmaztam, melyekhez a Microsoft Excel program beépített függvényeit használtam. A kiértékelés során az adatsorok jellemzésére az átlag, a szórás, továbbá a minimum- és maximum értékek kerültek meghatározásra. Az átlag a mért adatok központi értékét jellemzi, a szórás az adatok szóródásának mértékét, míg a minimum- és maximumértékek a teljes tartományt és a szélső értékek jelenlétét szemléltetik, így e négy mutató együttesen átfogó képet ad az eredmények statisztikai jellemzőiről. Mint azt a korábbi alfejezetekben kiemeltem, mindhárom mérési sorozatban volt egy-egy mérés, melynek eredménye túlságosan kiugrónak bizonyult a többi méréshez képest, ezért a statisztikai számítások során sem lettek figyelembe véve. Ebből következően, 5-5-5 mérés eredményei alapján határoztam meg az említett mutatókat.

A kapott adatokat az 5.4. táblázatban foglaltam össze, melynek felépítése a következő: az első oszlopban a kiértékelt paraméterek és a hozzájuk tartozó dimenziók, a második oszlopban a statisztikai mutatók, a harmadik, negyedik és ötödik oszlopban pedig a különböző újraextrudáltsági szintek és a hozzájuk tartozó értékek kaptak helyet. A következő bekezdésekben paraméterenként fogom kiértékelni és összehasonlítani a három mérési sorozat eredményeit.

5.4. táblázat: A mérési eredmények statisztikai mutatói összefoglalva, mindhárom mérési sorozatra.  
Forrás: saját szerkesztésű ábra a mért adatok alapján.

		Eredeti	1. Extrudálás	2. Extrudálás
<b>d</b> [mm]	Átlag	1,75	1,61	1,53
	Szórás	0	0,09	0,06
	Min.	1,75	1,50	1,45
	Max.	1,75	1,70	1,60
<b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	Átlag	50,13	44,30	46,34
	Szórás	0,84	0,70	2,72
	Min.	49,10	43,28	42,37
	Max.	51,34	45,15	49,78
<b>k<sub>c</sub></b> [%]	Átlag	25,74	6,39	2,34
	Szórás	12,59	3,78	2,55
	Min.	12,43	2,19	0,35
	Max.	41,36	12,06	6,78

Az eredeti filament szálak átmérője egyöntetűen a szabványos 1,75 mm volt, míg az egyszeresen újraextrudált szálak átmérői 1,50-1,70 mm között foglaltak helyet. Szórásuk 0,09 mm, átlagos értékük pedig 1,61 mm lett. A kétszeresen újraextrudált szálak átmérői 1,45-1,60 mm közötti tartományon helyezkedtek el, 0,06 mm szórással, és 1,53 mm átlagos értékkel. Ahogy növekedett az újraextrudálások száma, úgy vele együtt fordítottan arányosan csökkent a filamentek átlagos átmérője is, viszont a második extrudálást követően már kisebb volt köztük a szórás, mint az első esetében.

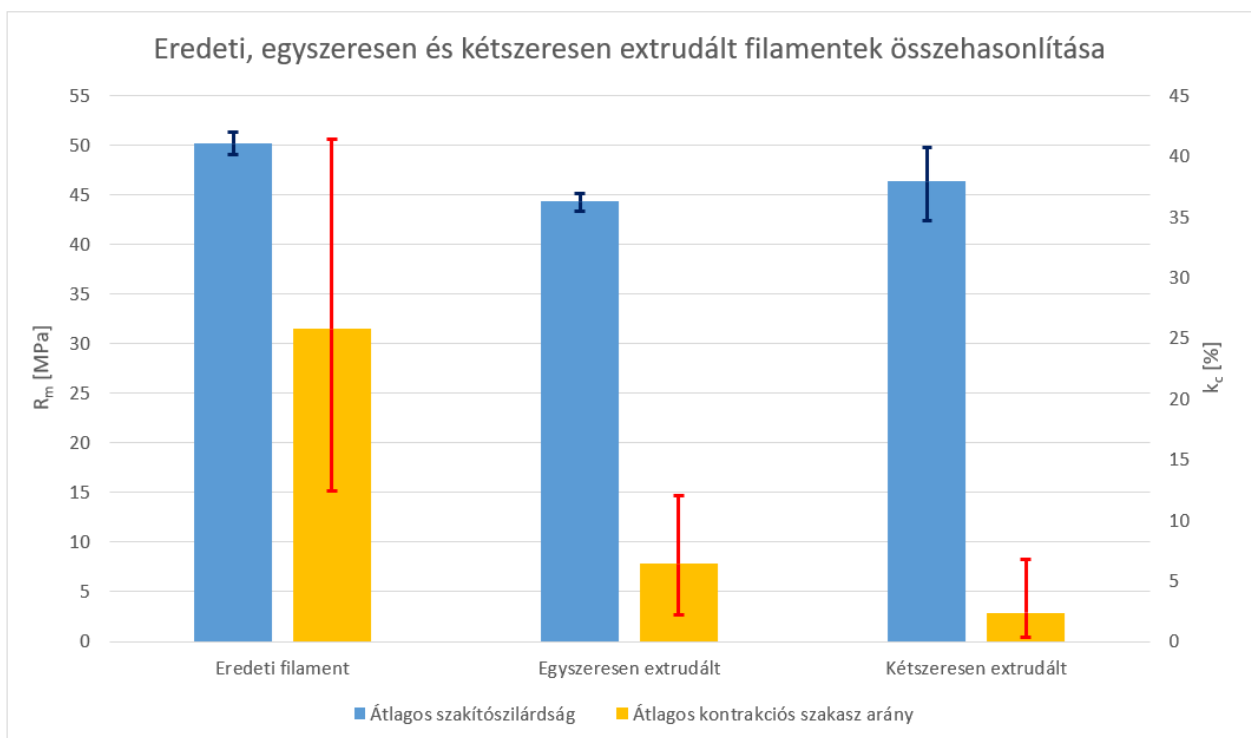
A szakítószilárdságok tekintetében az eredeti filamentek érték el a legjobb eredményt, 50,13 MPa átlaggal. Az egyes értékek 49,1-51,34 MPa között helyezkedtek el, szórásuk 0,84 MPa lett. Az egyszeresen újraextrudált filamentek átlagos szakítószilárdsága már határozottan kevesebb lett, 44,3 MPa. A mérési értékek 43,28-45,15 MPa között fordultak elő, 0,7 MPa szórással. Meglepő módon, a kétszeresen újraextrudált filamentek átlagos szakítószilárdsága 46,34 MPa lett, így a kettő előző érték között foglalva helyet. Az eredmények alsó határa 42,37 MPa, míg felső határa 49,78 MPa lett, ezzel egy kiugró 2,72 MPa-os szórást elérve. Tehát az eredeti filamentekhez képest az újraextrudálást követően a minták szakítószilárdsága kevesebb lett, viszont a második újraextrudálást nem követte további csökkenés, éppen ellenkezőleg. Az eredmények szórása az első két mérési sorozat során viszonylag alacsony volt, 0,84 és 0,7 MPa, viszont a második újraextrudálást követően jelentős növekedés volt tapasztalható, 2,72 MPa-os értéket felvéve.

