

DIPLOMADOLGOZAT

Bábel Péter Bence
Gépészmérnök mesterszak

Gödöllő
2024



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Gépészmérnöki mesterképzési szak**

**Ömledékszálás Leolvasztó Extrúder Termikus
Optimalizálása**

Belső konzulens:	Dr. Kurják Zoltán egyetemi docens
Külső konzulens:	Sári-Barnácz Viktor vezető mérnök
Készítette:	Bábel Péter Bence D9GHFV nappali
Intézet/Tanszék:	Műszaki intézet

**Gödöllő
2024**

MŰSZAKI INTÉZET
GÉPÉSZMÉRNÖK MESTERSZAK
Gépészeti mechatronika specializáció

DIPLOMAMUNKA

feladatlap

Bábel Péter Bence (D9GHFV)

részére

A diplomamunka címe:

Ömledékszálás Leolvasztó Extrúder Termikus Optimalizálása

Feladatkiírás:

1.Bevezetés, célkitűzés 2.Cégbemutató 3.Szakirodalmi feldolgozás a polimer ömledék reológiájából és anyagmodellek készítéséből 4.Szakirodalmi kutatás a jellemző 3D nyomtatási anyagok termikus anyagjellemzőiről (ABS, PLA, PET-G, HDPE) 5.Műanyagfeldolgozás rokontechnológiái (hidrosztatikus extrúder, csigás extrúder) 6.A 3D nyomtató extrúder fizikai, termikus és mechanikai modelljének funkció alapú tervezése 7.Modell eredmények validálása 8.Minőségbiztosítás készítése 9.Összefoglalás

Közreműködő tanszék: Mechatronika

Külső konzulens: *Sári-Barnácz Viktor*, vezető mérnök, Robert Bosch Hungary Kft.

Belső konzulens: *Dr. Kurják Zoltán*, Egyetemi docens, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Beadási határidő: 2024. november 5

Gödöllő, 2024. szeptember 9

Jóváhagyom

(tanszékvezető)

(szakfelelős)

Átvettem

(hallgató)

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

Gödöllő, 2024.

(külső konzulens)

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	3
2.	CÉGBEMUTATÁS	4
3.	SZAKIRODALOMKUTATÁS.....	5
3.1.	ÖMLEDEKREOLÓGIA	5
3.1.1.	Kapilláris áramlás	5
3.1.2.	Áramlási viszonyok keresztmetszet átmeneteknél.....	6
3.1.3.	Bagley korrekció	7
3.1.4.	Duzzadás	9
3.2.	REOLÓGIAI ANYAGMODELLEK	10
3.2.1.	Ostwald–de Waele törvény	10
3.2.2.	Carreau-Yasuda modell.....	11
3.2.3.	Viszkózitást befolyásoló tényezők.....	12
4.	JELLEMZŐ 3D NYOMTATÁSI ANYAGOK TERMIKUS ANYAGJELLEMZŐI.....	14
4.1.	TERMIKUS ANYAGJELLEMZŐK	14
4.2.	FDM/FFF NYOMTATÓKBAN HASZNÁLT MŰANYAGOK	15
5.	POLIMEREK EXTRÚDÁLÁSA	18
5.1.	AZ EXTRÚDÁLÁS.....	18
5.1.1.	Csigás extrúder felépítése	18
5.1.2.	Kompressziós zóna.....	19
5.2.	EXTRÚDÁLÁSI HIBÁK	23
5.3.	HIDROSZTATIKUS EXTRÚZIÓ	25
5.3.1.	Hidrosztatikus extrúzió az FDM rendszerű 3D nyomtatásban	26
6.	ÖMLEDEKSZÁLAS LEOLVASZTÓ EXTRÚDER FUNKCIÓ ALAPÚ TERVEZÉSE	28
6.1.	FILAMENT ADAGOLÁSI FUNKCIÓ ELEMZÉSE	28
6.1.1.	Mértékadó térfogatáram meghatározása.....	29
6.1.2.	Rétegmagasság meghatározása	30
6.1.3.	Extrúder előtolási-sebesség méretezése.....	30
6.2.	ÖMLEDEKDUZZADÁS VIZSGÁLATA.....	31
6.2.1.	Az alkalmazott kapilláris-geometria	31
6.2.2.	Extrúder-előtolási sebesség meghatározása	32
6.2.3.	PLA kilépéskori duzzadása	33
6.2.4.	Duzzadás vizsgálata PLA alapanyag esetén	34
6.3.	KILÉPÉSKORI DUZZADÁS ARÁNYA TOVÁBBI ALAPANYAGOK ESETÉN	36
6.4.	KAPILLÁRISÁRAMLÁS NYOMÁSVESZTESÉGEINEK VIZSGÁLATA	39
6.4.1.	A nyírási sebesség meghatározása.....	39
6.4.2.	Extrúder nyomatékterhelés meghatározása	41
6.4.3.	A fűvókában felépülő maximális nyomásvesztés	43
6.4.4.	Nyomásesés meghatározása.....	43
6.5.	ÖMLEDEKKÉPZŐDÉS TERMIKUS VIZSGÁLATA	45
6.5.1.	Hőátadás közelítő vizsgálata	46
6.6.	HŐÁTADÁS NUMERIKUS VIZSGÁLATA	47
6.6.1.	Peremfeltételek.....	47
6.6.2.	Hálófüggetlenségi vizsgálat	48
6.6.3.	Filament maghőmérsékletének vizsgálata	49
6.7.	A FŰTŐBLOKK MÉRETEZÉSE.....	51
6.8.	FŰTŐBLOKK ANYAGVÁLASZTÁS	51
6.8.1.	Fűtőblokk geometria	52
6.8.2.	Peremfeltételek.....	53
6.9.	FILAMENTSZÁL STABILITÁSVESZTÉSE.....	55
6.10.	HŐELVÁLASZTÓ ELEM VIZSGÁLATA.....	59
6.10.1.	Hőtani modell és peremfeltételek.....	60
6.10.2.	Hőmérséklet eloszlás.....	60
6.10.3.	További termikus optimalizálás	62

