



**SZÉCHENYI
EGYETEM**

UNIVERSITY OF GYŐR

GÉPÉSZMÉRNÖKI, INFORMATIKAI
ÉS VILLAMOSMÉRNÖKI KAR

TDK dolgozat

Újrahasznosított filament előállítása: Szűrés hatása a filament nyomtathatóságára és anyagtulajdonságaira

Sebestyén Máté

K2KD4G

Gépészmérnöki BSc szak

Konzulens és társkonzulens:

Fekete Imre, Jakab Sándor Kálmán

Anyagtudományi és Technológiai Tanszék

Győr, 2024

Kivonat

Újrahasznosított filament előállítása: Szűrés hatása a filament nyomtathatóságára és anyagtulajdonságaira

Az utóbbi években a 3D nyomtatás térnyerése meghatározó, ami a technológia számos előnyének köszönhető. Ilyenek például az anyagtakarékos egyedi gyártás, gyors prototípus készítés, valamint alacsony gyártási költség. Azonban a technológia egyre növekvő népszerűségével párhuzamosan a nyomtatási folyamat során keletkező műanyag hulladék mennyisége is növekszik. Így a 3D nyomtatás hulladékainak újrahasznosítása a fenntarthatóság szempontjából kiemelkedő fontosságú, azonban jelenleg még nincs széleskörben elterjedve. A dolgozatomban fókuszában a 3D nyomtatásból származó PLA alapú hulladék újrahasznosítási folyamatának optimalizálása áll. A PLA hulladék feldolgozása több lépésből áll, melyből az egyik meghatározó folyamata a filament gyártás, amely során komoly kihívást jelent a kevert műanyag hulladékok homogenitásának biztosítása. A darálékban előforduló szennyezők negatív hatást gyakorolhatnak az újrahasznosított szál minőségére. Ezen probléma megoldása érdekében egy kísérleti szűrőberendezést terveztem és gyártottam le, amely képes az extrúziós folyamat során kiszűrni az idegen anyagokat, így biztosítva az ömledék megfelelő tisztaságát és homogenitását. Kutatásom célja az ömledék optimális szűrési mértékének meghatározása volt, továbbá az összefüggések feltárása a szűrés mértéke és az újrahasznosított filamentek nyomtathatósága, valamint a nyomtatott darabok anyagtulajdonságai között.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés.....	2
2.1. Additív gyártástechnológia	2
2.2. Újrahasznosítás nehézségei.....	3
2.3. PLA újrahasznosítás és hatásai	4
3. Kutatás	6
3.1. Piaci kihívások kutatása	6
3.2. Kísérleti terv.....	6
3.3. Folyamat leírása	8
3.4. Szűrőberendezés tervezése és gyártása	9
3.5. Szűrés hatása az extrudálási folyamatra.....	10
3.6. Szűrés hatása a nyomtathatóságra.....	12
3.6.1. MFI vizsgálat	12
3.6.2. Filament és próbatestek méretpontossága.....	13
3.7. Szűrés hatása az anyagtulajdonságokra	15
3.7.1. Ütővizsgálat	16
3.7.2. Szakítóvizsgálat	17
3.7.3. Hajlítóvizsgálat	18
3.7.4. CT vizsgálat	18
3.7.5. SEM vizsgálat	21
4. Eredmények és konklúzió	23
4.1. Szűrés hatása az extrudálási folyamatra	23
4.2. Szűrés hatása a nyomtathatóságra.....	23
4.3. Szűrés hatása az anyagtulajdonságokra	24
4.4. Eredmények összegzése	24
4.5. További kutatási lehetőségek	25
5. Irodalomjegyzék.....	26
6. Mellékletek.....	27

1. Bevezetés

Az utóbbi években a 3D nyomtatási technológia egyre növekvő népszerűségnek örvend, azonban nem is gondolnánk, hogy mennyi műanyag hulladék keletkezik a nyomtatások során. Magyarországon a vezető bérnyomtató szolgáltatásoknál évente több mint 2 tonna ilyen jellegű hulladék keletkezik, a hobbinymtatókat is beleszámolva ez akár többszöröse is lehet. Jelenleg ezen hulladékok felhasználása kiaknázatlan, mivel több kihívást is takar a műanyag szétválogatása és feldolgozása. Fontos volt számomra, hogy valós piaci problémára keressek megoldást a kutatásom során. Így célom volt, hogy kevert 3D nyomtatási hulladékból jól használható filamentet tudjak gyártani. Ezen hulladékok újrahasznosításában számos lehetőség rejlik, azonban az eddigi kutatások gyakran túlságosan specifikusak voltak ahhoz, hogy valós piaci alkalmazhatóságot biztosítsanak. Ezért fontos volt, hogy a kiinduló alapanyagom minél jobban megfeleljen az életből vett gyűjtési és szelektálási paramétereknek. Így a kutatásom és vizsgálataim sokkal használhatóbbak lesznek, illetve hozzájárul a 3D nyomtatási hulladék újrahasznosításának skálázhatóságában, szélesebb körben való elterjedésében.

2. Irodalmi áttekintés

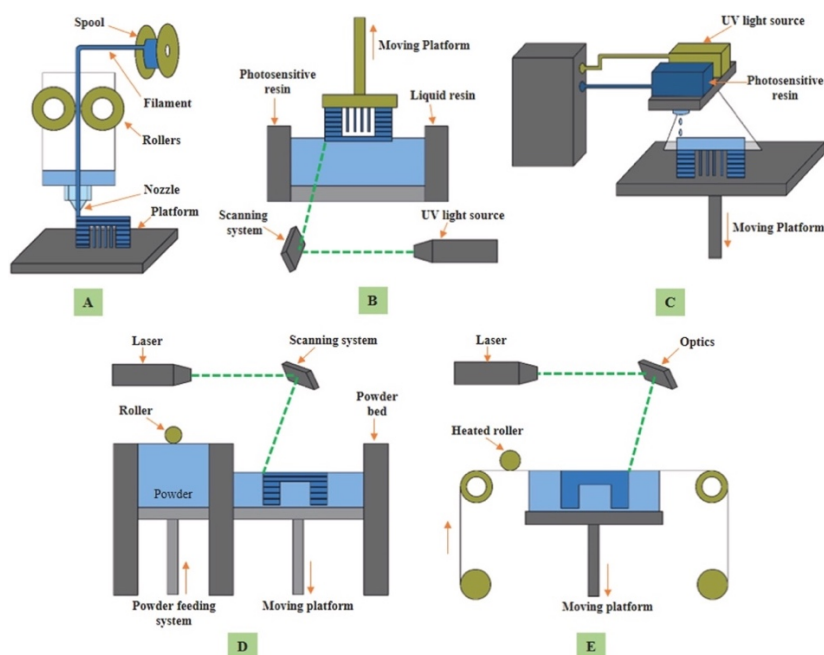
Ebben a főfejezetben az irodalmi áttekintésemet részletezem. Elsőként bemutatom az additív gyártás lehetőségeit. Ezt követően bemutatom a polimer újrahasznosítás nehézségeit, fókuszálva a PLA alapú hulladékok feldolgozására.

2.1. Additív gyártástechnológia

Az additív gyártástechnológia az elmúlt évtizedben nagy fejlődésen ment keresztül és népszerűségének növekedése máig töretlen. A technológiát a mérnöki területeken túl számos más iparágban is alkalmazzák, mint például: orvostudomány, divat, oktatás. A 3D nyomtatás előnyei közé tartozik, hogy nagy tervezési szabadságot biztosít, hiszen rendkívül bonyolult alakzatok valósíthatók meg rövid időn belül, mindez anyagtakarékos gyártás mellett. [1]

Az additív gyártástechnológiának több alfajtája is létezik, melyek eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek a nyomtatható anyag és a végtermék minőségét illetően. Az egyik legelterjedtebb technika, ipari és hobbi szinten egyaránt, a Fused Deposition Modeling (továbbiakban: FDM), amely lényege a rétegek egymásra építése, hőre lágyuló műanyag szál extrudálása segítségével (lásd 1. ábra A rész). Az additív gyártástechnológiák közül ez a legköltséghatékonyabb. A PolyJet technológia a hagyományos tintasugaras nyomtatók működéséhez hasonlítható a legjobban. A működésének alapja, hogy a nyomtatófejek fotopolimert csepegtetnek a munkalapra, majd azt ultraviola fény segítségével térhálósítják (lásd 1. ábra C rész). A PolyJet nyomtatás lehetővé teszi a sima felületű, többszínű precíziós prototípusok gyártását, így elsősorattal alkalmazzák protézisek és implantátumok gyártásához. Egy másik additív gyártástechnológiai módszer a sztereolitográfia (továbbiakban: SLA). A technológia alapját képezi a gyanta alapanyag, melyet egy pásztázó lézersugár térhálósít ki (lásd 1. ábra B rész). A továbbfejlesztett modellekben az adott rétegek szilárdítása akár egyidejűleg is történhet. A módszer rendkívül anyagtakarékos, hiszen a termék elkészítését követően a felesleges folyékony gyanta lecsöpög a tartályba, így a továbbiakban felhasználható marad. További 3D nyomtatási megvalósítás a Selective Laser Sintering (továbbiakban SLS). A technológia különlegessége, hogy ebben az esetben szál és gyanta helyett, por alapanyag kerül felhasználásra. A porszemcsék összeolvasztása lézernyaláb segítségével történik (lásd 1. ábra D rész). Az SLA technológiához hasonlóan, a felesleges anyag eltávolítható a kész darabról, azonban a tisztítási folyamat körülményes lehet. Az FDM technológiával szemben, a por alapanyag miatt, itt további munkavédelmi intézkedésekre van szükség. Az ötödik additív gyártástechnológiai módszer a Laminated Object Manufacturing (továbbiakban: LOM)

technika. A LOM alapja, hogy vékony lapokat hővel egymáshoz ragasztanak, valamint a termék kontúrja kivágásra kerül egy lézer segítségével (lásd 1. ábra E rész). Ez a módszer meglehetősen lassú nyomtatást tesz lehetővé, továbbá anyagpazarló is. [1]



1. ábra Az additív gyártástechnológia módjainak sematikus ábrázolása [1]

A továbbiakban csak az FDM nyomtatási technológiával foglalkozok, hiszen legszélesebb körben ez a módszer terjedt el.

2.2. Újrahasznosítás nehézségei

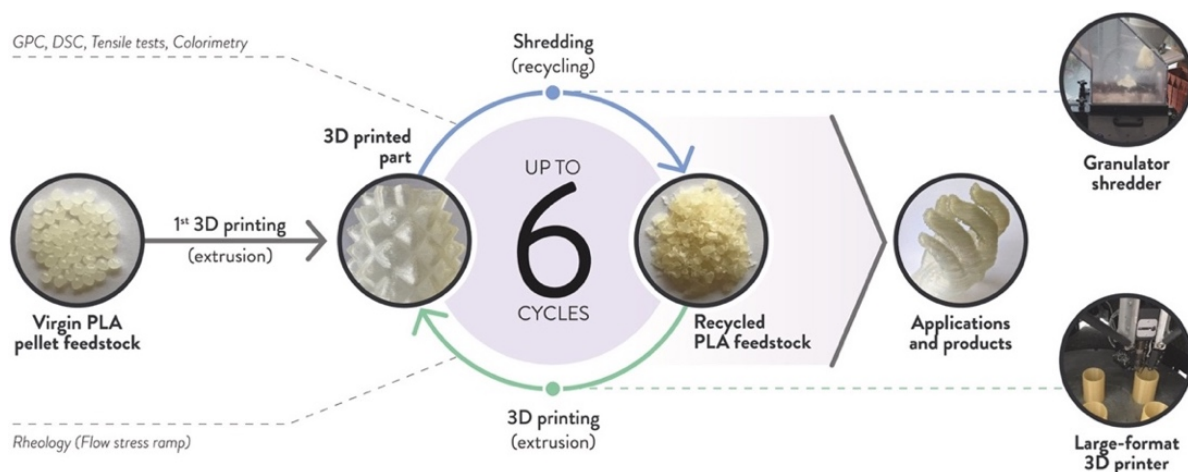
Az újrahasznosított anyagok minőségének értékelésénél több szempont figyelembevétele is szükséges lehet. Szakirodalmakban széles körben találhatunk vizsgálatokat az említett témában. Fontos szempont a minta keveredési foka továbbá azokban jelenlévő idegenanyagok mennyisége. Továbbá a szennyeződések jelenléte negatív hatással lehetnek a feldolgozott polimer mechanikai tulajdonságaira. A polimerek anyagszerkezete az újrahasznosítási folyamat során termomechanikai degradációt szenved el. Ebben az esetben számos anyagvizsgálati módszert kell alkalmazni a mechanikai és anyagszerkezeti tulajdonságok változásának a meghatározására. Az említett szempontokat értékelve következtetéseket lehet levonni a feldolgozott polimer életciklusára, továbbá felhasználhatóságára adott gyártási műveletek során. [2], [3]