A kontrakciós szakaszok arányát illetően messze az eredeti filamentek rendelkeztek a legmagasabb értékekkel; 12,43-41,36%-ig is előfordultak, átlaguk 25,74% lett. Az értékek között viszonylag magas volt a szórás is, 12,59%. Az első újraextrudálást követően már jelentős csökkenés figyelhető meg, a kontrakciós arányok 2,19-12,06% között mozogtak, 6,39% átlagos értékkel. Az eredmények szórása is határozottan kevesebb lett, 3,78%. A második újraextrudálással előállított mintadarabok eredményei kis mértékben tovább csökkentek, a legkisebb kontrakciós arány 0,35%, míg a legnagyobb 6,78% lett. A mérések átlaga szintén csökkent, így az 2,34%, míg a szórásuk 2,55% értéket vett fel. A kontrakciós szakaszok arányára tehát elmondható, hogy mind az átlagos értékük, mind a szórásuk csökkent az újraextrudálások számának növelésével; az első extrudálást után nagyobb, míg a másodikat követően csak kisebb mértékben.

Az eredmények szakirodalommal való összehasonlítása során egyedül a filamentek szakítószilárdságát tudtam közvetlenül vizsgálni, melyhez több viszonyítási alap is rendelkezésre állt. Az általam végzet, közvetlenül a filament szálakon elvégzett mérések átlagos eredménye 50,13 MPa lett az eredeti minták esetében. Ezzel szemben a gyártó által

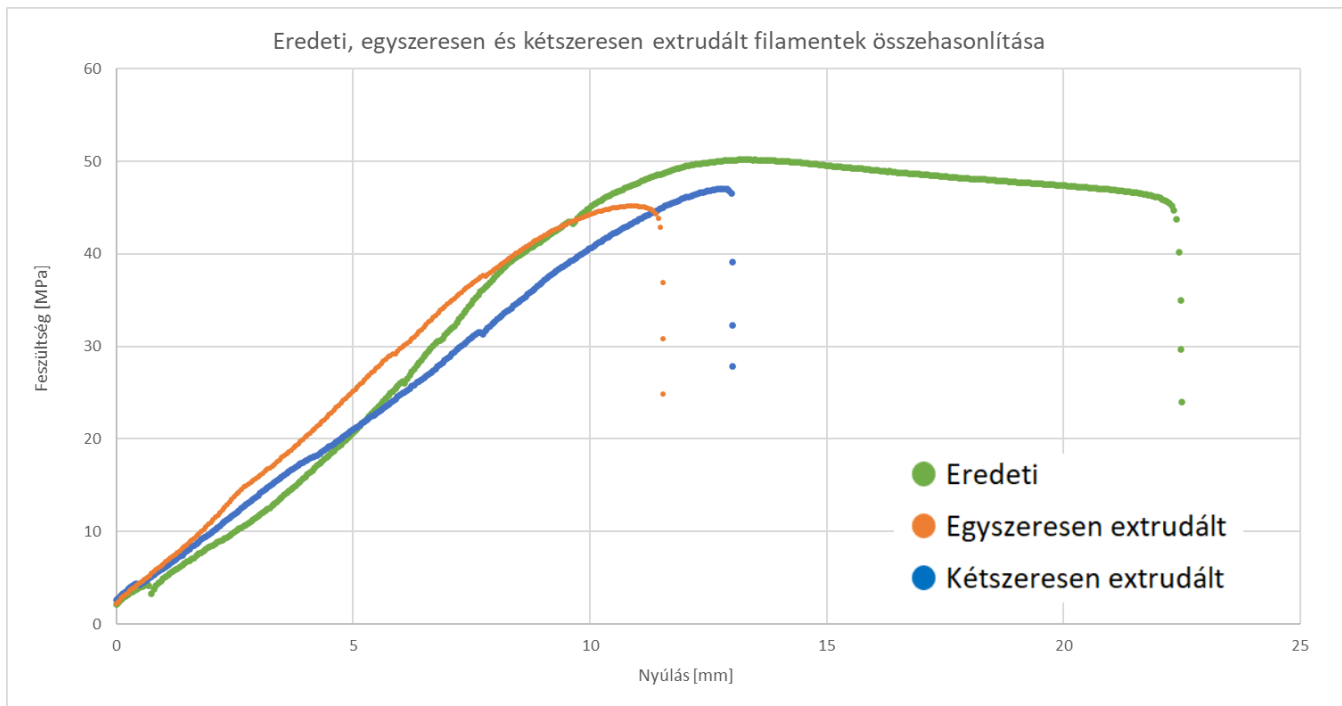
megadott szakítószilárdság 61 MPa, ami közel 20%-os eltérést jelent. Ez a különbség elsősorban a próbatestek geometriai eltéréseiből adódik, mivel a gyártó az ASTM D638 szabvány szerint végezte a vizsgálatot, amely vastagabb, robusztusabb próbatestet ír elő, mint az általam mért vékony filament szál. A különböző geometria eltérő feszültségeloszlást eredményez, a kisebb keresztmetszet pedig jellemzően alacsonyabb mért szakítószilárdságot mutat. További összehasonlítási alapul szolgál a 2.2. táblázat, amely egy másik gyártó által megadott, a vizsgálatától független PLA adatait tartalmazza. Ebben az anyag szakítószilárdsága 53 MPa, melyet az ASTM D882 szabvány szerint határoztak meg. Ez a szabvány lapka jellegű, legfeljebb 1 mm vastagságú próbatestet alkalmaz [54], amelynek keresztmetszeti mérete már közelebb áll a vizsgált filamentéhez. Ennek megfelelően a méréseimmel kapott érték ezzel a szabvány szerinti eredménnyel jó egyezést mutat.

A számított jellemzőket az összehasonlíthatóság érdekében oszlopdiagramokon is ábrázoltam az 5.7. ábrán. Ezen a három mérési sorozat átlagos szakítószilárdsága és kontrakciós szakaszaránya látható, a minimum–maximum értékeket hibasávok jelzik. Az eredmények alapján a szakítószilárdság kis eltérést mutat a sorozatok között, míg a kontrakciós szakasz aránya exponenciálisan csökkenő tendenciát követ. A hibasávok azt is szemléltetik, hogy míg a szakítószilárdságok szórása kismértékű, addig a kontrakciós szakaszoké jelentős.



5.7. ábra: Eredeti, egyszeresen és kétszeresen újraextrudált filamentek szakítószilárdságának és kontrakciós szakasz arányának összehasonlítása. Forrás: saját szerkesztésű ábra a mért adatok alapján.

Hogy az egyes mérési sorozatok szakítódiagramjai közvetlenül is össze legyenek hasonlítva, így fontosnak tartottam, hogy legyen egy olyan ábra, amelyen mindhárom újraextrudáltsági kategória görbéje is szerepel. Ezt úgy készítettem el, hogy az egyes mérési sorozatokból kiválasztottam egy-egy görbét, mely legjobban reprezentálja azokat, és egy diagramon ábrázoltam őket. A kiválasztás során ügyeltem rá, hogy a görbék közti viszony a statisztikai kimutatásoknak is megfeleljen, így azokat megfelelően szemléltetve. Ezen görbék az 5.8. ábrán láthatóak.



5.8. ábra: Eredeti, egyszeresen és kétszeresen újraextrudált filamentek reprezentatív görbéinek összehasonlítása.  
 Forrás: saját szerkesztésű ábra a mért adatok alapján.

A görbék a korábban megállapított összefüggéseket jól alátámasztják; a kétszeresen extrudált minták szakítószilárdságának átlaga a másik kettő között helyezkedik el, a kontrakciós szakasz az eredetinél lényegesen hosszabb volt, mint az extrudált mintáknál, valamint ezen felül csökkenő tendenciát is mutatnak. Ami a görbéken nem látszik viszont, az a mérési eredmények szórása, valamint a megcsúszások előfordulásának gyakorisága, melyet az ábra letisztultságának érdekében nem lett volna érdemes megjeleníteni.