7.	EREDMÉNYEK, JAVASLATOK	65
7.1.	FÚVÓKA	65
7.2.	FÜTŐBLOKK	66
7.3.	HŐELVÁLASZTÓ	66
7.4.	TOVÁBBI OPTIMALIZÁLÁSI LEHETŐSÉGEK	66
8.	MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS	67
	ÖSSZEFOGLALÁS	68
	FELHASZNÁLT SZAKIRODALMAK.....	69
	TÁBLÁZATOK ÉS ÁBRÁK JEGYZÉKE	74
	MELLÉKLET	77

1. Bevezetés és célkitűzés

Az elmúlt években mind az ipari, mind a háztartásokban használt 3D nyomtatók elterjedése felgyorsult. A technológia fejlődése az iparban egyre jelentősebb a hagyományos gyártási eljárások mellett. A háztartásokban használt 3D nyomtatók nyomtatási minőségben és alkatrész felhasználás tekintetében is zárkóznak fel az ipari nyomtatókhoz. A háztartásokban keletkező műanyag hulladék lokális feldolgozására is egyre nagyobb igény keletkezik, így az egyik célkitűzésem, hogy olyan extrúdert tervezek ami alkalmas a háztartási HDPE műanyag és a leggyakoribb FDM/FFF 3D nyomtató anyagok feldolgozására.

Az iparban a termékek előállítása során a termelékenység a legfontosabb szempont. Gyártási kapacitás figyelembevétele esetén, a 3D nyomtatás technológiai korlátjai miatt elmarad a hagyományos polimer feldolgozási technológiáktól. A diplomamunkám témája egy olyan ömledékszálás leolvasztó extrúder tervezése, amely termikusan optimalizált a nagysebességű nyomtatáshoz, ezáltal a gyártási igények kielégítését lehetővé teszi.

Az extrúder tervezés megkezdése előtt szakirodalmi kutatást kívánok végezni a műanyagfeldolgozás technológiáiról. Az irodalmi feldolgozás során figyelmet szeretnék szentelni a polimer ömledékek reológiájának tanulmányozására és a 3D nyomtatás során használt műanyagok termikus anyagjellemzőinek megismerésére.

Az extrúder tervezése során célom a fűvóka csatorna ömledék áramlásának optimalizációja, a fűtőblokk termikus méretezése, a hőelválasztó elem optimalizálása a filament szál előtolás stabilitásának biztosításának érdekében. Ezen jellemzők javítása jelentősen hozzájárul a 3D nyomtatott termékek minőségi, és termelékenységi javulásához.

Az optimalizált extrúdert funkció alapú tervezéssel kívánom elkészíteni. A tervezést követően a lehetséges fűvóka furatgeometriákat meg szeretném valósítani prototípusok formájában, amiken a tervezés során kapott eredményeket szeretném validálni.