A szakirodalmakban kidolgozott folyamatok és eljárások mindegyike azzal a kritériummal él, hogy a kiinduló anyag szűz polimer, így az egyik legfontosabb szempont vizsgálatára nem kerül sor, ami a kevertési fok, illetve a szennyezők hatásának a vizsgálata az újrahasznosított polimerre. [2], [3], [4]

2.3. PLA újrahasznosítás és hatásai

Az FDM nyomtatáshoz használt egyik legelterjedtebb anyag a politejsav (továbbiakban: PLA), mely biológiailag lebomló polimer. A PLA széles körben használható használati tárgyak elkészítéséhez, valamint az újrahasznosítási folyamata is kivitelezhető. [2], [3]

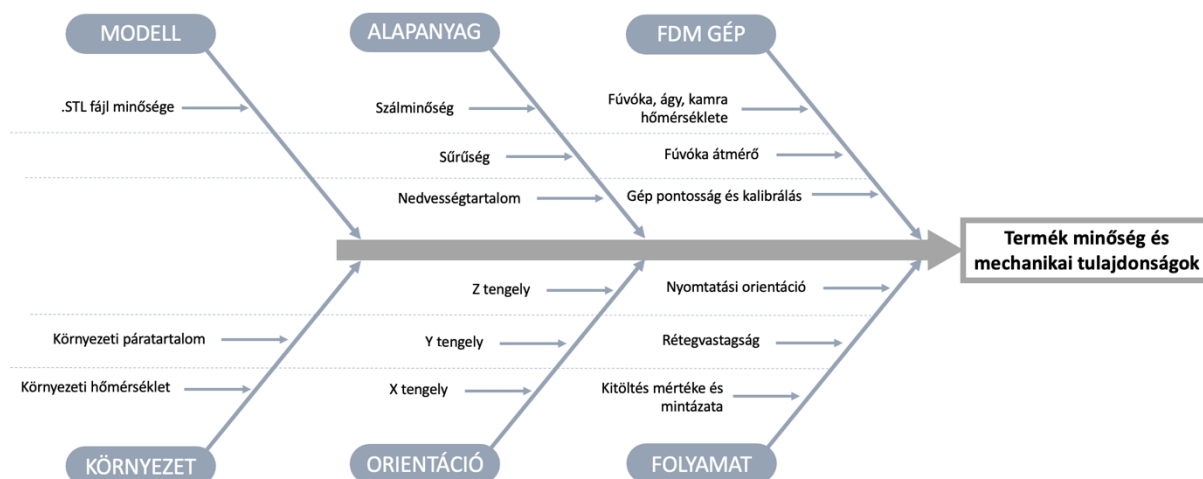
Az újrahasznosított PLA potenciális alternatívát kínál a gyári PLA anyagokkal szemben. Az újrahasznosított anyagból készült termékek a környezeti szempontokat figyelembe véve mindenképp pozitív hatású, azonban az alapanyag többszöri feldolgozása a mechanikai tulajdonságok romlását, így a végtermék alacsonyabb minőségét okozhatja. Ebben a vonatkozásban fontos információ lehet, hogy egy adott műanyagot hányszor lehet újból feldolgozni, míg a mechanikai tulajdonságai nem kezdenek el drasztikusan romlani. Kísérletekben már vizsgálták a PLA újrahasznosítási ciklusai hatására bekövetkező anyagminőség romlást a következő kísérleti folyamattal: darálás, extrudálás 3D nyomtatóval, majd az anyagvizsgálati műveletek (lásd 2. ábra). Fontos azonban, hogy a kísérletben granulátumos nyomtatót alkalmaztak, így a filamenthúzásnál történő újabb ömlesztéstől megkímélve az alapanyagot. A kiinduló granulátum szűz PLA volt. A kísérletekből megállapították, hogy az újrahasznosítási ciklusok számának növekedésével egyre nagyobb mértékű az anyag molekulatömegének a csökkenése. A kiindulási mintához képest a hatodik ciklust követően felére csökkent a molekulatömeg. Ezzel szemben, az anyag termikus tulajdonságai a feldolgozási ciklusok következtében alig változtak meg. A kezdeti anyaghoz képest a hatos mintánál, mindössze 2,3°C-kal csökkent az olvadási hőmérséklet. Azonban az entalpiaváltozás nagy növekedést mutat a ciklusok növelésével. A különböző ciklusokból származó alapanyaggal 3D nyomtatási próbát is végeztek. A nyomtatásokból megállapítható, hogy a darabok minősége meglehetősen egyenletesen alakult, azonban a kezdeti áttetsző színű darab sárga, barna árnyalatúvá alakult.



2. ábra PLA újrahasznosítási ciklusainak vizsgálata [4]

Az irodalomban bemutatott kutatás részletesen elemzi a PLA termomechanikai degradációját az egyes újrahasznosítási ciklusokat követően. A kísérletek alapján meghatározták, hogy egyszerű formák nyomtatásához maximum öt, bonyolultabb geometriák esetében maximum három újrahasznosítás ciklusig használható az anyag, a minőség túlzott romlása nélkül. Az irodalomban vizsgált eset azonban nagyon specifikus. A hulladékok gyűjtésénél ritkán fordul elő, hogy a hulladékkeverék összetevői megegyező ciklusszámmal rendelkeznek. Így a kutatás kiterjesztése fontos lehet a kevert hulladékok vizsgálatára is (különböző ciklusszámú PLA hulladékok összekeverése és a kialakuló anyagtulajdonságok vizsgálata) az újrahasznosítási folyamat skálázhatósága szempontjából. [4]

Az FDM nyomtatók rendkívül sok beállítási lehetőséget kínálnak, így a kialakult anyagtulajdonságokat a nyomtatási paraméterek is nagymértékben befolyásolják. A nyomtatott darab minőségére hatással van a nyomtatási hőmérséklet, ágyhőmérséklet, a nyomtatás orientációja, a kitöltés mértéke és mintája, a nyomtatási rétegvastagság és még sok más egyéb paraméter (lásd 3. ábra).



3. ábra A nyomtatott terméket befolyásoló tényezők [5]

Több kutatásban is megállapították, hogy a nyomtatási orientáció, valamint a nyomtatási hőmérséklet kritikus fontosságúak a kialakuló darab tulajdonságai szempontjából. A magasabb nyomtatási hőmérsékletnek köszönhetően a megszilárdulás folyamata lassabban zajlik le, amely a rétegek közötti kötések minőségének a javulását okozza. Az x tengellyel 90°-os szöget bezáró nyomtatási irányultság bizonyult a legkedvezőbbnek, 0°-nál voltak a legalacsonyabbak a mechanikai tulajdonságok. A kitöltési mintázatot illetően, PLA esetében megállapították, hogy a háromszög alakú kitöltési mintázattal készült próbatesteknek nagyobb a teherbíró képessége, összehasonlítva a tri-hexagon és a koncentrikus kitöltési mintákkal. [6], [7], [8]

3. Kutatás

Ebben a főfejezetben a kutatásom részleteit fejtem ki. Először a piackutatásomat mutatom be a 3D nyomtatott hulladékok kapcsolatában, majd a hipotézisem vázolása következik. Ezt követően a kutatásom menetét részletezem, majd az újrahasznosítási folyamatot mutatom be részletesen. A dolgozatom kulcseleme a kísérleti szűrőberendezés, így annak tervezési és gyártási lépéseit is részletezem. Mindezek után kifejtem a mérési eredményeimet és következtetéseket vonok le a szűrés hatásairól.

3.1. Piaci kihívások kutatása

A 3D nyomtatás során keletkező hulladékok újrahasznosítása során nagy kihívást jelent a feldolgozni kívánt minta meghatározása, ugyanis ezen hulladékok szétválasztása többféle módon is történhet. Piackutatásom alapján négy csoportot határoztam meg a szelektálás mértékének függvényében. Az első kategóriába esnek azok a személyek, akik egyáltalán nem választják szét a műanyag hulladékokat, így egyazon mintába kerülhet többféle műanyag is. A következő, második csoportba tartoznak azok, akik anyagtípust megkülönböztetve szelektálják a 3D nyomtatási hulladékot, így egy mintába például csakis PLA hulladék fog belekerülni. A harmadik csoportba soroltam azokat a személyeket, akik az adott műanyagfajtán belül szín szerint is megkülönböztetik a hulladékot, továbbá a negyedik csoportban már az anyagtulajdonságokat is figyelembe veszik. 3D nyomtatási szolgáltatásokkal folytatott interjúim során kiderült, hogy a saját folyamataikba a második csoportban bemutatott szelektálási módot tudnák leginkább implementálni. A szín szerinti különválogatás már nagyobb energiaráfordítást igényelne a vállalkozások részéről, továbbá az anyagtulajdonság szerinti (vagy márka szerinti) szelektálást nem találták megvalósíthatónak.

Ebben a tanulmányban az újrahasznosítani kívánt mintáim a kettes csoportban meghatározott személyektől származik, így az műanyag fajtája csakis PLA, azonban a különböző színű és anyagtulajdonságú hulladékok keverednek.

Jelen tanulmányban minden olyan anyagot szennyeződésként, idegen anyagnak nevezek, melyek eltérőek a PLA-tól, hiszen csakis a PLA újrahasznosítási lehetőségét vizsgálom. A gyűjtés és a szétválogatási folyamatban szinte elkerülhetetlen, hogy szennyeződések kerüljenek a PLA műanyaghoz (például fémes szennyezők, fa, szövet, szerves anyagok). Továbbá az extrudálási folyamat során előfordulhat, hogy a csigákról válnak le olyan anyagok, amelyeket egy korábbi kísérletben, gyártásban alkalmaztak, annak ellenére, hogy utána ki lett járattva, tisztítva az extrúder. Ezek az idegenanyagok befolyásolhatják a gyártandó filament minőségét.

Ennek okán meghatározó lehet egy ömledékszűrő berendezés alkalmazása, amely az előbb említett szennyeződések szűri ki.

3.2. Kísérleti terv

A dolgozatom fókuszában a PLA alapú 3D nyomtatából származó hulladék újrahasznosítási folyamatának optimalizálása áll. Az eddigi kutatásokkal ellentétben a kiinduló alapanyag nem szűz polimer, hanem a PLA nyomtatási hulladékok kevert formában. Az anyagok válogatása során nehézkes, hogy a PLA-tól eltérő anyagok ne kerüljenek a darálékba, így azok a továbbiakban problémát okozhatnak az extrúzió folyamatában, illetve az anyagminőségre is negatív hatással lehet. Ez indokolta a kísérleti szűrőszerszám tervezését és gyártását. A tervezett szűrőberendezés passzív elem, nem rendelkezik mozgó alkatrészekkel.

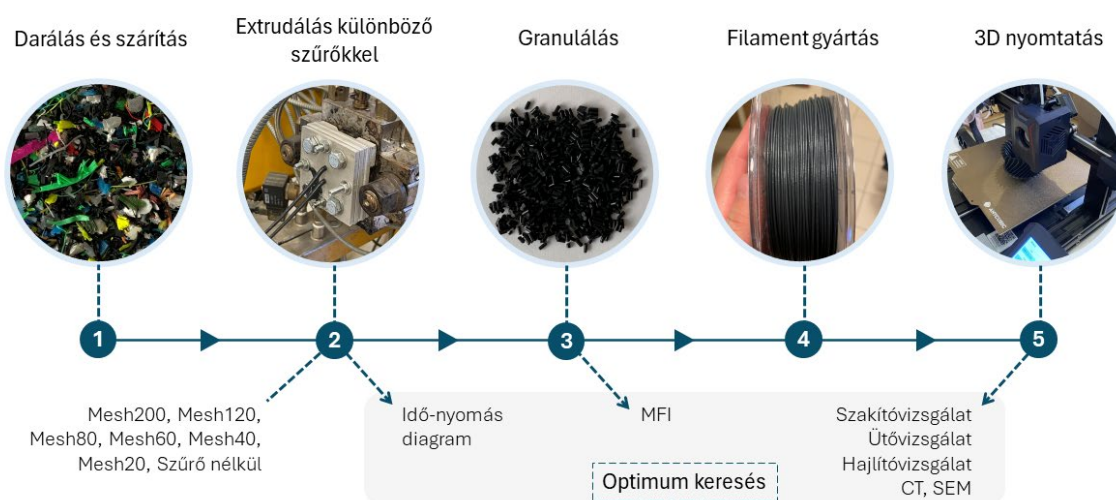
Hipotézisem alapján a szűrőszerszám segítségével az extrúziós folyamatban kiszűrhetők a szennyezők, így növelhető az újrahasznosított anyag nyomtathatósága és mechanikai tulajdonságai. A szűrőméret megválasztása kritikus fontossággal bír, hiszen meghatározza a kiszűrhető idegenanyagok méretét, azonban hatással van az extrúziós folyamat paramétereire is. Feltételezésem szerint egy bizonyos mesh szám (1 inch hosszon található szitaszövetek száma) felett a szűrőbetét túl gyorsan tömődne el, így az extrudálási nyomást olyan magasra növelve, hogy nem folytatható a művelet. Így léteznie kell egy optimális szűrőbetét mesh értéknek, amely megfelelően kiszűri a szennyezőket, így az újrahasznosított filament minőségét javítva, azonban az extrúziós nyomást sem emeli a biztonságos tartomány fölé.