## 6. Következtetések és javaslatok

Az előző fejezetben ismertettem a mérések eredményeit, a számításához felhasznált összefüggéseket, valamint a statisztikai módszereket. A következő fejezetben összefoglalom az ezen eredményekből levont legfontosabb következtetéseket, továbbá értékelem a vizsgálatok során megfigyelt jelenségeket. Végül a kapott eredmények alapján javaslatokat is megfogalmazok a méréseim során felmerült problémák megoldására, valamint kitérek rá, hogy milyen vizsgálatokat lehet érdemes elvégezni a téma kutatása érdekében, ezzel kiterjesztve a kutatás témáját és közelebb kerülve a gyakorlati alkalmazhatósághoz.

### 6.1. Megfigyelt jelenségek értékelése, következtetések levonása

A következtetések levonása előtt fontosnak tartom feleleveníteni a dolgozat elején is kitűzött célt, mely arra a kérdésre keresi a választ, hogy a filament szálak egyszeres, vagy akár többszörös újraextrudálása milyen hatással van azok mechanikai anyagjellemzőire, melyet a következőekben meg is fogok válaszolni. A fejezetben az egyes paramétereken fogok sorban végighaladni, az összehasonlítás során megállapított összefüggésekből következtetéseket levonva, majd pedig az egyéb megfigyelt jelenségekre is kitérek, végül egy összefoglaló következtetésben értékelem átfogóan a szálak tulajdonságainak változását.

Az eredeti filamentek átmérői egységesen a szabványos értékeken voltak, majd az első extrudálást követően 8%-kal csökkentek. A relatív szórás ekkor 5,6% volt. A második extrudálást követően az átmérő átlagos értéke további 5%-kal csökkent, viszont a relatív szóródása már csak 3,9% volt. Mivel az extruderből kijövő szál elvezetését manuálisan végeztem, ezért az extrudálások során ez is egy változó paraméternek számít, mely habár számokkal nem kifejezhető, az eredményre hatással van. A hatása pedig a szálak átmérőjének folytonosságában figyelhető meg; az első extrudálást követően nagyobb volt a szórás, viszont a másodiknál már kisebb. Ez köszönhető annak, hogy nagyobb tapasztalatot szereztem a megfelelő szál elvezetésben, rutinosabban végeztem el, így az eredmény is konzekvensebb lett. A szálak átmérőjének csökkenése azzal is indokolható, hogy az első extrudálásnál még nem feltétlen maximális csiga sebességgel dolgoztam végig, a másodiknál viszont már igen, amely a szál kis mértékű elvékonyodásához vezetett.

A szakítószilárdságok esetében egy igen meglepő eredményre jutottam: míg az első extrudálást követően az elvárásnak megfelelően a minták szakítószilárdsága átlagosan 11,63%-kal csökkent, addig a második újraextrudálás után egy 4,6%-os növekedés figyelhető meg. Ez azért érdekes, mert az lett volna logikus, ha az újraextrudálások számának

növelésével a szakítószilárdság értékek is fokozatosan csökkennék, míg egy határ elérése után már nem lenne további romlás. Ettől eltekintve, az eredeti filamentekhez képest így is kimutatható a csökkenés a második extrudálást követően is, viszont az ismételt extrudálások szakítószilárdságra gyakorolt hatásáról nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni. Az az eredeti filamentek és az egyszerűen újraextrudált minták szakítószilárdságának relatív szórásában nem volt jelentős különbség, értékük 1,7%, valamint 1,6% lett. A második extrudálást követően viszont már 5,9% a minták relatív szórása, mely nagy valószínűséggel nem rendszerszerű hatás, hanem a mérési bizonytalanságokból és a minták közötti véletlenszerű eltérésekből adódik. Miután az eredeti filamentek szakítószilárdságát összevettem két gyártói adattal, kisebb eltérést fedeztem fel az értékekben. Az egyik érték jóval nagyobb volt az általam meghatározottól, mely a próbatestek jelentős geometriai különbségeiből adódik. A másik érték viszont csak minimális mértékben tért el, melynél a próbatestek vastagsága is hasonlóságot mutatott. Ez megerősíti a vizsgálati módszerem megbízhatóságát és reprodukálhatóságát, továbbá azt, hogy a vizsgált filament anyaga ténylegesen megfelel a PLA-ra jellemző mechanikai tulajdonságoknak.

A kontrakciós szakaszok arányának alakulása már egy sokkal egyértelműbb képet rajzol ki, melyből az anyagtulajdonságok megváltozására egyértelműen lehet következtetni. Az eredeti szálakhoz képest az első extrudálást követően arányaiban negyedére csökkent a görbék kontrakciós szakaszának hossza, míg a második extrudálás következtében közel a harmada lett a szakasz arányos hossza az előző görbékhez képest. Ez az anyag egyértelmű ridegedésére enged következtetni, hiszen míg kezdetben szívós tulajdonságokat mutatva kifejezetten sokat nyúlt a szál a maximális terhelés elérése és a szakadás között, ezzel ellentétben az extrudálásokat követően jelentős csökkenés figyelhető a kontrakciós szakasz hosszában. Ez máshogy megfogalmazva a szakítószilárdság elérését követően szinte azonnali szakadást jelent, mely egyértelműen rideg tulajdonságokra utal. A kontrakciós szakaszok relatív szórása az eredeti és az egyszerűen újraextrudált filamentek esetében 50% körül alakult, míg a második extrudálást követően több, mint 100% volt, mely több tényező együttes hatására vezethető vissza. Az egyik feltételezett ok a minták kezdeti befogási hosszának eltérése volt, hiszen elképzelhető, hogy különböző hosszúságban befogott szálak eltérő relatív nyúlási viselkedést is fognak mutatni. Ez viszont a kezdeti befogási hosszokkal történő összehasonlítás után nem mutatott semmilyen összefüggést, így ez nem valószínű. További lehetséges tényezőként említhető a minták elcsúszása a befogópofákban, a filamentek felületi hibái, valamint az anyagszerkezet inhomogenitása, amely az újraextrudálási folyamat során keletkező mikrosérülések és láncrövidülések következménye.

Összefoglalva elmondható tehát, hogy az újrahasznosítás hatással van a filament szálak mechanikai jellemzőire, viszont nem minden esetben sikerült egyértelmű következtetésekre jutnom. Minél többször lett újraextrudálva a szál, a szívósságából annál inkább vesztett, ezáltal ridegebbé válva. A szakítószilárdság az eredeti szálnál volt a legmagasabb, a darálást és extrudálást követően pedig csökkent, viszont a többszörös extrudálással nem mutatott további csökkenést. A szálak ridegedése több okra is visszavezethető, ám dolgozatomban célja csupán a mechanikai változásoknak a kimutatása és vizsgálata, a mögötte rejlő okokra már nem terjed ki. Feltehetőleg a polimerláncok károsodása szoros összefüggésben áll ezzel, hiszen az extrudálás az anyag hő- és nyíróterhelésnek van kitéve, melynek hatására a láncok degradálódhatnak, ezáltal rövidebb láncokat alkotva. A rövidebb láncok között gyengébb a kohézió, így az anyag veszít szívósságából, ridegebb lesz.

## 6.2. Javaslatok

Első javaslatom a mérések kiterjesztése lenne, több újraextrudálási lépcsővel. Az újraextrudálásokat tetszőleges alkalommal végre lehetne hajtani, viszont célszerű lenne egy olyan határt találni, ahol már új eredmények nem mutathatóak ki.

Mivel visszatérő probléma volt, a megcsúszás elkerülése érdekében célszerű lenne a befogó pofát úgy módosítani, hogy a szál végét az ékszerű bemarkáson való átvezetés után rögzíteni lehessen, miközben a hengeres részen körbetekerve marad, így biztosítva a befogást.