Az eredmények kiértékelését követően a termék minőségbiztosítását szándékozom elvégezni, valamint további fejlesztési potenciálokra szeretnék javaslatot tenni.

Az ömledékszálás leolvasztó extrúderrel szembeni elvárás, hogy a jelenleg használt FDM 3D nyomtató extrúderekénél mérhetően jobb teljesítményt tudjak elérni, és a piacon elérhető nyomtatók jelentősebb átalakítás nélkül fogadni tudják az új alkatrészeket.

2. Cégbemutató

SB Addtech Kft additív gyártás megoldásokat kínál magánszemélyeknek és az ipari szektor számára. A Kft. tervezett fő bevételi forrása az alapítást követően a prototípus gyártás, FDM, SLS, SLM, DMLS 3D nyomtatási technológiákkal.

Az SB Kft. tervezett alapítási ideje 2024, budapesti telephellyel. A kezdeti prototípus gyártást követően FDM 3D nyomtató alkatrészek tervezésével, gyártásával egészülne ki a tevékenység. A diplomamunkám során tervezett FDM nyomtató alkatrészeket fűvóka, fűtőblokk, hőelválasztó gyártását kezdetben hagyományos műszerész esztergával előállítható mennyiségben gyártaná a társaság, melyet az igények szerint további automata gépekkel bővítené ki. A diplomamunkám során a szaktudásommal és tapasztalatommal járulok hozzá egy új termék megalkotásához mellyel a társaság gyártási profilját lehet bővíteni. A tervezett alkatrészek gyártásával kíván hozzájárulni a cég a 3D nyomtató ipar és a magyar ipar fejlődéséhez.

3. Szakirodalomkutatás

A következő fejezetben a diplomamunka témáját képző *Fused Deposition Modelling* (FDM) elven működő 3D nyomtató extrúder polimertechnikai(reológiai) szakirodalmának áttekintését végzem el. A megfelelő reológiai méretezéssel termelékenyebben, jobb minőségű nyomatot(munkadarabot) lehet készíteni.

3.1. Ömledékreológia

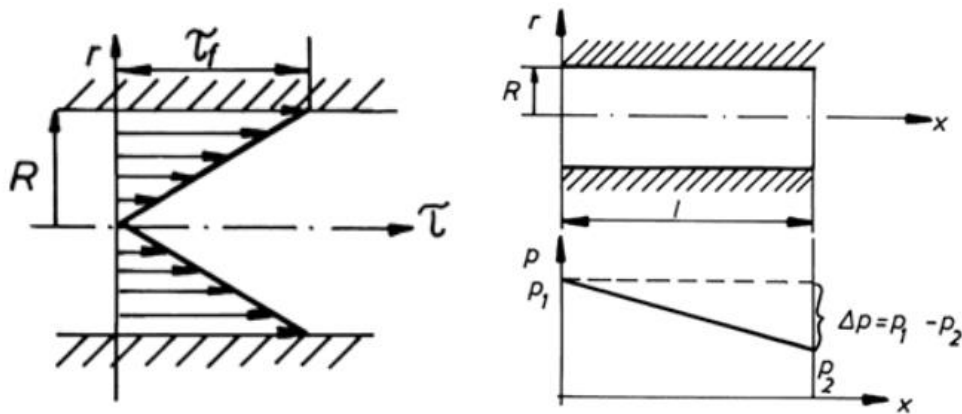
A 3D nyomtatás (hidrosztatikus extrúzió) során a polimer ömledék nem-newtoni folyadékként viselkedik, ezért a leolvasztó extrúder anyagáramlását a reológiai viselkedésének figyelembevételével javasolt megtervezni.

3.1.1. Kapilláris áramlás

Az FDM technológiájú nyomtatás során a hőre lágyuló polimer szálból egy kapillárisnak megfelelő szakaszon ömledék képződik. A kapillárisban a polimer ömledék áramlási viszonyait reológiai egyenletek írják le. Ezen szakaszon az ömledék áramlását az 1. ábra mutatja be.

1. ábra: A kapilláris áramlás jelöléseinek értelmezése

(Forrás: Kontopoulou, 2011)



A kapilláris falán ébredő τ_f [Pa] nyírófeszültség meghatározható az ömledék nyomásának és a kapilláris geometriai méreteinek ismeretében (Dynisco, n.a):

$$\tau_f = R \frac{\Delta p}{2L} \quad (1.)$$

ahol R [mm] a kapilláris sugara, Δp [Pa] nyomáskülönbség, L [mm] a kapilláris hossza.