Feltételezésem igazolása érdekében hatféle különböző mesh számú szűrőbetétet alkalmaztam. Összességében hét extrudálási folyamatot végeztem rendre a következő szűrőkkel: 200 mesh, 120 mesh, 80 mesh, 60 mesh, 40 mesh, 20 mesh, szűrő nélkül. Minden kísérlet esetében digitálisan mértem az idő–extrudálási nyomás görbét, mely alapján következtetések vonhatóak le az eltömődés gyorsaságára. Továbbá minden gyártásból származó granulátumot MFI vizsgálatnak vetettem alá, hiszen ez a polimerrel történő gyárthatóság egyik legmeghatározóbb mérőszáma. Ennek segítségével meghatározható, hogy mely szűrővel készült filament használható leginkább 3D nyomtatáshoz. Végül mind a hét gyártásból származó filament szállal próbatesteket nyomtattam, így az anyagvizsgálatok alapján felderíthetők a mechanikai tulajdonságok. A kutatás során szakító-, hajlító- és ütővizsgálatokat végeztem a nyomtatott próbatesteken, valamint CT és SEM vizsgálatot.

Az alkalmazott feldolgozási folyamat részletei, a kísérleti szűrőberendezésem paramétereit és tervezési lépései, valamint az anyagvizsgálatok körülményei és eredményei alább olvashatóak.

3.3. Folyamat leírása

A kutatásomban alkalmazott újrahasznosítási folyamat számos lépésből áll (lásd 4. ábra). Először a különválogatott PLA nyomtatási hulladékok darálására került sor. A folyamat késes darálóval (F.LLI VIRGINIO) történt. Ezt követően a darált műanyag 4 órán keresztül kiszáritásra került 80°C-on szárító kamrában (Faithful WGLL 125B), majd következett az extrúziós folyamat. Az extrudálási műveletet kétszigás extruderrel (Labtech Scientific LTE 20-44) végeztem (lásd 20. sz. melléklet), melynek adatait mindvégig rögzítettem. Az extruder zónahőmérsékletei az etető garattól a szerszámgigáig rendre a következők voltak: 155°C, 155°C, 160°C, 160°C, 165°C, 170°C, 175°C, 180°C, 180°C, 185°C, 185°C. A csiga forgási sebessége 30 1/perc volt. Az extruder gép végére rögzítettem a kísérleti szűrőszerszámomat, melynek különlegessége, hogy a szűrőbetéteket cserélni lehet benne. A szerszámból kijövő szál levegőn lett hűtve ventilátorok segítségével, futószalag mentén (lásd 21. sz. melléklet). Ezután egyből a granulálógépbé (Labtech-Scientific-LZ120) lett irányítva a szál, így tudtam garantálni a feldolgozható granulátumot (lásd 22. sz. melléklet). A darálási sebesség 7 méter/perc volt. Ezt követően az granulátumot 1 órán keresztül a már előbb említett szárító kamrában kristályosítani hagytam 80°C-on. Kristályosításra azért volt szükség, hogy a következő lépésben történő szál gyártás során a granulátum ne tapadjon össze a hűtéssel nem rendelkező felmelegedett garatban. Következő lépésben történt a szabályozott átmérőjű szál gyártása. Ezt egy filament gyártó berendezéssel (3devo) valósítottam meg (lásd 23. sz. melléklet). A gép 1,75 mm átmérőjű szál gyártására volt beállítva, valamint a zónahőmérsékletei az etetőtől indulva rendre a következőképpen alakultak: 170°C, 185°C, 190°C, 170°C. A csiga forgási sebessége 3,4 1/perc volt. A készített filament mintákkal próbatéstekeket nyomtattam FDM technológiával (Creality Ender 3), melyeken anyagvizsgálatokat végeztem.



4. ábra Újrahasznosítás folyamata

A kutatás során hét extrúziós kísérletet végeztem, amely változó paraméterei az alábbi táblázatban látható (lásd 1. táblázat).

Kísérlet azonosító	Szűrőbetét MESH szám	Szűrő lyukméret [mm]	Nyitott terület [%]	Megtámasztás	Összesített nyitott terület [%]
Exp1	200	0,077	37	van	19,24
Exp2	120	0,122	33	van	17,16
Exp3	80	0,178	31	van	16,12
Exp4	60	0,263	39	-	39
Exp5	40	0,411	42	-	42
Exp6	20	0,915	52	-	52
Exp7	szűrő nélkül	-	100	-	100

1. táblázat Kísérleti paraméterek és szűrőértékek

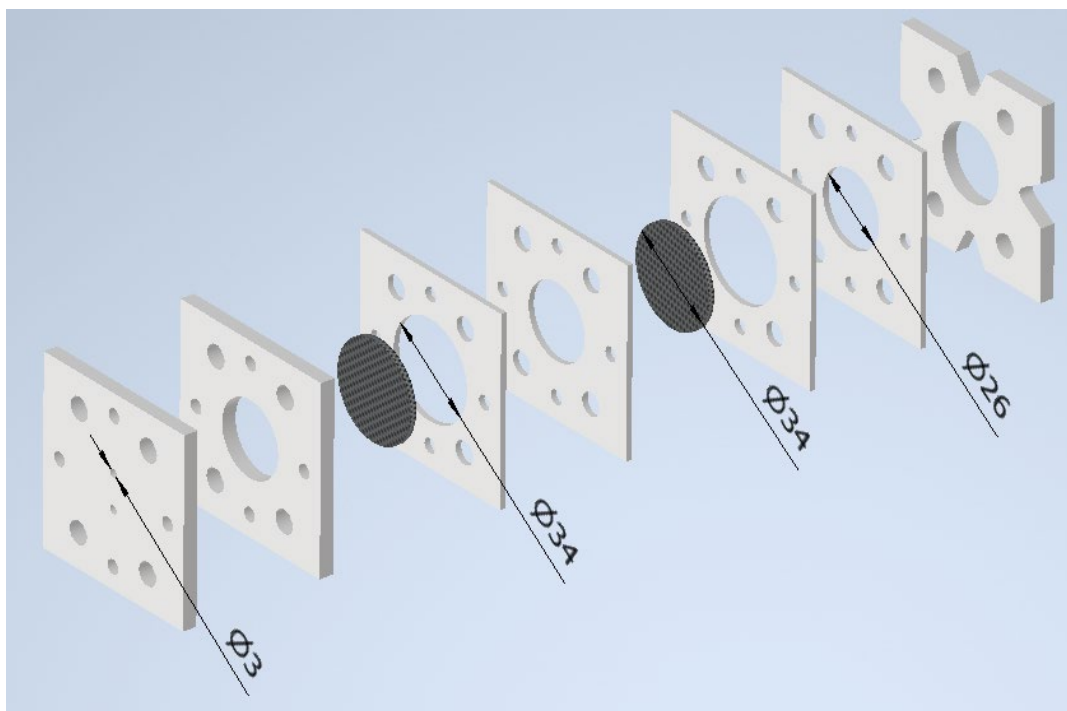
Az első három kísérlet esetében az alap szűrőbetét mögé megtámasztás is szükséges volt, melyet a táblázat is szemléltet. A támasz áteresztőképessége 52% volt. Így azonban a szerszám nyitottsága csökken. Ebben az esetben az összesített nyitott terület lesz a mérvadó, mely a két szűrő nyitottsági értékének szorzataként kaptam meg. A kísérleti szűrőszerszám kulcseleme a kutatásomnak, így a következő alfejezetben annak tervezési és gyártási lépéseit mutatom be.

3.4. Szűrőberendezés tervezése és gyártása

A szűrőkészülék tervezésének legfőbb szempontjai voltak, hogy a különböző szűrőbetétek könnyen cserélhetőek legyenek, továbbá fontos volt, hogy saját erőforrásból meg lehessen valósítani a gyártást. A tervezéshez ezeket alapul véve egy réteges konstrukciót gondoltam ki, így ezen lemeztételek közé történik a betétek beszorítása (lásd 5. ábra).

A kezdeti vázlatokat követően megterveztem az egyes darabokat CAD programban (Autodesk Inventor 2024), valamint megvizsgáltam az összeszerelhetőségét a 3D összeszerelési módban, mely az alábbi ábrán is látható. A berendezés hét rétegből tevődik össze. A szűrőbetétet hordozó lemezek 34 mm átmérőjű lyuk található, az azokat közrefogó rétegekre pedig 26 mm átmérőjű lyukakat helyeztem. Így biztosítható a betétek megfelelő felfekvése. A záróelemek vastagabb lemezből készültek (5 mm), a nagyobb terhelések kibírása érdekében. A berendezés zárólemezén kettő darab 3 mm átmérőjű lyuk helyezkedik el, melyen távozik a műanyag ömladék. Mivel a vékonyabb szűrők könnyebben elszakadhatnak, így mögéjük megtámasztás céljából perforált lemezt helyeztem el. Ezeknek a mérete megegyezik

a szűrőbetét méretével. A lemezek kivágását abrazív vízvágó géppel (Flow Waterjet) valósítottam meg. Rendkívül fontos, hogy az egyes lemezek megfelelően illeszkedjenek egymáshoz, hiszen a nagy nyomás hatására sem préselődhet ki az ömledék a rétegek között. A megfelelő illeszkedés érdekében a gyártást követően minden réteget gondosan sorjamenetesítettem, illetve a felületüket finomszemcsés csiszolópapírral megfelelően simára csiszoltam.



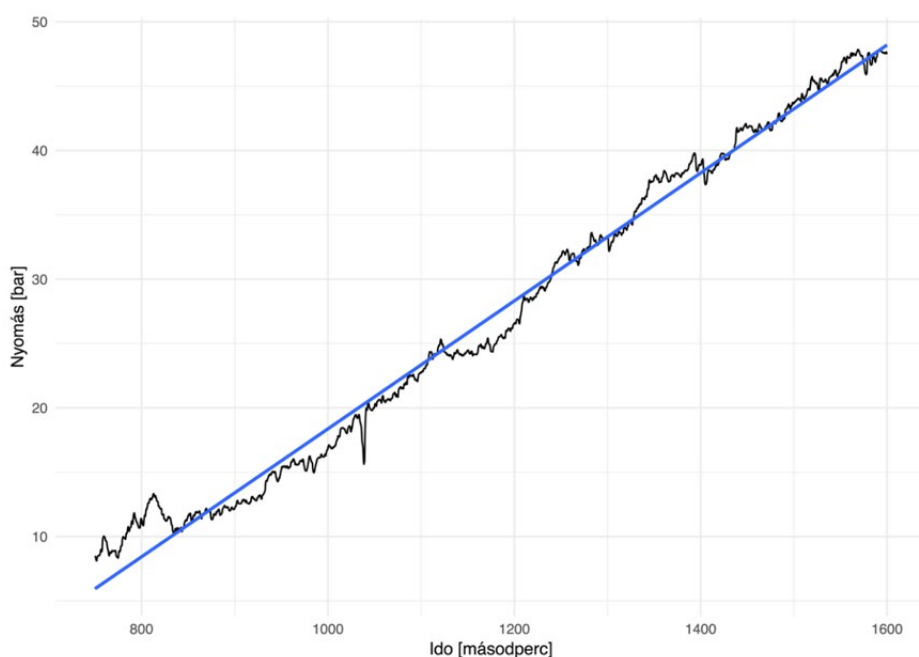
5. ábra Kísérleti szűrőberendezés összeszerelési vázlatja

Feltételezésem alapján az extrudálási folyamat során a szűrőbetét megfogja a szennyezőket, így az átfolyási terület folyamatosan csökkenni fog (lásd 24. sz. melléklet). Ez az extrúziós nyomás növekedését okozza. Azonban az idő-nyomás görbe meredeksége a szerszám tervezésekor ismeretlen paraméter volt, így fontos meghatározni, hogy milyen nyomásérték mellett végezhető biztonságosan a folyamat. Ennek okán a szűrőberendezést az extruder géphez rögzítő csavarokat méreteztem. A berendezés rögzítéséhez négy darab nagyszilárdságú (12.9 szilárdsági osztály) M8-as csavart alkalmaztam, melyeket 1,5-ös biztonsági tényező mellett méreteztem szakítószilárdságra. Az alap paraméterek alapján a maximális extrudálási nyomás 87,9 bar lehet. A kísérleteknél ezt a határértéket vettem alapul és az extrudálási folyamat során nem léptem túl a maximálisan meghatározott nyomásértéket.