Hasznos lehet továbbá a vizsgálatban szereplő polimer anyagok listáját kibővíteni, hiszen az eltérő anyagok eltérő szerkezettel és tulajdonságokkal rendelkeznek, ezáltal az újraextrudálásra is máshogy reagálhatnak. Az ajánlott anyagok például az ABS, a PETG, valamint a TPU, melyek gyakorlatban is széles körben használt nyomtatási alapanyagok.

Érdemes lehet ezen felül kifejezetten azt vizsgálni, hogy a különböző hőmérsékleteken végzett extrudálás milyen hatással lehet a filamentek tulajdonságaira. Kutatásom során csak azt vettem figyelembe, hogy milyen hőmérséklet mellett reprodukálhatóak leghatékonyabban a szálak, így mintadarabok előállításánál is ezt a hőmérsékletet alkalmaztam, viszont a hőmérséklet értéke hatással lehet a filamentek anyagjellemzőire is.

Fontos fejlesztési irány lenne a mechanikai tulajdonságoktól eltekintve egy felcsévélő berendezés alkalmazása és optimalizálása, aminek segítségével a mintadarabok sokkal könnyebben reprodukálhatóak lennének, ezáltal az extrudálási folyamatot megkönnyítve, valamint lehetővé téve a nyomtatáshoz alkalmas, szabványos filamentek extrudálását. Ezzel nem csak rengeteg újabb kutatási lehetőség nyílna meg, melyekbe a 3D nyomtatást is be lehetne vonni, hanem a gyakorlati hasznosíthatósághoz is nagy mértékben hozzájárulna.

## 7. Gazdasági számítás

Ebben a fejezetben azt fogom kiszámítani, hogy ha a filament hulladékok újrahasznosítási céljából valaki beruházna a dolgozat során használt extrudáló berendezésre, akkor mennyi idő alatt térülne meg a beruházása. Fontos megjegyezni, hogy a számítás nem tartalmazza a késes daráló költségét, valamint a felcsévlő berendezés sem szerepel benne, amely elengedhetetlen a hatékony újrahasznosításhoz.

Elsőként az fogom kiszámítani, hogy egységnyi filament újraextrudálása mennyi időt vesz igénybe. Ezt követően összegzem a beruházás árát, kiszámítom mennyit takarítok meg egységnyi filament előállításával, majd ezeket összevetve megkapom a beruházás megtérülési idejét, az energiaköltségeket is figyelembe véve. A számítás során a filament egységárának alapjául a vizsgált filament árát vettem [53], a villanyenergia árát pedig az aktuális (2025. 10. 07.) lakossági piaci árból számítottam. [55]. A beruházási költséget az extruder képzi [56], melynek árát az aktuális (2025.10.07.) árfolyam (390 EUR/HUF) szerint euróból átváltottam forintra. A kiindulási adatok, közbülső számítási eredmények és végeredmények a 7.1. táblázatban kerültek összegyűjtésre.

7.1. táblázat: Filament extrudáló beruházásának megtérülési ideje. Forrás: saját készítésű táblázat.

Extrudálási sebesség [m/perc]	0,66
Filament sűrűsége [g/cm <sup>3</sup> ]	1,23
Extrudálási sebesség [kg/óra]	0,117
Extrudáló berendezés fogyasztása [W]	120
Filament tekercs egységára [Ft/kg]	6860
Lakossági áram piaci ára [Ft/kWh]	70,104
Extrudáló berendezés energiaára [Ft/óra]	8,41
Filament előállításának energiaára [Ft/kg]	71,9
Filament újraextrudálásának megtérülése [Ft/kg]	6788,1
Beruházási költség [Ft]	235965
Megtérülési mennyiség [kg]	<b>34,76</b>
Megtérülési idő [üzemóra]	<b>297,11</b>

A kapott eredmények alapján tehát közel 35 kilogramm filament újrahasznosítása után térülne meg az említett extruder vásárlása. Ekkora mennyiségű tiszta filament hulladék felhalmozódási ideje alkalmazástól és egyéntől változhat, így személyes felhasználásra nem ajánlok egy ilyen berendezésre való beruházást. Nagyobb volumenű újrahasznosítás esetén, például sok hulladékot termelő vállalkozásoknál viszont már érdemes lehet beruházni egy extruderre. Az újraextrudálás másik fontos előnye az anyagmegtakarításon kívül a keletkező hulladékmennyiség csökkentése, így nem kell költeni a hulladékkezelési költségekre, mint például a műanyag hulladék gyűjtése, szállítása, lerakása és megsemmisítése.

## 8. Összefoglalás

Dolgozatom célja annak vizsgálata és megválaszolása volt, hogy hogyan változnak a polimerek mechanikai anyagjellemzői egyszeres, illetve többszörös újrahasznosítás hatására. A témaválasztás aktualitását a műanyag-újrahasznosítás és a fenntartható gyártástechnológiák iránti egyre növekvő igény indokolta. Kutatásom alapjául a 3D nyomtatásban használt filamentek szolgáltak, mivel ezek újrahasznosítása viszonylag egyszerű elven alapul, és az ilyen szálakkal dolgozó FDM gépek egyre szélesebb körben terjednek. A vizsgálatok során kizárólag PLA-val dolgoztam, köszönhetően népszerűségének és környezetbarát jellegének.

Munkám során a célmeghatározásnak megfelelően első lépésként áttekintettem a témába illeszkedő szakirodalmakat. Ez magába foglalta a legelterjedtebb additív gyártástechnológiákat, a leggyakrabban előforduló filament alapanyagokat, a filamentek előállításának folyamatát, végül pedig a releváns anyagvizsgálati módszereket. Ezt követően kutatási és vizsgálati tervet állítottam fel, melynek megfelelően az eredeti filament szálakat először felaprítottam, az így keletkező darálékból egy úgynevezett extrudáló berendezés segítségével ismét szálát előállítva. Az újrahasznosítási folyamatot kétszer végeztem el, a kapott filamenteket három kategóriába sorolva: eredeti, egyszeresen újraextrudált és kétszeresen újraextrudált. Ezen szálakból előkészítettem kategóriánként 6 mintadarabot, majd szakítóvizsgálatnak vettem alá őket.

A vizsgálatok során kapott értékeket általánosan elterjedt statisztikai módszerekkel kiértékeltem, melynek eredményéül azt kaptam, hogy a filamentek az újraextrudálás elsődleges hatásaként egyértelműen ridegebbé váltak, míg másodlagos hatásként csökkent a szakítószilárdságuk. Ugyanakkor azt nem tudtam egyértelműen kimutatni, hogy az újraextrudálások számának növelésével a szálak szakítószilárdsága tovább csökkenne.

Gazdasági számításaim alapján egy extruder berendezésre való beruházás nagyobb mennyiségű polimer hulladékot termelő vállalkozások esetében már 1–2 hónapon belül megtérülhet az alapanyag-megtakarítás révén, emellett pedig a hulladékkezelés költségeinek csökkentésére is környezetkímélő megoldást kínál.

Összességében a vizsgálataim hasznos lehetőséget nyújtottak arra, hogy a tanulmányaim során megszerzett mérnöki ismereteimet kipróbálhassam mind az anyagvizsgálati, mind a gyártástechnológiai területek gyakorlati alkalmazásában. A mérési és kiértékelési folyamatok során lehetőségem nyílt mérnöki szemléletmódom fejlesztésére, a problémák felismerésére és megoldási javaslatok megfogalmazására. A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy hasznos lehet további vizsgálatok elvégzése is, például a vizsgált polimer anyagok típusainak bővítése, befogófej fejlesztése, vagy egy felcsévéző rendszer kialakítása.