A kilépő térfogatáram [mm³/s] állandósult állapotban a kontinuitás egyenlete szerint számítható az előtolási sebesség és a filament átmérőjének ismeretében. A belépő

anyagmennyiség a fúvóka kilépő furatán ömledékként távozik, ami alapján a kilépő térfogatáram (Dynisco, n.a):

$$\dot{V} = \frac{d_f^2 \pi}{4} \cdot v_e \quad (2.)$$

ahol d_f [mm] a filament átmérője, v_e [mm/s] a filament előtolási sebessége.

A nyírási sebesség γ_f [1/s] számítható a szál előtolási sebességéből és a kapilláris geometriai méreteiből (Dynisco, n.a):

$$\gamma_f = \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \quad (3.)$$

ahol R [mm] a kapilláris sugara, $\dot{V}$ a kilépő térfogatáram [mm³/s].

A nyírási sebesség γ_f [1/s] és az ömledék dinamikai viszkozitásának η_f [Pa·s] ismeretében is meghatározható a nyírófeszültség:

$$\tau_f = \eta_f \cdot \gamma_f \quad (4.)$$

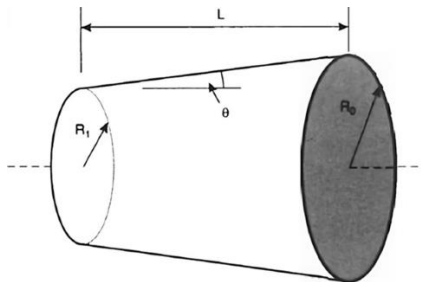
A viszkozitás ismeretében a nyomásveszteség az (1.) egyenlet alapján számítható (Dynisco, n.a).

3.1.2. Áramlási viszonyok keresztmetszet átmenetekenél

Gyártástechnológiai okokból az áramlási csatornát furatlépcsőkkel lehet gazdaságosan elkészíteni. Az eltérő kapilláris keresztmetszetek között így furatátmenetek jönnek létre, melyek nyomásváltozást okoznak az ömledékben. A 2. ábra a furatátmenet geometriai méreteit mutatja be.

2. ábra: Kapillárisok közötti átmenet geometriája

(Forrás: Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, n.a.)



A furatlépcsők okozta nyomásváltozást ΔP_k [Pa] a kilépő térfogatáram változásának ismeretében meghatározható. A furatátmenetben a nyomásváltozás:

$$\Delta P_k = \frac{2\pi \cdot R_0 \cdot L_k \cdot \sec\theta \cdot \tau_f \cdot \cos\theta}{\pi \cdot R_0^2} \quad (5.)$$

ahol R_0 [mm] a kúp belépő sugara, θ [°] kúpszög, L_k [mm] az átmenet hossza (Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, n.a.).

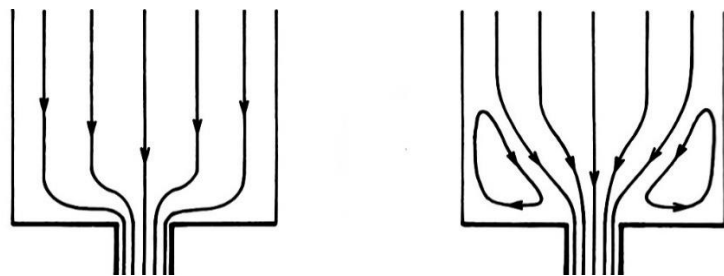
A furatátmenetek közötti áramlási viszonyokat ki kell egészíteni az átmenetek előtti belépés okozta nyomásváltozás figyelembevételével, amelyre a Bagley korrekció alkalmas.

3.1.3. Bagley korrekció

A nyomás csökkenés a kapillárisba lépés előtt megkezdődik, melynek mértéke attól függ, hogy az áramlás newtoni vagy nem-newtoni jellegű. Az áramlási jellegzetességeket a 3. ábra szemlélteti.