3.5. Szűrés hatása az extrudálási folyamatra

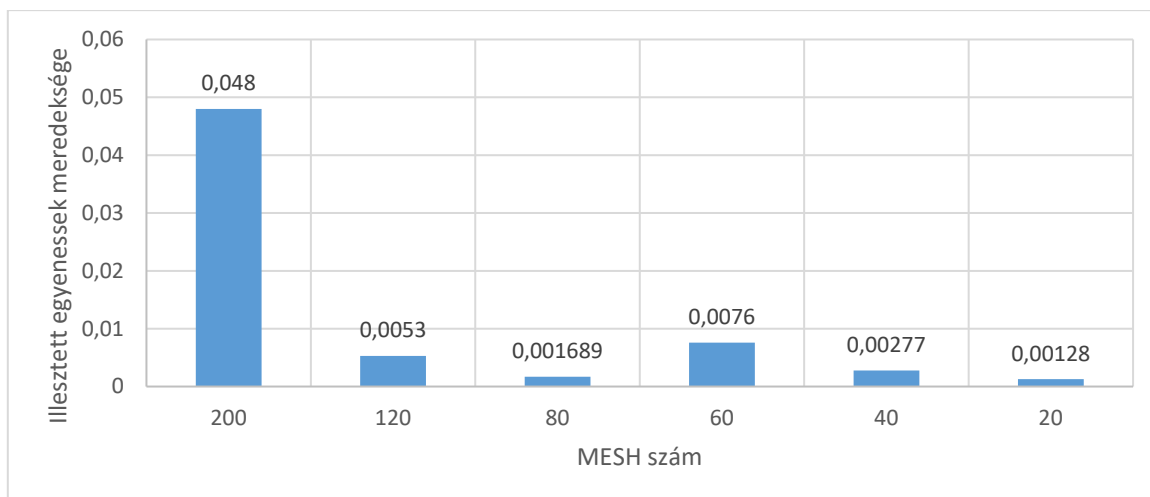
A különböző szűrőbetétek alkalmazásának egyértelmű hatása van az extrúziós folyamatra. Feltételezésem alapján minél sűrűbb szövésű a szűrő, annál gyorsabban fog emelkedni a

nyomás a folyamat során. A feltételezésem igazolásához 1 kg anyagot extrudáltam, továbbá a szűrőszerszám előtti pontban mértem a nyomásértéket a teljes extrúziós folyamat során, 0,1 másodperces mintavételezéssel. Az adatokat .csv fájlban tároltam, majd az RStudio-ban elemeztem ki az adatokat. Az adatok tisztításaként, a kezdeti (amíg nem épült fel a nyomás és a nyomaték) és a végső szakaszt (nyomás és nyomaték lecsengése) nem raktam bele a vizsgált intervallumba. A nyomásérték felfutásának jellemzése érdekében lineáris regresszióval egyenest illesztettem a különböző szűrőkkel kapott idő-nyomás görbékre. Az alábbi ábrán is látható, hogy a nyomásérték felfutása lineárisan történik a vizsgált intervallumon (lásd 6. ábra). Az illesztett egyenesek egyenletében a meredekség az érdekes ismeretlen, így a továbbiakban érdemes azzal foglalkozni, hogy mi befolyásolhatja a meredekség értékek változását.



6. ábra Exp.1 idő-nyomás diagram

Az egyenes illesztést minden egyes kísérletből származó idő-nyomás görbére elvégeztem, majd kiolvastam a meredekségi értékeket. A kísérletekben a szűrőbetéteken kívül minden gépbeállítás és környezeti paraméter megegyezett. A meredekségeket ábrázoltam a mesh szám függvényében, amely alakulása alább látható (lásd 7. ábra). A diagramon látható, hogy 20-120 mesh között az értékek között nincs szignifikáns eltérés, azonban a 200 mesh értékű szűrőnél rendkívül megugrik az illesztett egyenes meredeksége, vagyis annak eltömődése sokkal gyorsabban történt. Fontos megjegyezni, hogy a mesh érték csupán a szűrőkön található lyukak számát határozza meg, azt nem tartalmazza, hogy azok milyen méretűek, így ebben az esetben nem a legcélszerűbb a mesh függvényében ábrázolás az értékeket. A lyukméret azonban biztosan releváns mérőszáma a betétnek, az eltömődés szempontjából, így azt is érdemes figyelembe venni a nyomásnövekedés szempontjából.



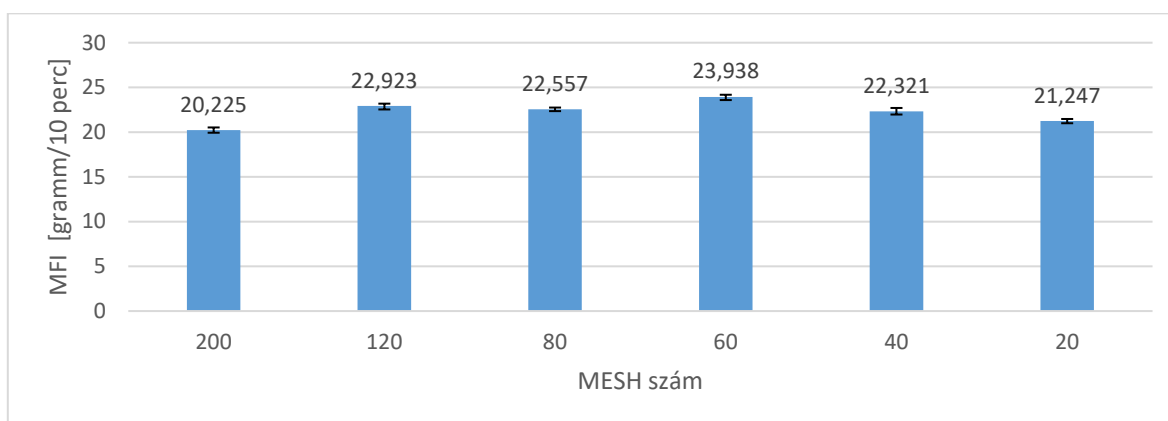
7. ábra Nyomásnövekedés meredeksége a MESH érték függvényében

3.6. Szűrés hatása a nyomtathatóságra

Annak érdekében, hogy megállapítsam, hogy a szűrésnek milyen hatásai vannak a nyomtathatóságra, MFI vizsgálatot végeztem, továbbá a nyomtatási szál és a próbatestek méretpontosságát is vizsgáltam.

3.6.1. MFI vizsgálat

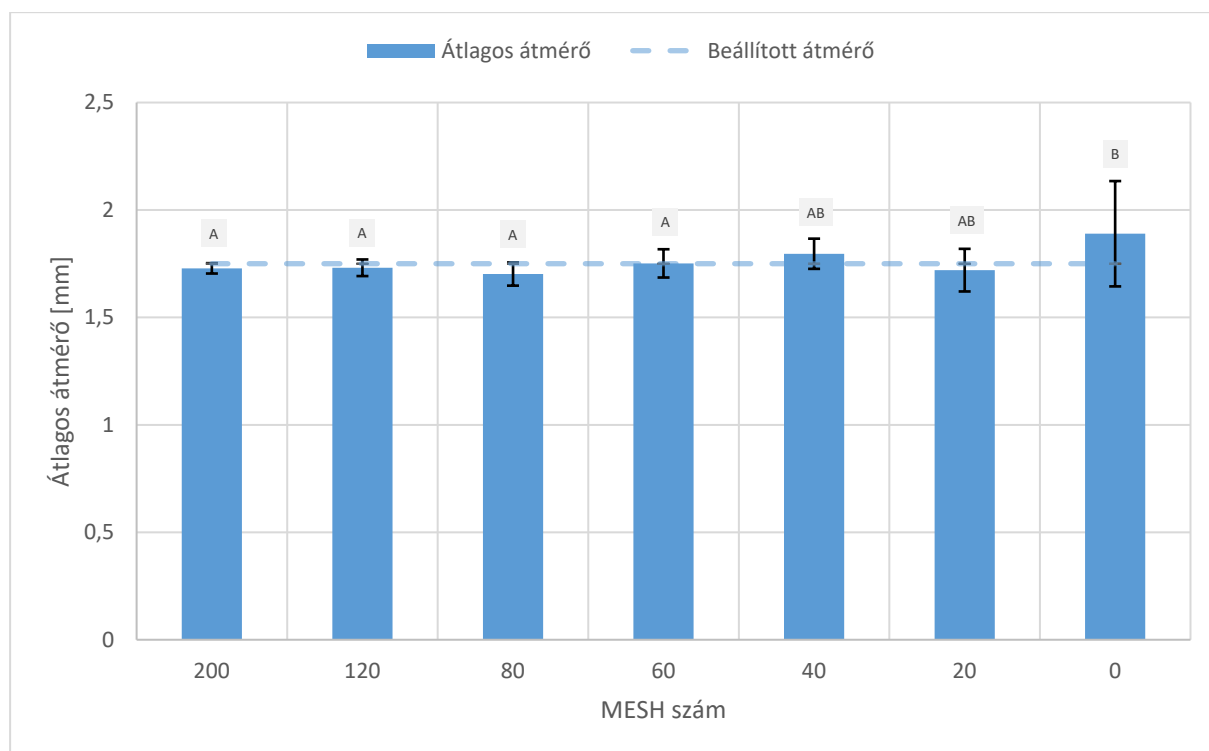
A műanyag gyártása és további feldolgozása szempontjából meghatározó mérőszám az MFI értéke. A különböző szűrőbetétekkel készített granulátumon MFI vizsgálatot végeztem, mely paraméterei a következőként alakultak. A vizsgálatot az ISO 1133 szabvány alapján végeztem CEAST 7023 mérőgépen. A kísérleteknél 6 gramm granulátum betöltése történt, 210°C-os hengerhőmérséklet mellett. Az alkalmazott nyomótömeg 2,16 kg volt, valamint a melegítés szakasza 5 percig tartott. A hat különböző kísérlet eredményét az alábbi diagramon foglaltam össze (lásd 8. ábra). Oszlopdigramon ábrázoltam az MFI értékek átlagát a mesh szám függvényében, valamint jelöltem az átlagtól való eltéréseket. A kapott eredmények között szignifikáns eltéréseket nem tapasztaltam, valamint az adatok szórása is rendkívül alacsony.



8. ábra MFI kísérlet eredményei

3.6.2. Filament és próbatestek méretpontossága

Az MFI érték alakulása mellett egy másik fontos tényezőt is kiemelnék, amely közvetlen hatással rendelkezi a filament nyomtathatóságára. A szűrőbetét lyukmérete egyértelműen meghatározza, hogy milyen méretű szennyezők kerülhetnek bele a nyomtatási szálba. Méretüktől függően a szennyezőanyagok kisebb nagyobb eltéréseket okozhatnak a nyomtatási szál átmérőjében. A nyomtatás során ez befolyásolhatja a nyomtatott darab méretpontosságát, valamint a kiemelkedően nagy szennyezők olyan mértékben megnövelhetik a szál átmérőjét, hogy akár teljes mértékben megakadályozhatják a szál mozgását. Feltételezésem alapján, a kisebb lyukméretű szűrőkkel méretpontosabb filament gyártható, amely a nyomtatott darabra is hatással van. Ennek bizonyítása érdekében a különböző szűrőkkel gyártott nyomtatási szálakon, valamint a próbatesteken méréseket végeztem. A szálak átmérőjét, valamint a próbatestek szélességét Mitutoyo digitális mikrométerrel vizsgáltam. A filamentek esetében 20 mintavételezés történt (10 cm-es távolságokban), mely eredményét diagramon ábrázoltam (lásd 9. ábra).

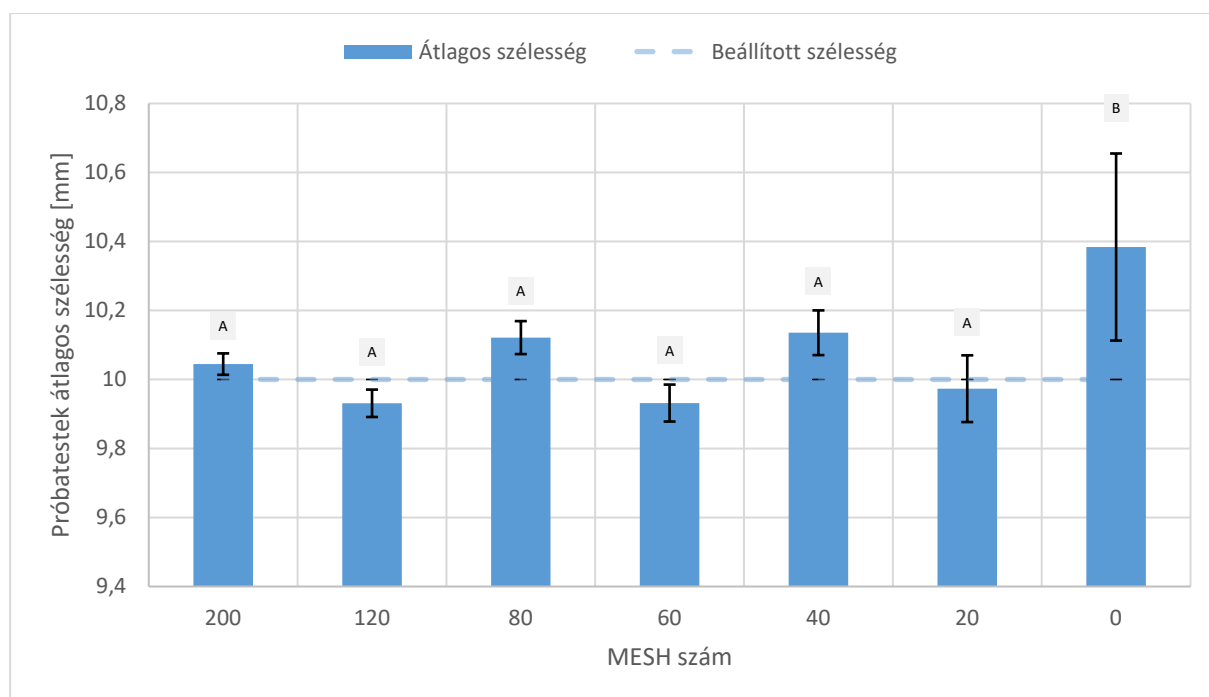


9. ábra Nyomtatási szálak méretpontossága

Az ábrán oszlopdiagrammal szemléltetem az átlagos szálátmérőt, valamint vízszintes kék szaggatott vonallal jelzem a filamentgyártó gépbe beállított értéket (1,75 mm). Az értékekből megállapítható, hogy az átlagos szálátmérő mesh 20-as értékig jól megközelíti a kívánt értéket, azonban a szűretlen filament (mesh 0) átlagos átmérője kiugró. Az átlagos átmérő mellett, sárga totemoszloppal ábrázoltam a szórások mértékét. A diagramon látható, hogy a mesh szám