## 9. Summary

The aim of my thesis was to investigate and determine how the mechanical properties of polymers change as a result of single and multiple recycling processes. The relevance of this topic stems from the increasing demand for plastic recycling and sustainable manufacturing technologies. My research focused on 3D printing filaments, as their recycling process is relatively simple, and FDM printers that use such filaments are becoming increasingly widespread. During my experiments, I worked exclusively with PLA, due to its popularity and environmentally friendly nature.

In accordance with the research objectives, I first reviewed the relevant literature. This included an overview of the most common additive manufacturing technologies, the typical filament base materials, the production process of filaments, and the applicable material testing methods. Following this, I established a research and testing plan in which the original filament strands were first shredded and then re-extruded using an extruder device. The recycling process was carried out twice, resulting in three filament categories: original, once re-extruded, and twice re-extruded. From each category, six test specimens were prepared and subjected to tensile testing.

The obtained results were evaluated using standard statistical methods. The analysis revealed that, as a primary effect of re-extrusion, the filaments became noticeably more brittle, while their tensile strength decreased as a secondary effect. However, it could not be clearly demonstrated that the tensile strength further decreases with an increasing number of re-extrusions.

Based on my economic calculations, the investment in an extrusion device could pay off within 1–2 months for companies generating a large amount of polymer waste, due to material savings. In addition, it offers an environmentally friendly solution for reducing waste management costs.

Overall, my research provided a valuable opportunity to apply and test the engineering knowledge I have acquired during my studies in both material testing and manufacturing technology. The measurement and evaluation processes allowed me to develop my engineering perspective, recognize technical challenges, and propose possible solutions. Based on the results, further research could be beneficial—such as expanding the range of tested polymer materials, improving the extrusion head design, or developing a filament winding system.

## **10. Köszönetnyilvánítás**

Ezúton szeretnék köszönetet nyilvánítani témavezetőmnek, Dr. Zsidai László tanár úrnak, aki a szakdolgozat megírása során hasznos ötleteivel és tanácsaival támogatott, valamint hozzáférést biztosított az Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszékén található gépekhez és eszközökhöz. Továbbá szeretném megköszönni Dr. Keppler István tanár úrnak is, hogy megmutatta a Gépszerkezetek laborban található szakítóvizsgáló gép használatának menetét, valamint hogy lehetőséget biztosított annak használatára a szakítóvizsgálatok elvégzéséhez.

# 11. Nyilatkozatok

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

6.13. sz. függelék: A MATE egységes szakdolgozat / diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója

4.2. sz. melléklete: Nyilatkozat a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről (módosítva: 2025. október 16.)

## NYILATKOZAT

a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió<sup>1</sup> nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Varga Tamás  
A Hallgató Neptun kódja: BVW2RZ  
A dolgozat címe: "Recycling" újraelmúdlás hatása a 3D nyomtatható  
A megjelenés éve: 2025 filamentek mechanikai anyagjellemzőire  
A konzulens intézetének neve: (Anyagtud) Műszaki Intézet  
A konzulens tanszékének a neve: Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió<sup>2</sup> egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szöveggenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2025. év 10. hó 27. nap

  
Hallgató aláírása

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

6.13. sz. függeléke: A MATE egységes szakdolgozat /  
diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója

4.1. sz. melléklete: Konzulensi nyilatkozat

NYILATKOZAT

VARGA TAMÁS (név) (hallgató Neptun azonosítója: BVW2RZ)  
konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a  
záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót<sup>1</sup> áttekintettem, a hallgatót az  
irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól  
tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő  
védésre javaslom / nem javaslom<sup>2</sup>.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem<sup>\*3</sup>

Kelt: Gödöllő 2025 év október hó 27 nap

Szabó László  
belső konzulens

## Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

### 1. Általános adatok

Hallgató neve:	Varga Tamás
Neptun-kódja:	BVW2RZ
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input checked="" type="checkbox"/> BSc/BA <input type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb: .....
Tantárgy neve/kódja*:	Szabaddolgozat
A munka címe:	„Recycling” újraextrudálás hatása a 3D nyomtatható filamentek mechanikai anyagjellemzőire

\* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

### 2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

### 3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrekció, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka mellékletében való csatolása szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott eszköz verziója, elérhetősége	MI-neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet bejegyzésének sorszáma

--	--	--	--

### 3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

*Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.*

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

A MATE-K/13-12/2025 iktatószámú 11/2025 (VIII. 29.) számú rektori utasítás: a **MESTERSÉGES INTELLIGENCIA HASZNÁLATÁRÓL SZÓLÓ SZABÁLYZAT** hatályba lépése előtt 2025. szeptember 1. előtt az MI használata engedélyezett.

### 4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: .....*Gyidallo*....., 2025. *október* hó *27* nap

.....*Nagy T.M.*.....

Hallgató aláírása

.....*Szalai László*.....