3. ábra: Newtoni (bal) és nem-newtoni (jobb) áramlási kép

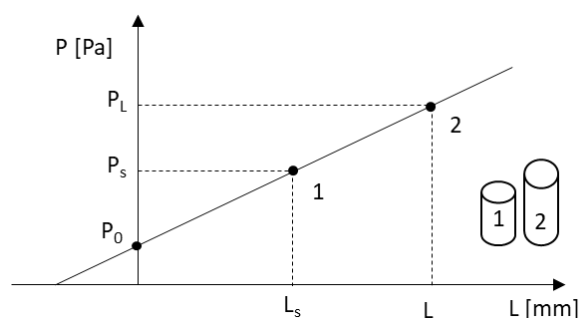
(Forrás: Crawford, 1997)



A korrekció meghatározásához azonos átmérőjű, de különböző hosszúságú kapillárisokkal kell méréseket végezni. A korrekció egy adott nyírási sebességnél meghatározható, ha a nyomáskereső különböző kapilláris hosszfüggvényében ábrázoljuk, amint az a 4. ábrán látható (IMATEK, n.a.).

4. ábra: Bagley korrekció elvi vázlata

(Forrás: IMATEK, n.a.)



A mért nyomásemések a kapilláris előtt és a furathosszok ismeretében P_0 [Pa] Bagley korrekció számítható, illetve szerkeszthető a 4. ábra szerint.

$$P_0 = \frac{P_s \cdot L - P_L \cdot L_s}{L - L_s} \quad (6.)$$

ahol P_s [Pa] a nyomásemés rövid kapilláris esetén, P_L [Pa] a nyomásemés hosszú kapilláris esetén, L [mm] a hosszabb kapilláris hossza, L_s [mm] a rövidebb kapilláris hossza (IMATEK, n.a.).

A P_0 [Pa] ismeretében a korrigált nyírófeszültség számítható:

$$\tau_{fc} = \frac{(P_L - P_0) \cdot (2R)}{4L} \quad (7.)$$

ahol P_0 [Pa] a Bagley korrekció, P_L [Pa] a nyomásemés hosszú kapilláris esetén, L [mm] a hosszabb kapilláris hossza, R [mm] a kapilláris sugara (IMATEK, n.a.).

Ezzel meghatározható a viszkozitás függő korrigált térfogatáram [mm³/s]:

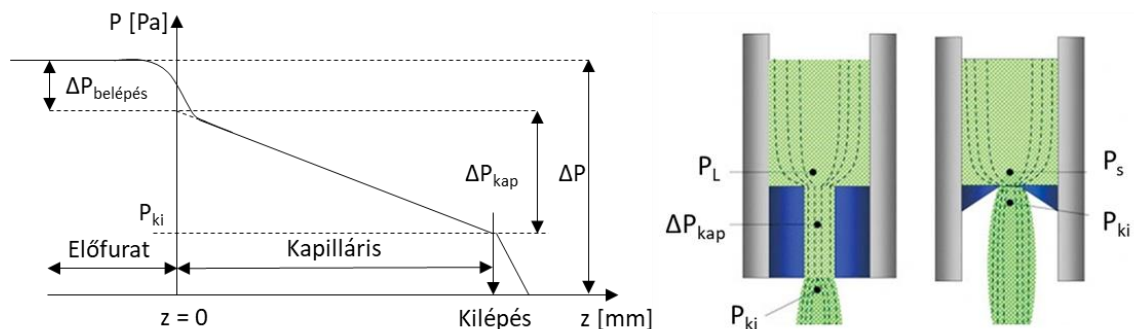
$$\dot{V} = \frac{R^4 \pi (P_L - P_0)}{8\eta_f L} \quad (8.)$$

A korrekció ismeretében pontosítható az ömledék áramlása során a nyomásvesztés, ezáltal pontosabb méretezést tesz lehetővé (IMATEK, n.a.).

A kapilláris előtt, a kapilláris hossza mentén, és a kilépéskori nyomás változás az 5. ábra szerint oszlik el. A kilépési ponton megfigyelhető, hogy a polimer ömledék a kapillárisnál nagyobb átmérőre duzzad (Dynisco, n.a.).

5. ábra: Nyomás változás a kapillárisban

(Forrás: Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, n.a.)

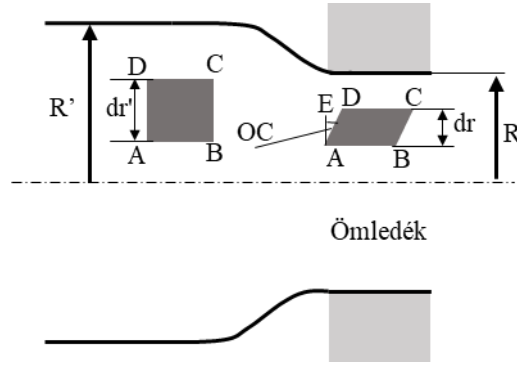


3.1.4. Duzzadás

A műanyag ömledék a feldolgozás során rugalmasan viselkedik, alakváltozási energiát képes tárolni. Az extrúderből való kilépéskor az ömledék relaxálódik, a tárolt rugalmas energia felszabadul, keresztmetszete megnövekszik a 6. ábra szerint. A kilépő ömledék térfogatváltozása a nyomat minőségét befolyásolja, ezért fontos szempont a tervezéskor.