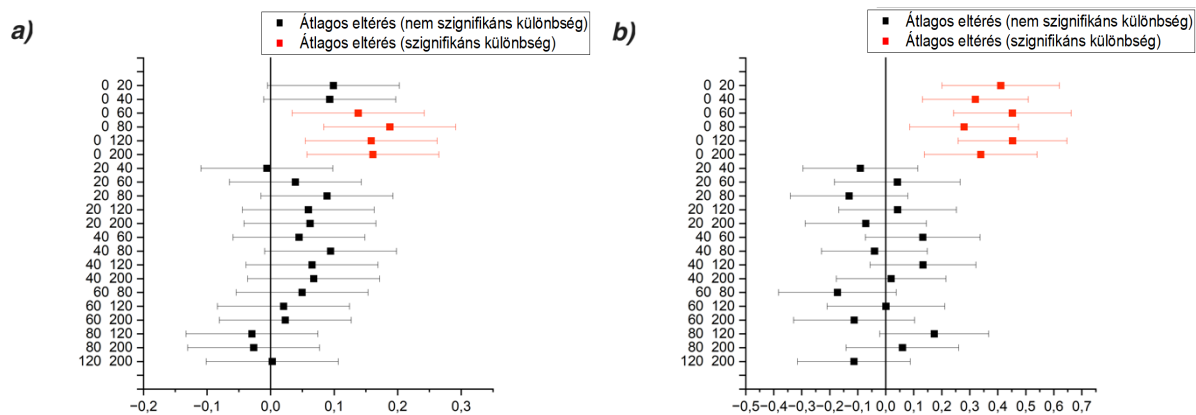
csökkenésével a szórásértékekben növekvő tendencia jelentkezik. A szűretlen szálon extrém méretű dudorokat is mértem (2,56 mm), illetve átmérőcsökkenéseket tapasztaltam (1,69 mm).

Az előző diagramhoz hasonlóan ábrázoltam a nyomtatott próbatestek (méretek 3.7-es fejezetben) méretpontosságát (lásd 10. ábra). A kék oszlopdiagramon megfigyelhető, hogy 200-20 mesh között a próbatestek mérete 0,1 mm-es hibán belül marad a kívánt értékhez képest. Azonban a méretek szórásában növekvő tendencia figyelhető meg. Ez összefüggésbe hozható azzal, hogy minél ritkább szűrővel volt megsűrve a PLA hulladék, annál több, illetve nagyobb szennyező került a filamentbe, így annak átmérő értékeiben nagyobb volt a szórás. Ez negatív hatással van a próbatestek mérethelyességére is.



10. ábra Nyomtatott próbadarabok méretpontossága

A 9. ábra és 10. ábra bemutatott adatokon az OriginPro 2024 program beépített modulja segítségével varianciaelemzést (ANOVA) végeztem. Következő lépésben Tukey-tesztet futtattam le, így megkaptam, hogy mely csoportátlagok között van szignifikáns eltérés. Az egyes csoportokat a mesh szám alapján különböztettem meg, ez alapján lettek összehasonlítva a csoportátlagok. A teszt eredményeként, a program betűket rendel az egyes csoportokhoz. Ha két csoportátlag között statisztikailag jelentős különbség mutatkozik, akkor azok nem kaphatnak megegyező betűjelölést. A megegyező betűjelölésű csoportok között nincs szignifikáns különbség, statisztikai értelemben. A programban ábrázoltam a csoportátlagokat, mindkét vizsgálat esetén (lásd 11. ábra). A diagramon piros színnel van kiemelve, hogy a csoportátlagok eltérését alapul véve, mely minták között fedezhető fel jelentős eltérés. Az y tengelyen a mesh számok által meghatározott csoportok összehasonlítása látható.



11. ábra Csoportátlagok közötti szignifikáns eltérés: a) Filament átmérő vizsgálata, b) Próbatest szélességének vizsgálata

A statisztikai vizsgálatokon túl a nyomtatási folyamat során tapasztalt problémák elemzése is szükséges. Kiemelném, hogy a 20 és 40 mesh értékű szűrővel, valamint a szűrő nélkül gyártott (kísérlet: Exp7, Exp6, Exp5) filamenttel történő nyomtatás során többször jelentkezett hibás nyomtatás, melyet a szál elakadása, illetve a fűvóka eltömődése okozott. Ez azért következhetett be, mivel az egyes idegenanyagok nagymértékben megnövelték a filament alap átmérőjét, így akadályt képezve a folyamatos haladásnak (lásd 12. ábra). Az alábbi ábrán a szűretlen filamenttel történő nyomtatási folyamat látható. A jobb oldalon piros színnel jelöltem azokat a hibákat, amelyek a folyamatot akadályozhatják. A bal oldalon látható, ahogy a hibás szál közelít a szálellenőrző egység felé. A szál nem volt képes áthaladni a nyíláson, így a nyomtatás nem volt tovább folytatható.



12. ábra Szennyező a szűretlen nyomtatási szálban

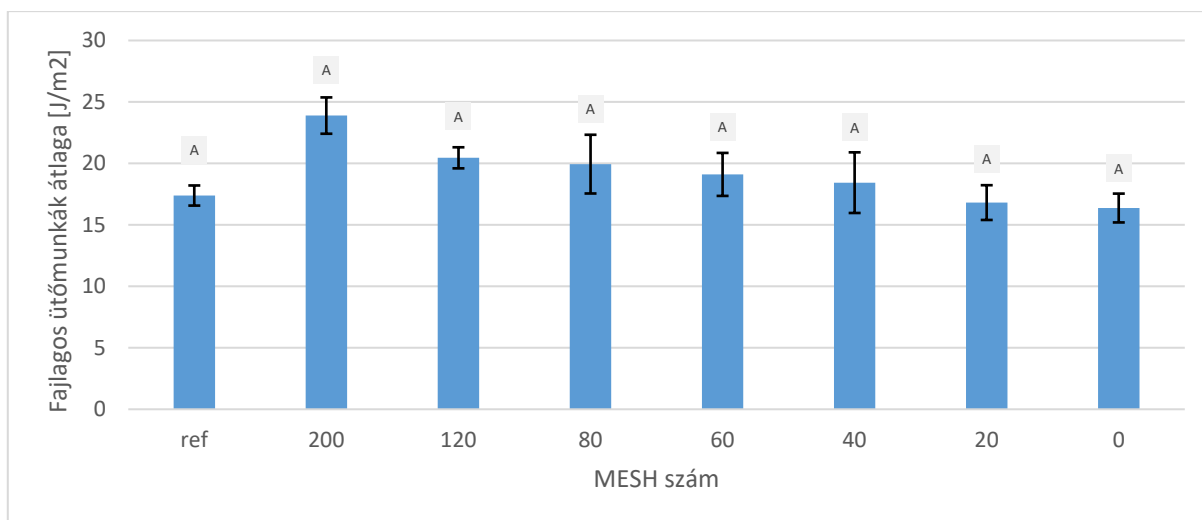
3.7. Szűrés hatása az anyagtulajdonságokra

A különböző szűrőkkel gyártott filamenttel nyomtatott próbatestek mechanikai tulajdonságainak meghatározása érdekében ütő-, szakító- és hajlítóvizsgálatot végeztem. A különböző vizsgálatokhoz készített próbatestek mindegyike azonos paraméterek mentén lett

kinyomtatva. A nyomtatófej nyílása 0,4 mm, valamint annak hőmérséklete 210°C volt. Az asztalhőmérséklet 60°C-ra volt beállítva. A nyomtatás 50 mm/s sebesség mellett történt. A kitöltés mértéke 100%, továbbá a kitöltési stratégia 45° Grid volt. A kontúr rétegek értéke egy.

3.7.1. Ütővizsgálat

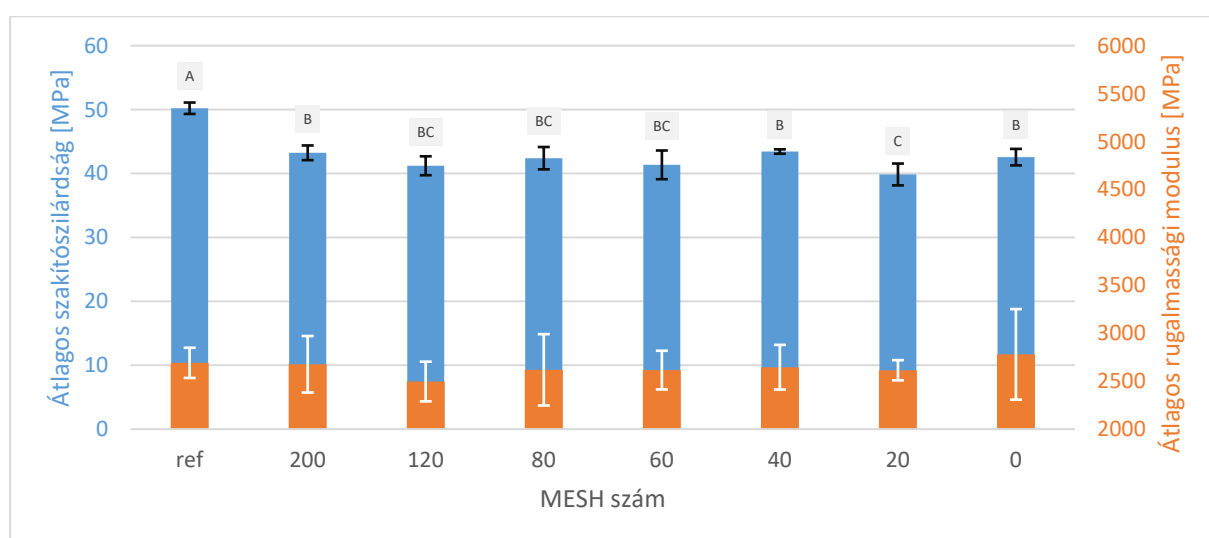
A Charpy-ütőmunka vizsgálatot az ISO 179 szabvány alapján végeztem el. A vizsgálatot Ceast 6545 lengőkalapácsos gépen végeztem el. A próbatesteket 62 mm-es befogási távolság mellett ütöttem el. Fontos megjegyezni, hogy csakis megfelelően lefutott nyomtatásból származó próbatesteken történt a kísérlet (fentebb említettem a nyomtatási hibákat, lásd 3.6.2). A próbatestek V-bemetszés nélkül, a következő paraméterek mentén lettek nyomtatva: 4 mm vastag, 10 mm széles, 80 mm hosszú. A vizsgálat első lépéseként minden próbatest szélességi és vastagsági méretét Mitutoyo digitális tolómérővel lemértem, amely a fajlagos ütőmunka számításához szükséges. Ezt követően megnéztem a vizsgáloberendezés szabadlengését, amely 0,09 J volt. Ezután elütöttem az összes próbatestet és diagramon ábrázoltam a fajlagos ütőmunkát a mesh érték függvényében (lásd 13. ábra). Az ábrán kék színnel ábrázoltam a különböző próbatestek fajlagos ütőmunkájának átlagát, amelyek az általam gyártott filamentből készültek. A vizsgálatban, egy kereskedelmi forgalomban vásárolt (ecoPLA fekete) PLA-ból is készítettem próbatesteket, melyet ref névvel különböztettem meg. A továbbiakban referencia anyagként hivatkozok ezekre a mintákra, azonban egy új és egy több anyagból újrahasznosított alapanyag összehasonlítása nem megalapozott. A diagramból megállapítható a mesh érték és fajlagos ütőmunka közötti összefüggés. A mesh szám növekedésével a fajlagos ütőmunka értékének az emelkedése figyelhető meg. Továbbá kiemelném, hogy a 200 mesh-nél szereplő érték több mint 37%-kal magasabb fajlagos ütőmunkát képvisel, mint a kereskedelmi forgalomban vásárolt referencia anyag, viszont ütőmunkájának szórása alacsonyabb.