Konzulens/Témavezető aláírása



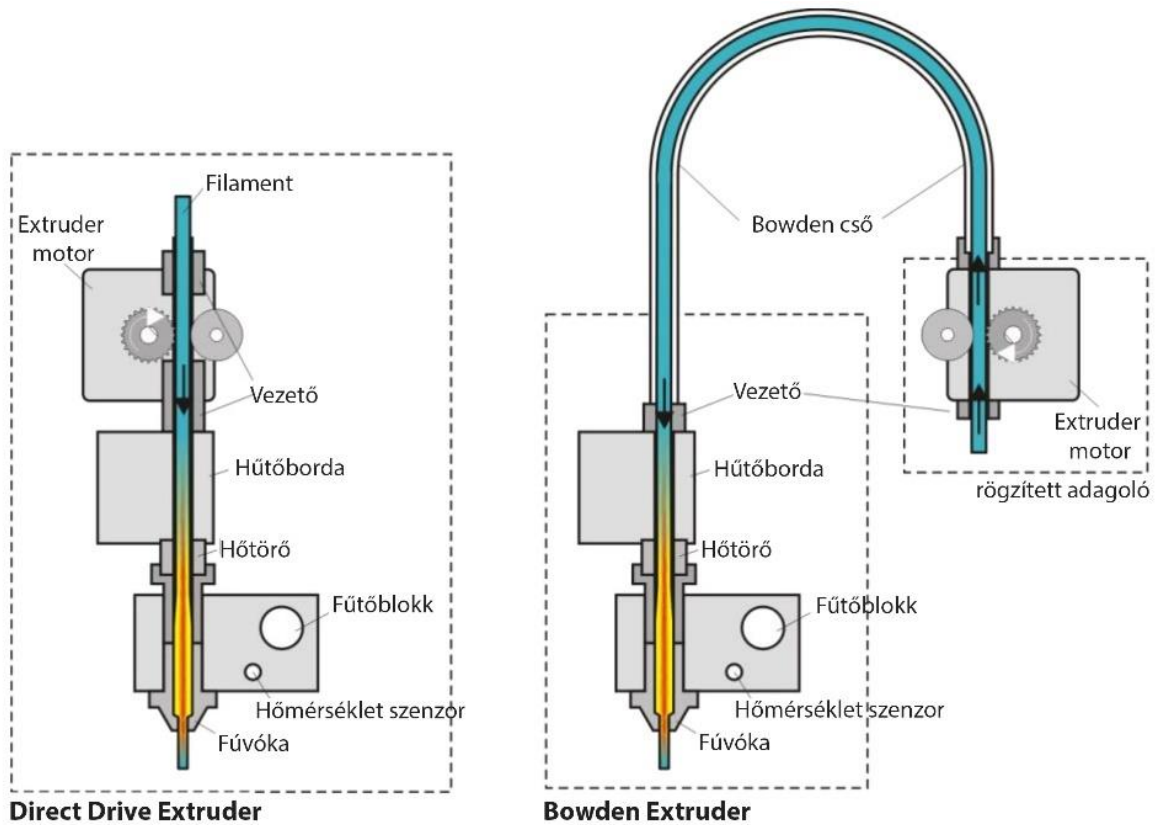
- [15] Xometry honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 01. 14. Forrás: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>
- [16] Extrudr honlapján található műszaki adatlap. Letöltés dátuma: 2025. 01. 14. Forrás: <https://www.extrudr.com/shop-eu/products/durapro-abs/?variant=UHJvZHVjdFZhcmlhbnQ6MTc4Ng%3D%3D>
- [17] All3DP honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 01. 15. Forrás: <https://all3dp.com/2/petg-filament-all-you-need-to-know/>
- [18] Extrudr honlapján található műszaki adatlap. Letöltés dátuma: 2025. 01. 15. Forrás: <https://www.extrudr.com/shop-eu/products/petg/?variant=UHJvZHVjdFZhcmlhbnQ6MTQ2NQ%3D%3D>
- [19] sunlu honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 01. 15. Forrás: <https://www.sunlu.com/en-de/blogs/products-knowledge/the-properties-of-tpu-material-and-its-application-in-3d-printing?srsId=AfmBOorHvBp-gefO7b7xP4vp1AwVmHmBkUOnc9foVqMaF7DfJClnuV5T>
- [20] Extrudr honlapján található műszaki adatlap. Letöltés dátuma: 2025. 01. 15. Forrás: <https://www.extrudr.com/shop-eu/products/flex-medium/?variant=UHJvZHVjdFZhcmlhbnQ6MTY3Mg%3D%3D>
- [21] Balla E., Daniilidis V., Karlioto G., Kalamas T., Stefanidou M., Bikiaris N D., Vlacopoulos A., Koumentakou I., Bikiaris D N. (2021): *Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications*. Thessaloniki, Greece: Laboratory of Polymer Chemistry and Technology, Department of Chemistry, Aristotle University of Thessaloniki. DOI: [10.3390/polym13111822](https://doi.org/10.3390/polym13111822)
- [22] TWI honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 01. 16. Forrás: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla>
- [23] All3DP honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 01. 16. Forrás: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>
- [24] Extrudr honlapján található műszaki adatlap. Letöltés dátuma: 2025. 01. 17. Forrás: <https://www.extrudr.com/shop-eu/products/pla-basic/>
- [25] Zsidai L., Sarankó Á., Szabó P. (2023): *Az additív technológiák terméktervezési és technológiai sajátosságai*. Gödöllő: Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata, pp. 19-20.
- [26] Cardona C., Curdes H. A., Isaacs J. A. (2016): *Effects of Filament Diameter Tolerances in Fused Filament Fabrication*. IU Journal of Undergraduate Research. DOI: [10.14434/iujur.v2i1.20917](https://doi.org/10.14434/iujur.v2i1.20917)
- [27] Razavykia A., Brusa E., Delprete C., Yavari R. (2020): *An Overview of Additive Manufacturing Technologies—A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting*. Torino, Italy: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Politecnico di Torino. DOI: [10.3390/ma13173895](https://doi.org/10.3390/ma13173895)
- [28] Bharucha H. A., Moore J., Carnahan P., MacCarthy P., Monaghan J. M., Baghai M., Deshpande R., Byrne J., Dworakowski R., Eskandari M. (2023): *Three-dimensional printing in modelling mitral valve interventions*. Echo Res Pract 10, 12. DOI: [10.1186/s44156-023-00024-x](https://doi.org/10.1186/s44156-023-00024-x)

- [29] Manufacturing guide honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 02. 18. Forrás: <https://www.manufacturingguide.com/en/binder-jetting>
- [30] TWI Global honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 02. 20. Forrás: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting>
- [31] 3DPrintedDecor honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 02. 28. Forrás: <https://3dprinteddecor.com/how-3d-printer-filament-is-made/>
- [32] Llobet P. A., Espanich X. F., Julián F., Ortega H. O., Méndez J. A. (2023): *Effect of Extruder Type in the Interface of PLA Layers in FDM Printers: Filament Extruder Versus Direct Pellet Extruder*. Terassa, Spain: Department of Materials Science and Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya. DOI: [10.3390/polym15092019](https://doi.org/10.3390/polym15092019)
- [33] bausano honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 02. 28. Forrás: <https://www.bausano.com/en/press-and-news/the-difference-between-single-screw-and-twin-screw-extruders>
- [34] Senkerik V., Bednarik M., Janostik V., Karhankova M., Mizera A. (2024): *Analysis of Extrusion Process Parameters in PLA Filament Production for FFF Technology*. Zlin, Czech Republic: Tomas Bata University in Zlin, Faculty of Technology; Faculty of Applied Informatics. DOI: [10.21062/mft.2024.037](https://doi.org/10.21062/mft.2024.037)
- [35] Kuo C., Chen J., Chang Y. (2021): *Optimization of Process Parameters for Fabricating Polylactic Acid Filaments Using Design of Experiments Approach*. New Taipei City, Taiwan: Department of Mechanical Engineering, Ming Chi University of Technology. DOI: [10.3390/polym13081222](https://doi.org/10.3390/polym13081222)
- [36] Wellzoom honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 05. Forrás: <http://wellzoomextruder.com/product/wellzoom-desktop-filament-extruder-b-pro/>
- [37] filabot honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 05. Forrás: <https://www.filabot.com/en-de/products/filabot-original-ex2?srsId=AfmBOoqsEJQh6bLi9yGiUhiW2m5ZtO1VWCXRuLyem-YnRzRBznsBOjfd>
- [38] filafab honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 05. Forrás: <https://www.filafab.co.uk/product/pro-350ex>
- [39] felfil honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 05. Forrás: <https://felfil.com/shop/felfil-evo-assembled/?v=058f38ac9331>
- [40] SubsTech honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 11. Forrás: [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore\\_durometer\\_hardness\\_test](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test)
- [41] Keyence honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 12. Forrás: <https://www.keyence.eu/huhu/ss/products/microscope/measurement-solutions/charpy-impact-test.jsp>
- [42] ZwickRoell honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 16. Forrás: <https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/tensile-test-iso-527-1-2/>
- [43] Senselektro honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 16. Forrás: <https://senselektro.hu/roncsolasos-anyagvizsgalat/statikus/szakitovizsgalat/>
- [44] Lim H., Hoag W S. (2013): *Plasticizer Effects on Physical–Mechanical Properties of Solvent Cast Soluplus® Films*. AAPS PharmSciTech. DOI: [10.1208/s12249-013-9971-z](https://doi.org/10.1208/s12249-013-9971-z)