6. ábra: Kilépéskori térfogatváltozás hosszú kapilláris esetén

(Forrás: Crawford, 1997)



A kilépéskori keresztmetszet és az áramlási keresztmetszet aránya hosszú kapilláris esetén ($B_{SR} = \frac{R'}{R}$):

$$B_{SR}^2 = \frac{\int_0^R (1 + \gamma_r^2)^{\frac{1}{2}} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr}{\int_0^R 2\pi \cdot r \cdot dr} \quad (9.)$$

ahol r [mm] a vizsgált átmérő (Crawford, 1997).

A nyírási deformáció γ_r [-] meghatározása adott átmérő esetén:

$$\gamma_r = \frac{r}{R} \gamma_R \quad (10.)$$

ahol γ_R [-] a nyírási deformáció a kapilláris falánál (Crawford, 1997).

A (9.) egyenletbe visszahelyettesítve, és az integrálás elvégzése után a keresztmetszet-változás aránya (Crawford, 1997):

$$B_{SR} = \left[\frac{2}{3} \gamma_R \left\{ (1 + \gamma_R^{-2})^{\frac{3}{2}} - \gamma_R^{-3} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11.)$$

Abban az esetben, ha a kilépő kapilláris hossza elhanyagolhatóan kicsi, azaz közel nulla hosszúságú kapilláris esetén:

$$B_{ER}^2 = \frac{\int_0^R 2\pi \cdot r \cdot e^{\varepsilon_R} dr}{\int_0^R 2\pi \cdot r \cdot dr} \quad (12.)$$

ahol e^{ε_R} [-] alakváltozás (nyúlás) (Crawford, 1997).

Az alakváltozás a fluidum elem méretének változásából meghatározható a 6. ábra szerint:

$$e^{\varepsilon_R} = 1 + \frac{dr' - dr}{dr} \quad (13.)$$

A (12.) egyenletbe behelyettesítve, és az integrálást elvégezve a térfogatváltozás aránya:

$$B_{ER} = (e^{\varepsilon_R})^{\frac{1}{2}} \quad (14.)$$

3.2. Reológiai anyagmodellek

Az ömledék nyírási sebesség (idő) és hőmérséklet függő viszkozitásának leírásához reológiai anyagtörvény alkalmazása szükséges, melynek ismeretében meghatározhatjuk az ömledék rétegek egymáson történő elmozdulással szemben mutatott ellenállásának mértékét.

3.2.1. Ostwald–de Waele törvény

A nem-newtoni folyadékok esetén a nyírófeszültség a nyírási sebességgel nem lineárisan változik. Az Ostwald-de Waele (hatvány) törvénnyel a nem-newtoni folyadékok viszkozitását lehet meghatározni az áramlási körülményeket jellemző nyírási sebesség ismeretében:

$$\eta_o = K_{or} \cdot e^{(-\beta T)} \cdot \dot{\gamma}_a^{n_r-1} \quad (15.)$$

ahol, $K_{or} [N \cdot s^{n_r} \cdot m^{-2}]$ konzisztencia állandó, β [-] hőmérsékleti együttható, $T [^\circ C]$

ömledék hőmérséklet, $\dot{\gamma}_a [s^{-1}]$ a nyírási sebesség, n_r [-] hatványkitevő (Rao-Schumacher, 2004).

A hatványkitevő n_r [-] a nyírófeszültség $\tau_f [Pa]$ és a nyírási sebesség $\dot{\gamma}_f [1/s]$, $T [^\circ C]$ ömledék hőmérséklet esetén (Rao-Schumacher, 2004):

$$n_r = \frac{\Delta \lg \dot{\gamma}_f}{\Delta \lg \tau_f} \quad (16.)$$

A konzisztencia állandó $K_{or} [N \cdot s^{n_r} \cdot m^{-2}]$ a hatványkitevő n_r [-] ismeretében (Rao-Schumacher, 2004):