13. ábra Fajlagos ütőmunkák átlaga a mesh érték függvényében

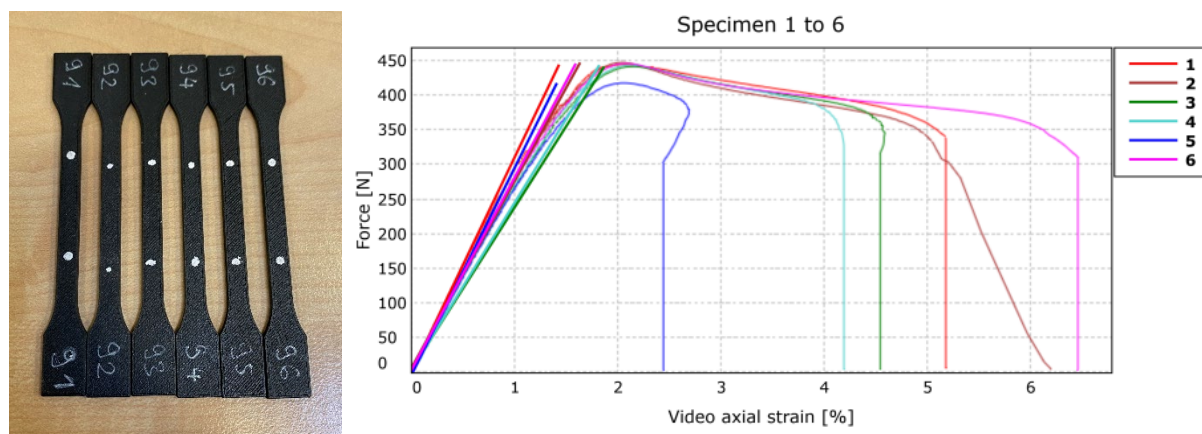
3.7.2. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatot ISO 527 szabvány alapján, video extenzométerrel és egy 10 kN erőmérő cellával felszerelt Instron 3344 szakítógépen végeztem el. A próbatesteket ISO 527-2:2012 1BA alapján méreteztem (lásd 15. ábra), melyek befogása 58 mm-es hosszon valósult meg. A rugalmassági modulus meghatározásához 1 mm/perc sebességgel történt a húzás, majd 5 mm/percre emelkedett 0,3 mm nyúlást követően. A méréseket a beépített mérőprogram segítségével diagramon ábrázoltam (lásd 15. ábra), valamint az eredményeket egy összesített diagramon mutatom meg (lásd 14. ábra). Az előző kísérlethez hasonlóan itt is alkalmaztam referenciát. Az eredményekben szignifikáns eltéréseket nem tapasztaltam. Az általam nyomtatott darabok és a referencia között az átlagos szakítószilárdságban 7 MPa-os eltérés van.



14. ábra Szakítószilárdság és rugalmassági modulus a MESH szám függvényében

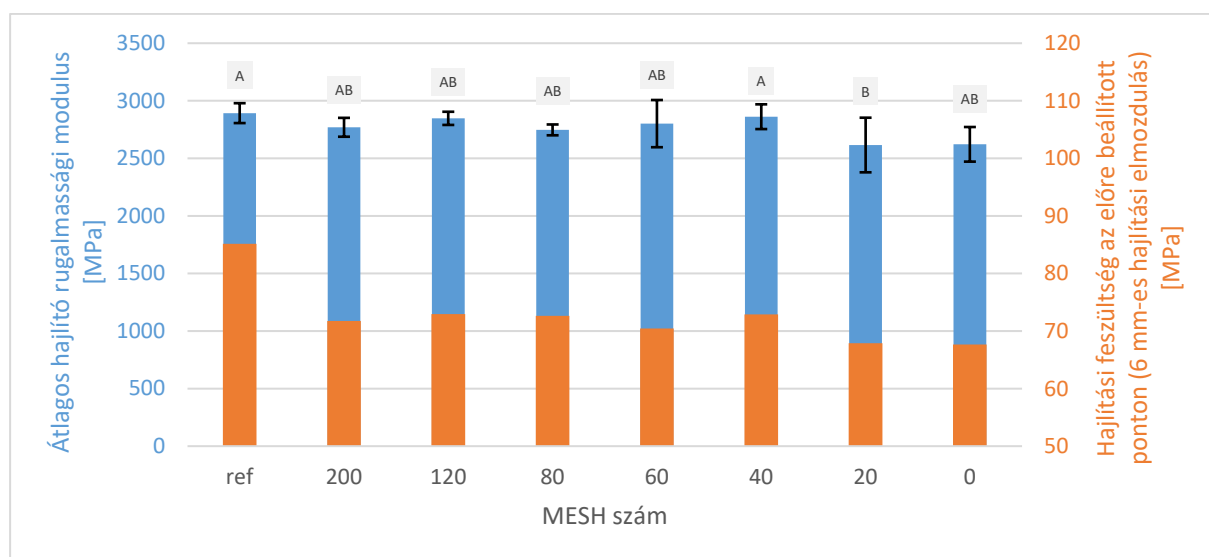
Mivel a szakítóvizsgálatban a próbatest teljes térfogata terhelve (húzó feszültség) volt, így a szennyezők gyengítő hatása nem látható egyértelműen. Az ütővizsgálat esetében az erőbehatás sokkal koncentráltabban történik, egy adott keresztmetszetre, így abban az esetben egyértelműen látszik az idegenanyagok gyengítő hatása.



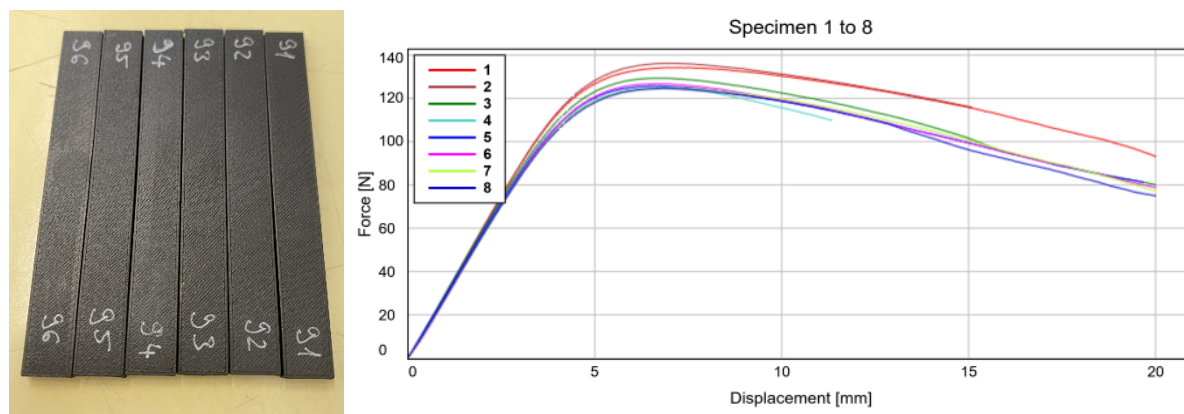
15. ábra Szakítóvizsgálat próbatestek és eredmények értékelés Exp1 esetében

3.7.3. Hajlítóvizsgálat

A hajlítóvizsgálatot ISO 178 szerint végeztem el egy 3-pontos hajlító feltétellel és 10 kN-os erőmérő cellával felszerelt Instron 3344 szakítógépen. A vizsgálatot 64 mm alátámasztási távolsággal végeztem el. Az értékek a beépített program segítségével lettek kiértékelve (lásd 17. ábra). A vizsgálat eredményeit diagramon összesítettem (lásd 16. ábra). A saját mintáim és a referencia között az átlagos hajlító rugalmassági modulusban nincs szignifikáns eltérés (kék oszlopdiagram), azonban a referencia próbatestek átlagos hajlítási feszültsége 6 mm-es elmozdulásnál 20%-kal magasabb értéket képvisel, mint a mintáim átlaga (sárga oszlopok).



16. ábra Hajlítóvizsgálat eredménye



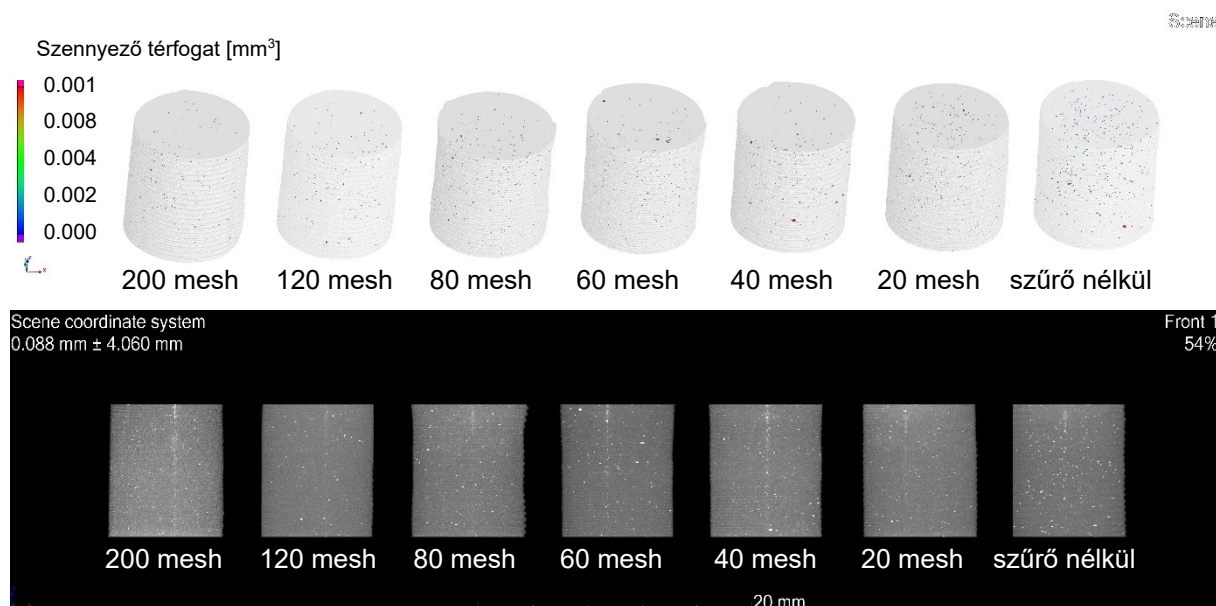
17. ábra Hajlító próbatestek és a hajlítóvizsgálat eredménye Expl esetében

3.7.4. CT vizsgálat

A nyomtatott darabokba került szennyezők számának és méretének a vizsgálata érdekében CT felvételeket készítettem. A különböző szűréssel készített filamentekből hengeres próbatesteket nyomtattam. A vizsgálati berendezés YXLON Modular Y.CT volt, melyben egy PerkinElmer detektor rögzítette a képeket. A sugárforrás egy FXE225 mikrofókuszú cső volt. A gép felbontóképessége 0,0118 mm/voxel. Fontos megjegyezni, hogy ebben a vizsgálatban

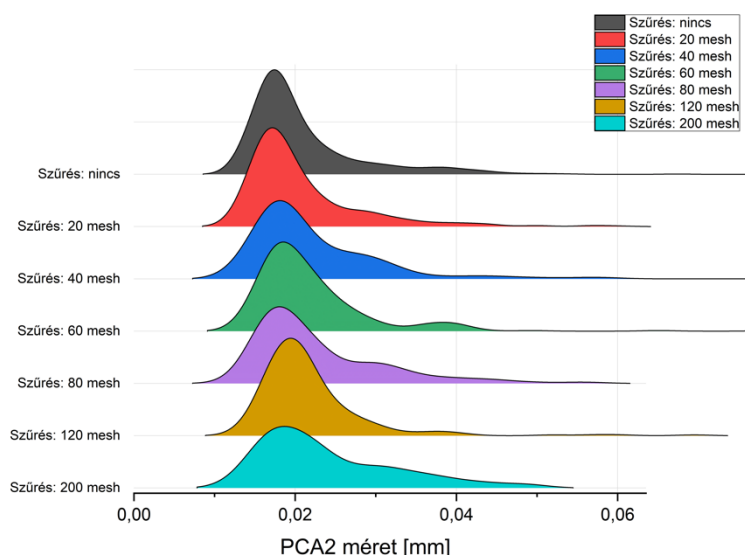
csupán a PLA-tól nagyobb sűrűségű idegenanyagok mutathatóak ki. Azok az anyagok, amelyek a PLA-val közel azonos sűrűségűek (például: műanyag, fa, textil, szerves anyagok) nem láthatóak az alábbi felvételeken, azonban jelenlétük nem kizárható.