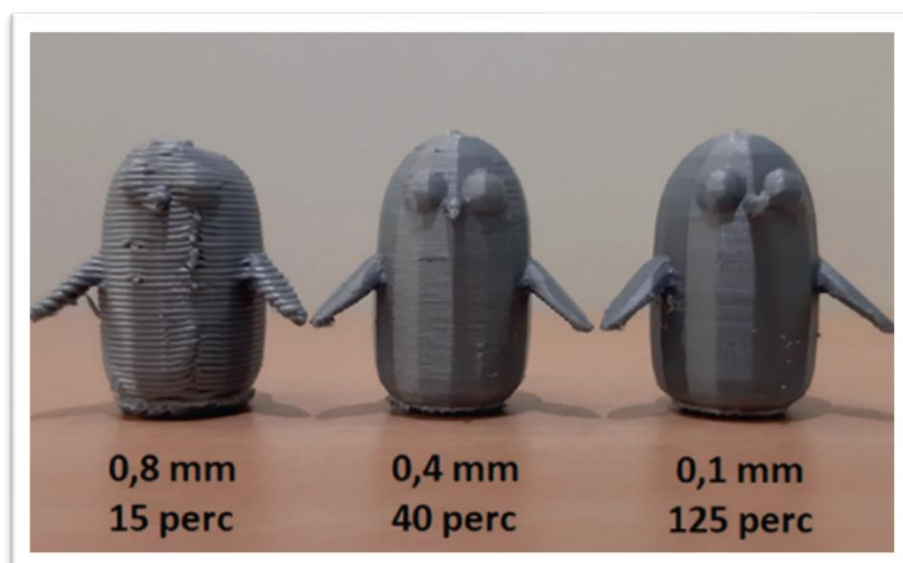
- [45] Freepik honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 29. Forrás: <https://www.freepik.com/>
- [46] Vecteezy honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 29. Forrás: <https://www.vecteezy.com/vector-art/28085837-extrusion-materials-engineering-color-icon-vector-illustration>
- [47] Dreamstime honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 29. Forrás: <https://www.dreamstime.com/tensile-testing-materials-engineering-color-icon-vector-illustration-sign-isolated-symbol-image299804011>
- [48] Sola A., Chong J. W., Simunec P. D., Li Y., Trinchi A., Kyratzis I., Wen C. (2023): *Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication*. CSIRO Manufacturing Business Unit, Clayton, Victoria, 3169, Australia. DOI: [10.1016/j.polymertesting.2022.107859](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107859)
- [49] Abass B., Hunain B. M. (2021): *Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Mechanical Strength of Epoxy Hybrid Composite Materials Reinforced with Unidirectional Carbon and Glass Fibers*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. DOI: [10.1088/1757-899X/1094/1/012159](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012159)
- [50] Bestmachinery honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 04. 27. Forrás: <https://bestmachinery.hu/a-telepitett-apritogepek-tipusai>
- [51] Vivalab honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 04. 27. Forrás: <https://www.vivalabporto.com/product-page/precious-plastic-shredder>
- [52] Felfil honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 04. 27. Forrás: <https://felfil.com/shop/felfil-shredder/?v=058f38ac9331>
- [53] 3DJAKE honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 06. 05. Forrás: <https://www.3djake.hu/sunlu/pla-white-12>
- [54] ASTM honlapja. Letöltés dátuma: 2025.10.17. Forrás: <https://store.astm.org/d0882-18.html>
- [55] MVM által közölt lakossági ártájékoztató. Letöltés dátuma: 2025. 10. 07. Forrás: <https://www.mvmnext.hu/aram/servlet/download?type=file&id=16214>
- [56] Wellzoom honlapja. Letöltés dátuma: 2025. 10. 07. Forrás: <http://wellzoomextruder.com/product/wellzoom-desktop-filament-extruder-b/>

# Mellékletek

## 1. Melléklet: FDM nyomtatók mellékletei



*Extruder és nyomtatófej felépítése Direct Drive Extruder, valamint Bowden Extruder esetén.  
Letöltés dátuma: 2025.01.12. Forrás: [10]*



*Egyes rétegvastagságok közti minőségi és időbeli eltérés. Forrás: [13]*

## 2. Melléklet: Filament alapanyagok mellékletei

DURAPRO ABS filamentre jellemző adatok	Mérési szabvány	
Nyomtatási hőmérséklet:	220-250 °C	-
Lágyulási hőmérséklet:	92 °C	ASTM D1525
Szakítószilárdság:	49 MPa	ASTM D638
Hajlítószilárdság:	78 MPa	ASTM D790
Szakadási nyúlás:	10%	ASTM D638

ABS-re jellemző adatok. Forrás: Saját szerkesztés az extruder műszaki adatlapja alapján [16]

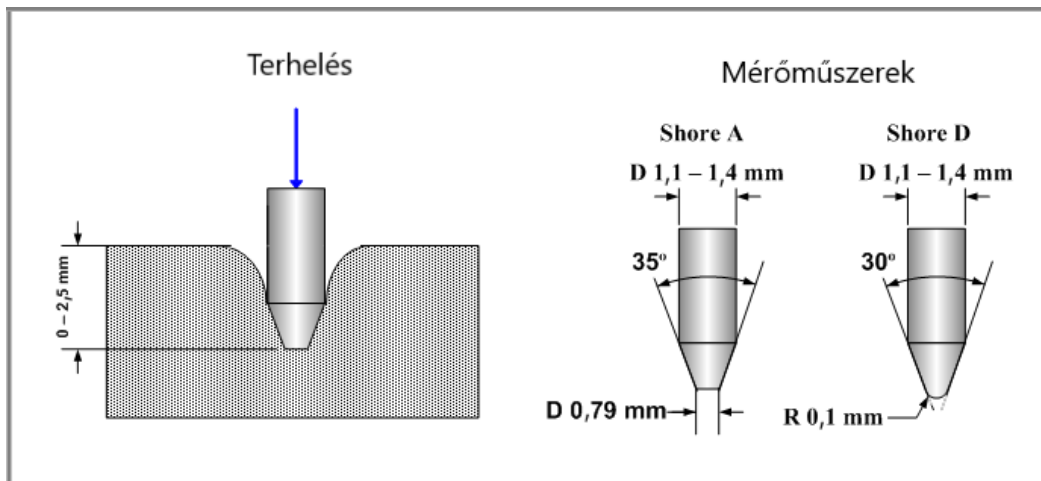
PETG filamentre jellemző adatok	Mérési szabvány	
Nyomtatási hőmérséklet:	210-230 °C	-
Lágyulási hőmérséklet:	78 °C	ISO 306
Szakítószilárdság:	61 MPa	ISO 527
Hajlítószilárdság:	68 MPa	ISO 178
Szakadási nyúlás:	28%	ISO 527-2

PETG-re jellemző adatok. Forrás: Saját szerkesztés az extruder műszaki adatlapja alapján [18]

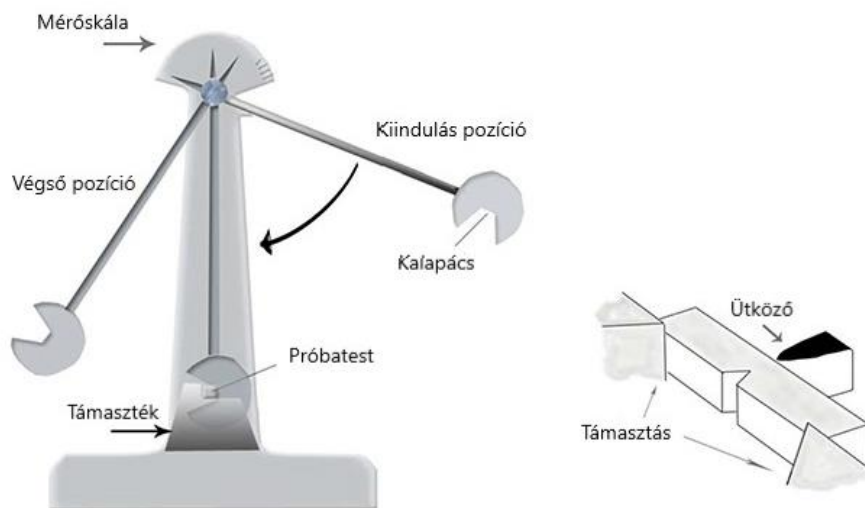
TPU filamentre jellemző adatok			
TPU típus:	Kemény TPU	Közepes TPU	Puha TPU
Shore keménység:	≈ 95A	≈ 90A	≈ 85-88A
Szakadási nyúlás:	200-300%	500%	700-1000%
Nyomtatási hőmérséklet:	230-250 °C		
Lágyulási hőmérséklet:	110 °C		
Szakítószilárdság:	20-100 MPa		