$$K_{or} = \frac{\tau_f}{\gamma_f^{n_r}} \quad (17.)$$

3.2.2. Carreau-Yasuda modell

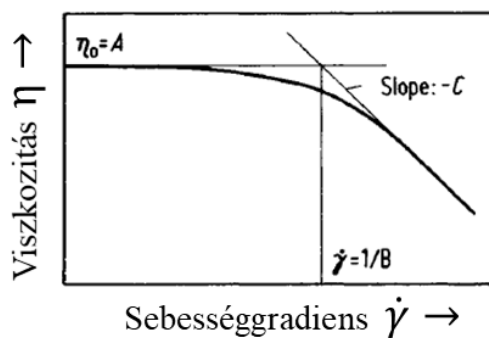
A Carreau-Yasuda modell használatával jó közelítéssel lehet meghatározni a polimer ömledék viszkozitását alacsony és magas nyírási sebesség esetén. A modell használatához azonban több anyagjellemző méréssel történő meghatározása szükséges.

$$\eta_c = \frac{A}{(1 + B\dot{\gamma})^C} \quad (18.)$$

ahol, A [Pa s] a viszkozitási tényező kezdő nyírási sebességnél, B [s⁻¹] a nyírási sebesség és C [s⁻¹] meredekség (Rao-Schumacher, 2004).

7. ábra: Carreau- Yasuda modell paramétereinek meghatározása szerkesztéssel

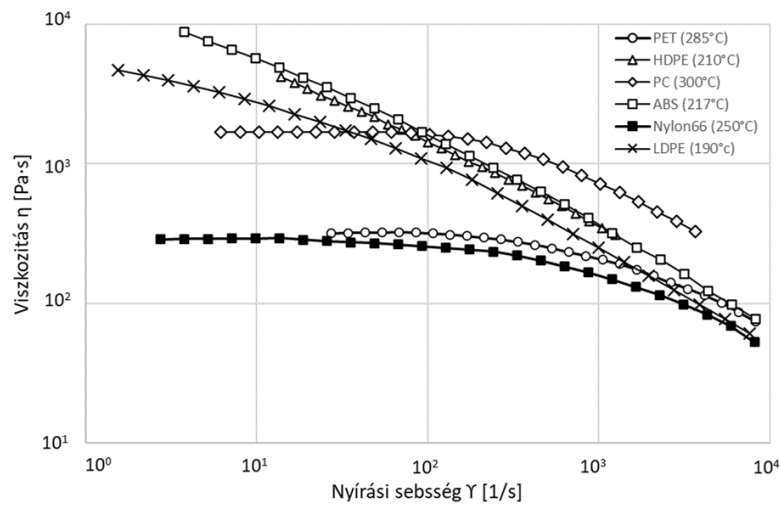
(Forrás: Rao-Schumacher, 2004)



Kísérleti úton meghatározott FDM rendszerű 3D nyomtatáshoz jellemzően használt, eltérő molekuláris tömeggel rendelkező polimerek viszkozitásának változását a nyírási sebesség függvényében a 8. ábra szemlélteti.

8. ábra: 3D nyomtatásban használt filamentek viszkozitásváltozása a nyírási sebességük függvényében

(Forrás: Dynisco, n.a.)



3.2.3. Viskozitást befolyásoló tényezők

A polimerek viszkozitása a hőmérsékleten, a nyomáson és a nyírási sebességen túl egyéb tényezőktől is függ.

Molekuláris tömeg

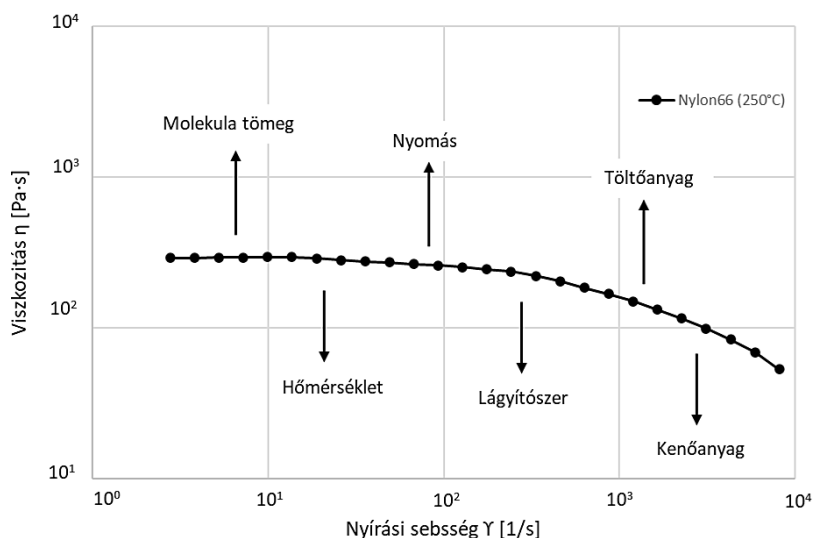
Az átlagos molekulatömeg növekedésével növekszik a polimer ömledék viszkozitása. Jellemzően a polimer nyírási érzékenysége a molekulatömeg növekedésével megnő, a hőmérsékletérzékenység az ömledékképződéshez szükséges energiát azonban nem befolyásolja (Dynisco, n.a).