A CT vizsgálat során készült képeket 3D és 2D formában is ábrázoltam (lásd 18. ábra), valamint a nagyfelbontású képeket a dolgozat mellékletében helyeztem le (1. sz. melléklet, 2. sz. melléklet). Az ábrázolás célja, hogy szemléltessem a különböző szűréssel megvalósított próbatestekben található szennyezők méretét, illetve mennyiségét. Az alábbi ábrákon balról jobbra haladva rendre a következő szűrésből származnak a vizsgált mintadarabok: 200 mesh, 120 mesh, 80 mesh, 60 mesh, 40 mesh, 20 mesh, nincs szűrés. Az ábrán megfigyelhető, hogy balról jobbra haladva a szennyezők térfogata és darabszáma is növekvő tendenciát mutat. A 60 mesh-es szűréstől a darabokban már $0,001 \text{ mm}^3$ -nél nagyobb szennyezők is megfigyelhetők.



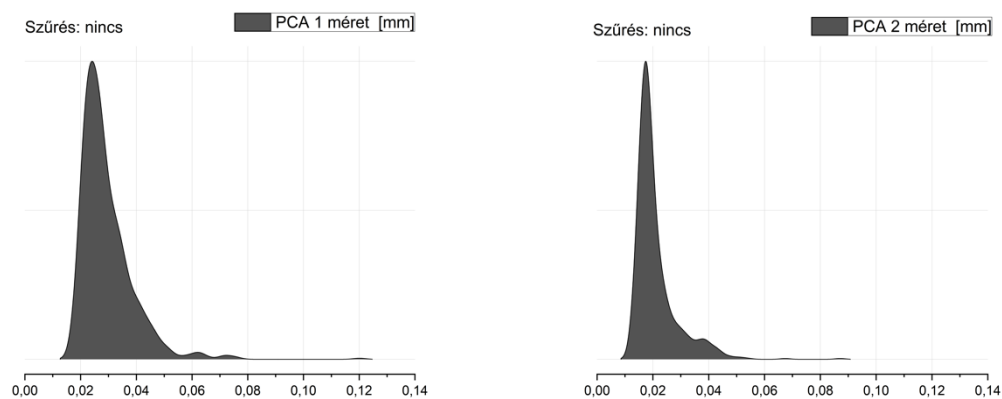
18. ábra A szennyezők eloszlása 3D nézetben és metszeti képen.

A képfeldolgozó szoftver segítségével kilistáztam az egyes próbatestekben fellelhető idegenanyagok számát, térfogatát, valamint PCA (Feret átmérők) méreteit (a szennyező három egymásra merőleges tengelyen mért mérete, melyben a PCA1 a legnagyobb, a PCA3 a legkisebb méret). Ez alapján minden próbatesthez készítettem egy hisztogramot, melyen a szennyezők mérete és előfordulási értéke látható (lásd 19. ábra). A mellékletben található minden szűréshez tartozó hisztogram (lásd 3. sz. melléklet - 9. sz. melléklet). A hisztogramokon jól látható a legjobban szűrt (200 mesh) és a szűretlen filamentből készült minták közötti szignifikáns különbség. A diagramsorozat alapján megállapítható, hogy a mesh szám csökkenésével növekvő tendencia figyelhető meg a meghatározott szennyezők előfordulási értékében. A $[0,01; 0,03]$ mm-es méretintervallumban az előfordulás ugrásszerű növekedése figyelhető meg.



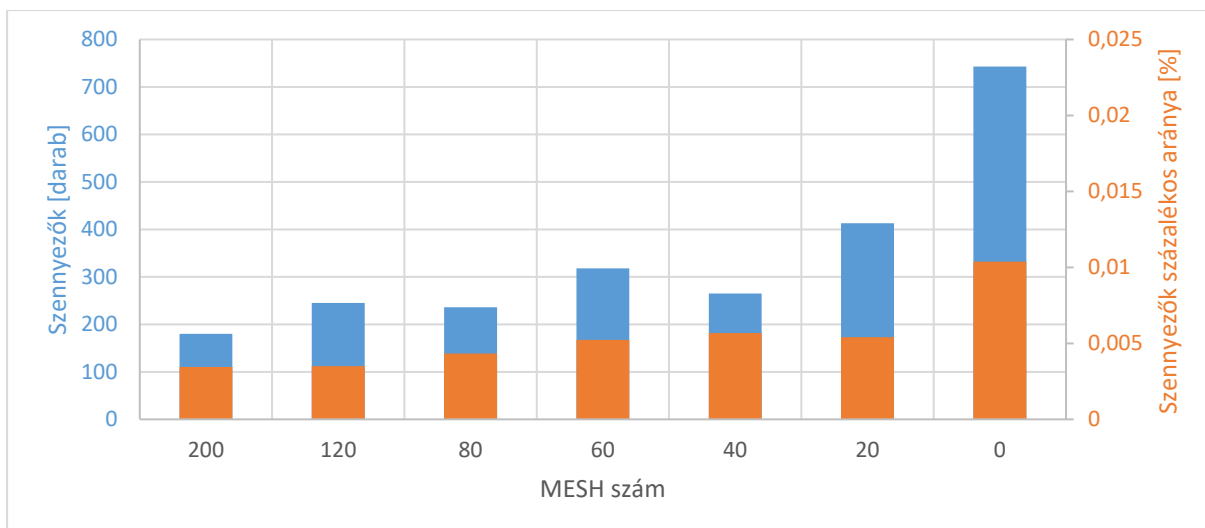
19. ábra Szennyezők PCA2 méretének eloszlása a különböző szűrések esetében

A szűrő nélküli kísérletből (Exp7) származó filamentből nyomtatott minták alaposabb vizsgálatával, további következtetéseket lehet levonni az alapanyagban található szennyeződésekre. Mivel jó közelítéssel a szűrőn található lyuk területe határozza meg, hogy mekkora szennyeződések képesek áthaladni rajta (elhanyagolva a szennyeződés deformációját, valamint a szűrőszálak deformációját), így kétdimenzióban vizsgálom tovább az idegen anyagokat. A szűretlen minta esetében, külön hisztogramon ábrázoltam a PCA1 és PCA2 méretek eloszlását (lásd 20. ábra). Az ábrán jól látható, hogy legnagyobb előfordulásban a [0,01; 0,03] mm-es intervallumban koncentrálnak a szennyezők. Ez magyarázat lehet arra, hogy az idő-nyomás görbékre illesztett egyenesek meredeksége (lásd 7. ábra), miért csak a 200 mesh-es szűrés esetében ugrik meg drasztikusan.



20. ábra Szennyezők méret szerinti eloszlása a szűretlen minta esetében

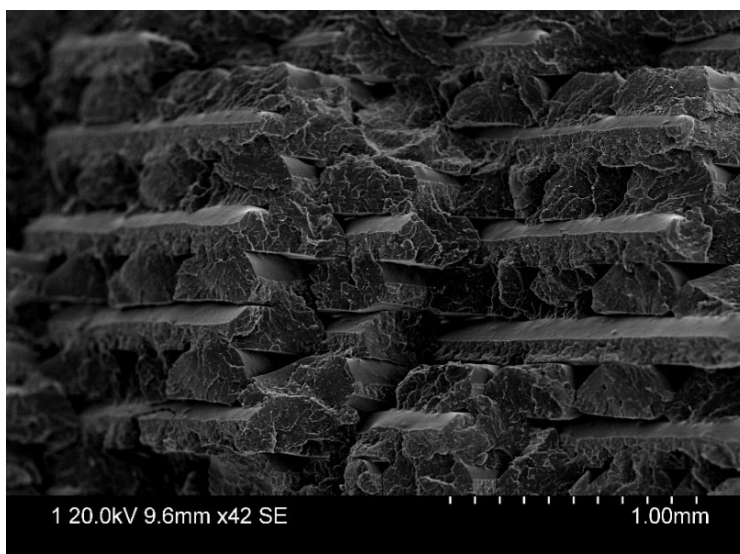
Az alábbi diagramon összefoglalva látható, hogy a mesh szám csökkenése a próbatestekbe kerülő szennyezők számának és térfogathoz viszonyított százalékának növekedését okozza (lásd 21. ábra).



21. ábra CT vizsgálat eredményeinek összegzése

3.7.5. SEM vizsgálat

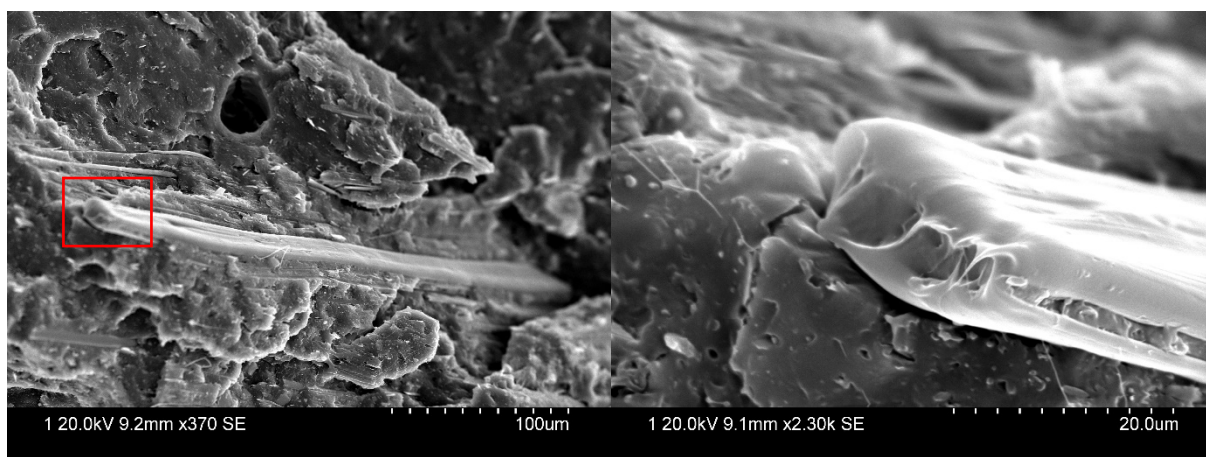
Az előző fejezetekben említett szennyezők további vizsgálata érdekében az ütővizsgálatból származó próbatestek töretfelületeit pásztázó elektronmikroszkóppal (továbbiakban: SEM) vizsgáltam. A töretfelületeket a vizsgálat előtt egy Emitech SC7620 porlasztásos bevonó készülék segítségével bearanyoztam annak érdekében, hogy ne töltődjön a minta SEM vizsgálat közben. Ezt követően az előkészített mintákat egy Hitachi S-3400 N elektronmikroszkóppal vizsgáltam, 20kV gyorsító feszültség mellett. A mikroszkóp segítségével akár több ezerszeres nagyításban is vizsgálhattam a töretfelületeket, illetve a nyomtatás szerkezetét (lásd 22. ábra). Az alábbi ábrán egy szennyezőktől mentes felület látható, amin jól kivehető az FDM 3D nyomtatási technológiára jellemző réteges szerkezet.



22. ábra SEM kép: Szennyezőtől mentes nyomtatási szerkezet

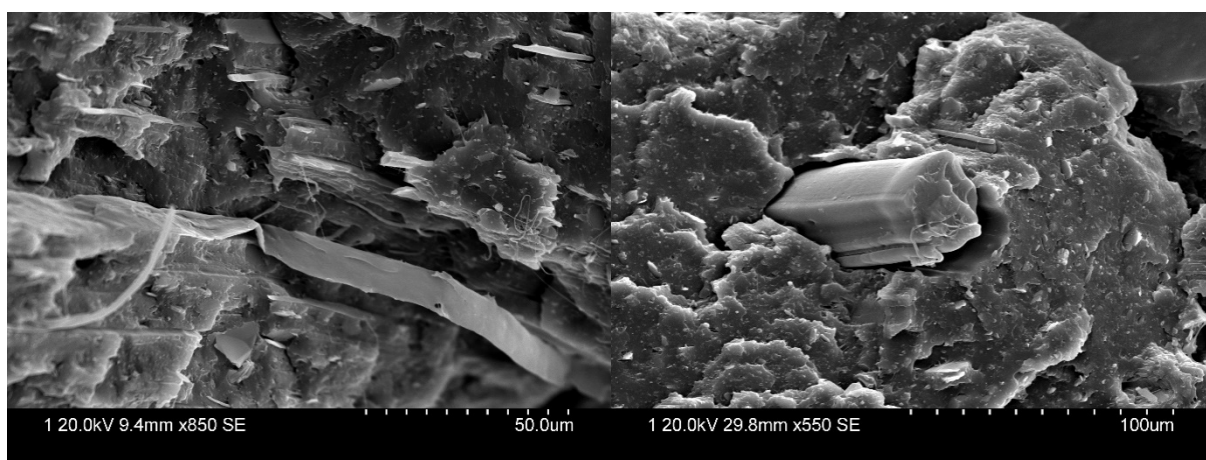
A vizsgálat folyamán azonban több idegenanyagról is sikerült felvételt készíteni, melyek az alábbi ábrán láthatóak (lásd 23. ábra). Az ábrán egy 0,25 mm hosszú, szálszerű idegenanyag

látható. A jobboldali ábrán a szennyező vége látható, melyen képlékeny deformációt vélek felfedezni. Valószínűsítem, hogy PLA-tól eltérő műanyag lehet a képen.