TPU-ra jellemző adatok. Forrás: Saját szerkesztés az extruder műszaki adatlapja, valamint sunlu honlapján található adatok alapján [19][20]

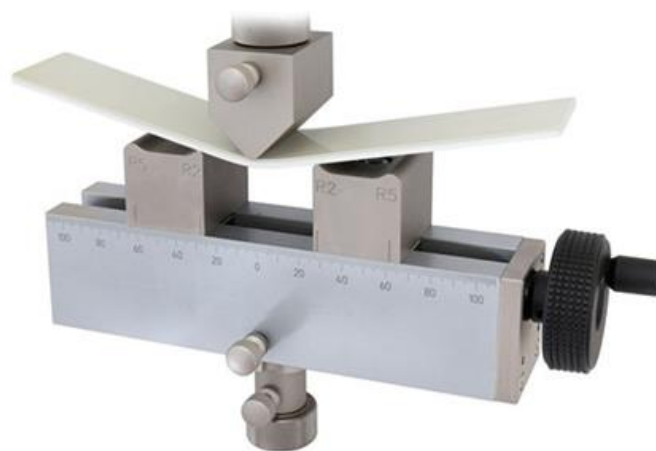
### 3. Melléklet: Anyagvizsgálati módszerek mellékletei



Shore A, Shore D kemységmérés elvi ábrája, műszerek méretei. Forrás: [42]

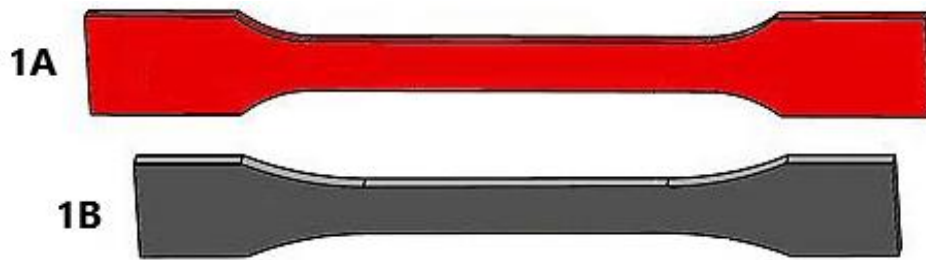


Charpy-féle ingás ütőmű elvi működése, próbatest rögzítési módja. Letöltés dátuma: 2025. 03. 12. Forrás: <https://atrona.com/charpy-testing.html>

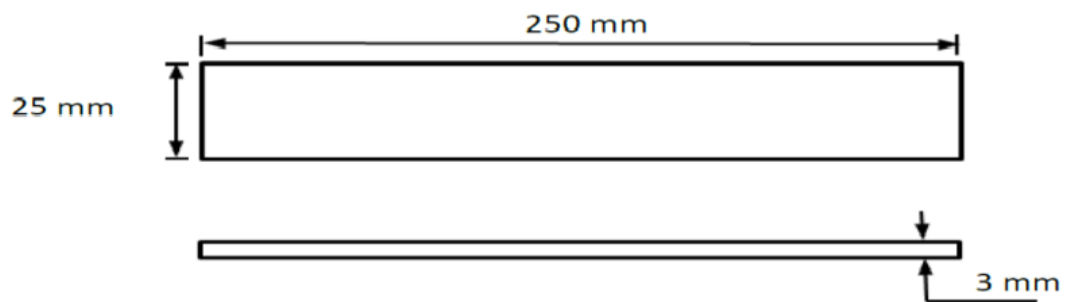


Illusztráció műanyag próbatest hajlítvizsálatáról. Letöltés dátuma: 2025. 03. 14. Forrás: <https://www.testresources.net/accessories/fixtures-by-standards/iso-fixtures/giso178-103>

#### 4. Melléklet: Szakítóvizsgálat mellékletei



ISO 527-2 1A és 1B kialakítású próbatetek. Forrás: [42]

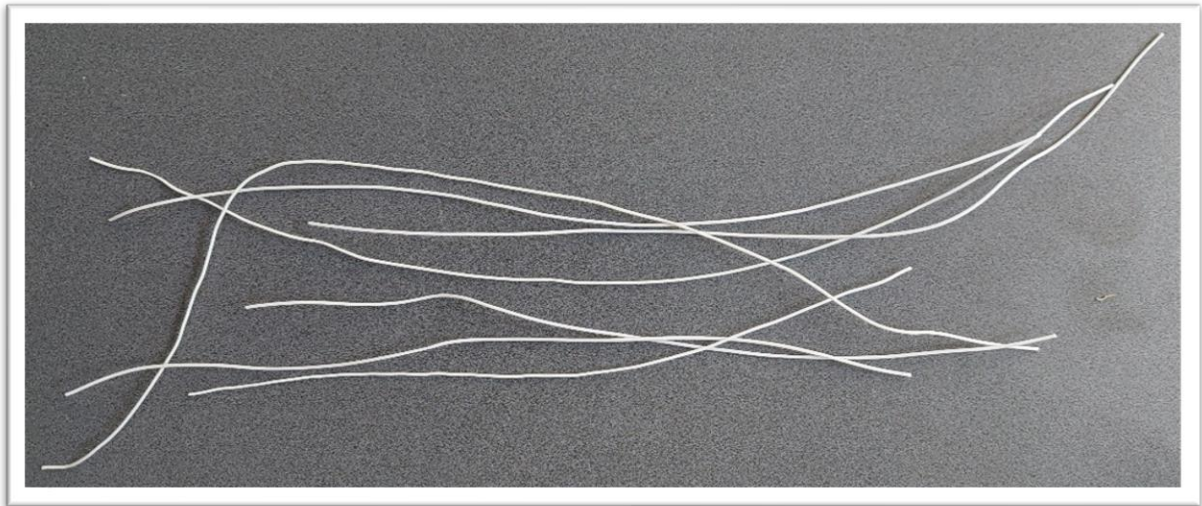


ASTM D3039 szabvány szerint kialakított próbatest. Forrás: [49]

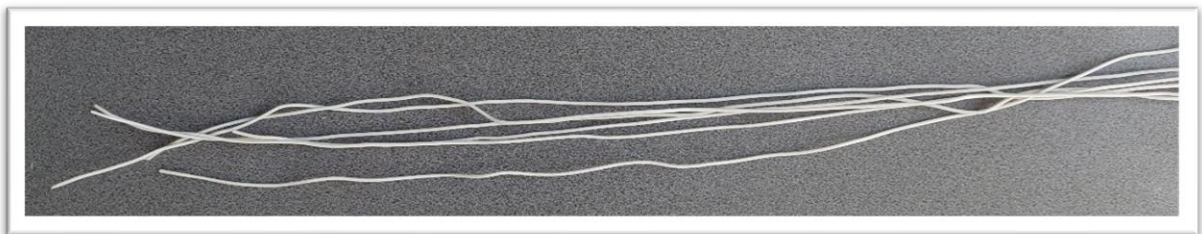
## 5. Melléklet: Vizsgált mintadarabok



*Eredeti filament tekercsről levágott mintadarabok.  
Forrás: saját készítésű fénykép, MATE Gépszerkezettani Labor, Gödöllő.*



*Egyszeresen újraextrudált mintadarabok.  
Forrás: saját készítésű fénykép, MATE Gépszerkezettani Labor, Gödöllő.*



*Kétszeresen újraextrudált mintadarabok.  
Forrás: saját készítésű fénykép, MATE Gépszerkezettani Labor, Gödöllő.*