23. ábra SEM kép: Szennyezők a töretfelületen

Továbbá érdemes megfigyelni a baloldali ábrán, a szálszerű szennyező felett kialakult üreget, melynek átmérője 0,04 mm. Feltételezem, hogy az üregben is egy szennyező helyezkedett el, amely az ütővizsgálat során kifordult a felületről. További hasonló idegenanyagokat fedeztem fel a többi minta felületén is. Egyes részeken nagymennyiségben jelen voltak a PLA-tól eltérő anyagok, amely az alábbi képen is látható (lásd 24. ábra).



24. ábra SEM kép: Szálszerű idegenanyagok

A további vizsgálati képek a mellékletben találhatóak (lásd 10. sz. melléklet - 19. sz. melléklet).

4. Eredmények és konklúzió

Kutatásomban a kevert PLA 3D nyomtatási hulladék újrahasznosítási folyamatán dolgoztam, különböző szűrőbetétek tesztelésével. A célom az volt, hogy megfelelő mértékben elimináljam a különböző szennyezőket az extrudálási folyamat alatt, melyet a kísérleti szűrőszerszámmal valósítottam meg. A kísérleteimben hat különböző szűrőbetéttel gyártottam filamentet, valamint szűrőbetét nélkül is. A szűrés hatását három különböző aspektusból vizsgáltam. Ebben a fejezetben a fentebb bemutatott eredmények következtetéseit részletezem, illetve keresem az optimális szűrőbetét értékét.

4.1. Szűrés hatása az extrudálási folyamatra

Az extrúziós folyamat során az idő-nyomás görbék meredekségét vizsgáltam. A 200 mesh értékű szűrőnél kiugrás tapasztalható, így azt valószínűsítem, hogy a darált alapanyagba került szennyezők többsége 0,122 mm-nél kisebb azonban 0,077 mm-nél nagyobb. Ez megmagyarázza, hogy a 120 mesh értékű szűrő eltömődése még nem jelentős, hiszen a kisméretű szennyezők áthaladtak rajta. Azonban a 200 mesh-es szűrő már akadályozza a szennyezők áramlását, így szignifikánsan növelve az extrudálási nyomást. Az idő-nyomás görbe ilyen meredekség mellett az egész extrudálási folyamat mindössze 30 percig lenne végezhető, hogy a meghatározott biztonságos nyomásértéket ne lépjük túl. A 120 mesh értékű betét esetében ez 4,6 óra lenne.

Ebben az aspektusban a 120-20 mesh szűrőbetétek ajánlottak, mivel a legsűrűbb szűrőnél az extrudálási folyamatot csak rövid ideig lehet a biztonságos nyomásértékek alatt végezni.

4.2. Szűrés hatása a nyomtathatóságra

A nyomtathatóság vizsgálatánál MFI vizsgálatot végeztem, melyben a különböző minták között szignifikáns eltérést nem tapasztaltam. Mivel az FDM nyomtató egységei meghatározott átmérőjű nyílással rendelkeznek, így a filament átmérőjének mérethelyességét is vizsgáltam. A mikrométeres mérések alapján megállapítottam, hogy minél ritkább (alacsonyabb mesh érték) szűrő volt alkalmazva, annál nagyobb a nyomtatási szál átmérőjének a szórása, illetve az eltérése a kívánt értéktől. Továbbá a próbanyomtatások során a szűrő nélkül, 20 mesh, 40 mesh betétekkel gyártott filamentek esetében többször elakadt a szál, mivel a nagyméretű szennyezők akadályt képeztek a szál szabad mozgásának. A nyomtatott próbatestek méretpontosságában is hasonló tendencia látható. A két diagram (9. ábra, 10. ábra) között fennálló korreláció alapján megállapítható, hogy a szűrőbetét mesh értékének közvetlen hatása van a nyomtatási szálba

kerülő idegenanyagok méretére, a nyomtatási szál átmérőjének a pontosságára, illetve a nyomtatott darabok mérethelyességére. A filament mérethelyességének a romlása a nyomtatott darabok méretpontosságát befolyásolja, melyből az anyagtulajdonságok romlása ered. A nagyobb mesh érték kisebb szennyezőket fog eredményezni a szálban, továbbá kisebb lesz a filament átmérőjének a szórása, valamint a próbatestek kisebb hibával lesznek nyomtathatóak.

4.3. Szűrés hatása az anyagtulajdonságokra

Az anyagtulajdonságok vizsgálata érdekében ütő-, szakító- és hajlítóvizsgálatot végeztem, valamint a szennyezőket CT és SEM analízisnek is alávettem. Ahogy már fentebb említettem, a rossz méretű filamenttel pontatlan próbatest nyomtatható, melyből gyengébb anyagtulajdonságok erednek. Ezért az anyagtulajdonságokban bekövetkező negatív változást nem biztos, hogy csak a szennyezőanyagoknak lehet betudni, hanem az általuk okozott filament mérettűrés romlásának is.

A szakító- és hajlítóvizsgálat eredményeiben nem találtam szignifikáns eltéréseket a minták között. Azonban a próbatestek fajlagos ütőmunkája annál nagyobb volt, minél magasabb volt a szűrés mértéke (magasabb mesh szám). A kevesebb szennyezőt tartalmazó próbatestek nagyobb ütőmunkája arra utal, hogy a nagyobb mesh számú szűrővel készült filamentből nyomtatott próbatestek rétegei közötti kapcsolat erősebb. A nagyobb szennyezők mechanikailag nagyobb mértékben gyengítik a darabot.

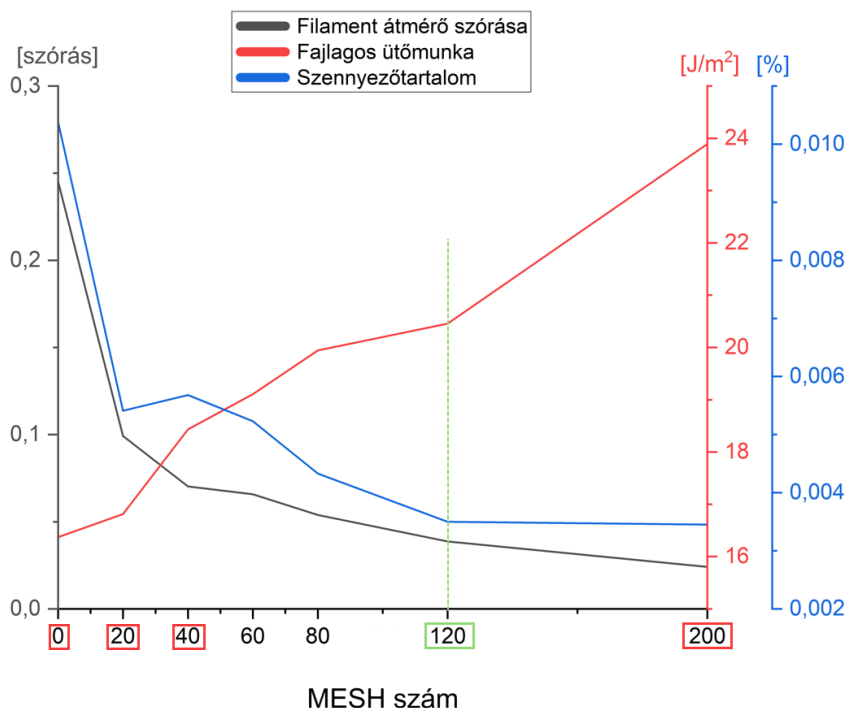
A CT vizsgálatokból egyértelműen kiderült, hogy a mesh érték csökkenésével (ritkább szűrőbetét) a szennyezők mérete és előfordulása is növekszik. Ebben az aspektusban a nagyobb mesh értékű szűrőbetét alkalmazásának pozitív hatása van az anyag homogenitására, porozítására.

A SEM vizsgálatot összefoglalva a kevésbé szűrt darabokban egyértelműen felfedezhetőek a szennyezőanyagok. A feltárt szennyezők akadályozhatják az egymásra épülő rétegek megfelelő kapcsolódását, mely az ütővizsgálat eredményében is megmutatkozott (lásd 3.7.1).

4.4. Eredmények összegzése

Összegezve az eredményeket, a kutatásom kiinduló paramétereit és körülményeit figyelembe véve, meghatározható egy optimális mesh tartomány. A vizsgálatokat összesítve készítettem egy diagramot, melyen az optimum határozható meg (lásd 25. ábra). Az x tengelyen ábrázoltam a mesh értékeket. Piros kerettel láttam el a 0, 20, 40-es értékeket, mivel ezen szűrések esetében a nyomtatásnál többször is elakadt a filament, ami sikertelen nyomtatáshoz vezetett. Továbbá a 200-as érték is piros keretet kapott, mivel ennél az értéknél az extrúziós

nyomásérték kiugróan magas volt. Így ezeknek a betéteknek az alkalmazása biztos nem az optimális kategóriába sorolandó. A diagramon a következő pont, ahol a szennyezőtartalom és a filament átmérőjének a szórása minimumértéket vesz fel, valamint a fajlagos ütmunka maximum értéket ér el, a 120 mesh értéknél található (zölddel jelölve).



25. ábra Optimális szűrőbetét keresése

Az eredmények és az ábra segítségével meghatározható, hogy a kutatásomban újrahasznosított keverék PLA 3D nyomtatási hulladék szűréséhez az optimális szűrőbetét értéke 120 mesh.

4.5. További kutatási lehetőségek

A TDK dolgozatomat meghaladóan további vizsgálatokat fogok végezni a kutatási témámban. A szennyezőanyagok beazonosítása érdekében FTIR analízist tervezek végezni, így az idegenanyagoknak nemcsak a mérete és mennyisége, hanem az anyaga is ismertté válik. Mivel dolgozatomban bemenetként ismeretlen mértékben és anyagokkal szennyezett darálékot alkalmaztam, a következő lépésben tervezett vizsgálati irány az extrúziós folyamat kontrollált szennyezésének elemzése, ami lehetővé teszi a különböző idegenanyagok szűrhetőségének pontosabb meghatározását. Továbbá a szűrési módszer granulátumos nyomtatókba való integrálása nagy potenciált hordoz. Ezáltal lehetővé válna a nagyméretű nyomtatások hulladék anyagokkal, továbbá a filament gyártásához szükséges ömlesztési folyamat is elhagyhatóvá válna. Ennek eredményeként az anyagok többször újrahasznosíthatóvá válnak, mielőtt degradálnának, ami jelentős környezeti és gazdasági előnyöket jelent.

5. Irodalomjegyzék

- [1] M. A. Islam és mtsai., „Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications”, *Polym Test*, köt. 132, o. 108364, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108364>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941824000412>. [Elérés: 2024. március 10.]
- [2] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, S. Hoppe, és M. Camargo, „Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues”, *Addit Manuf*, köt. 17, o. 87–105, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.013>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416301695>
- [3] M. R. Hasan, I. J. Davies, A. Pramanik, M. John, és W. K. Biswas, „Potential of Recycled PLA in 3D Printing: A Review”, *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, o. 100020, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2024.100020>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667344424000033>
- [4] A. Romani, L. Perusin, M. Ciurnelli, és M. Levi, „Characterization of PLA feedstock after multiple recycling processes for large-format material extrusion additive manufacturing”, *Materials Today Sustainability*, köt. 25, o. 100636, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100636>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589234723003238>
- [5] M. Bhayana, J. Singh, A. Sharma, és M. Gupta, „A review on optimized FDM 3D printed Wood/PLA bio composite material characteristics”, *Mater Today Proc*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.029>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323010714>
- [6] L. Sandanamsamy és mtsai., „Effect of process parameter on tensile properties of FDM printed PLA”, *Mater Today Proc*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.217>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323012592>
- [7] S. Nigam és P. N. Ahirwar, „A comparative study on the effect of infill density, shape structure, and materials on tensile properties of FDM printed components”, *Mater Today Proc*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.101>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323050071>
- [8] L. Marşavina és mtsai., „Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens”, *Eng Fract Mech*, köt. 274, o. 108766, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2022.108766>. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794422004866>

6. Mellékletek

1. sz. melléklet: 3D CT felvétel
2. sz. melléklet: 2D CT felvétel
3. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: 200 mesh)
4. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: 120 mesh)
5. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: 80 mesh)
6. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: 60 mesh)
7. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: 40 mesh)
8. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: 20 mesh)
9. sz. melléklet: Szennyezők PCA2 méretének eloszlása (szűrés: nincs szűrés)
10. sz. melléklet: SEM felvétel 01
11. sz. melléklet: SEM felvétel 02
12. sz. melléklet: SEM felvétel 03
13. sz. melléklet: SEM felvétel 04
14. sz. melléklet: SEM felvétel 05
15. sz. melléklet: SEM felvétel 06
16. sz. melléklet: SEM felvétel 07
17. sz. melléklet: SEM felvétel 08
18. sz. melléklet: SEM felvétel 09
19. sz. melléklet: SEM felvétel 10
20. sz. melléklet: Extrudálási folyamat
21. sz. melléklet: Futószalagos hűtés
22. sz. melléklet: Granulálási művelet
23. sz. melléklet: Filament gyártás
24. sz. melléklet: Szűrő használat után