Adalékok

A gyártáshoz és a polimer keverék tulajdonságainak beállításához adalékokat használnak. A töltőanyag (farost, üvegszál, szénszál) növeli a viszkozitást, a műanyag lágyítószer és a kenőanyagok pedig csökkentik (Dynisco, n.a).

9. ábra: Különböző faktorok ömledék viszkozitására gyakorolt hatása

(Forrás: Dynisco, n.a.)

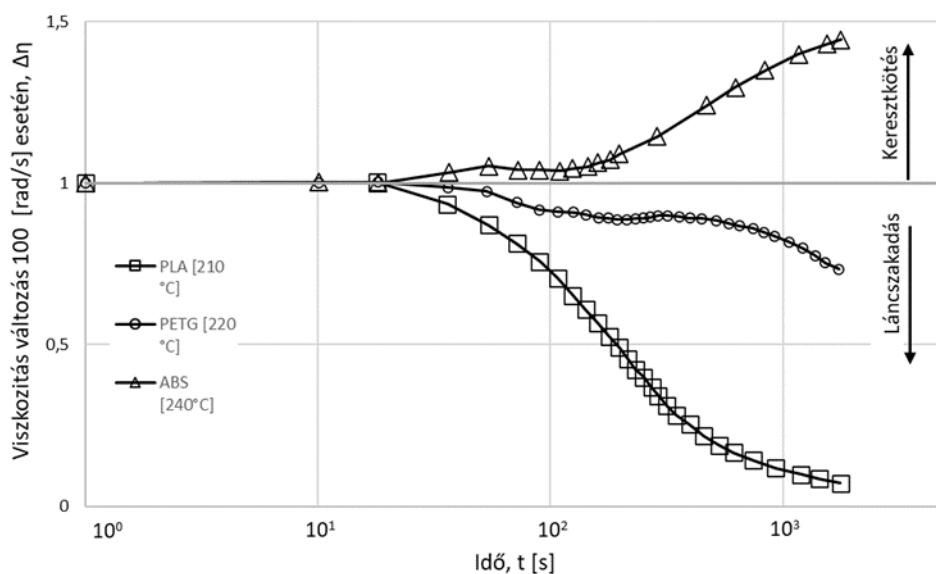


Termikus degradáció

A legtöbb szerves polimer instabil magas hőmérsékleten. A molekulákban lévő kémiai kötések felbomolhatnak, így kisebb molekulaláncok jönnek létre, illetve a magas hőmérséklet reakciót is eredményezhet melynek következtében nagyobb molekulák jönnek létre. Erre hajlamos a PET, PC, PMMA, PVC. Az így létrejött nagyobb molekulatömeg nagymértékben befolyásolja a viszkozitást (Dynisco, n.a).

10. ábra: Viskozitás változása hőterhelés hatására

(Forrás: Spoerk et al.³⁹, 2019)



4. Jellemző 3D nyomtatási anyagok termikus anyagjellemzői

Az extrúder tervezését a piaci igények alapján végzem el, ezért ebben a fejezetben a 3D nyomtatásban leggyakrabban alkalmazott műanyagok és azok termikus sajátosságainak ismertetésével fogok foglalkozni.

4.1. Termikus anyagjellemzők

Olvadáspont

Az olvadási pontot meghaladó hőmérséklet esetén a hőre lágyuló polimerek elérik a folyási hőmérsékletüket, ahol teljesen plasztikusan viselkednek, a molekula láncok elcsúsznak egymáson, a polimer ömledék fázisba lép (Kalácska et al.²¹, 2007).

Üvegesedési hőmérséklet

Az üvegesedési hőmérséklet az a hőmérséklet melyen az amorf műanyagok merevsége rohamosan csökken, az anyag képlékeny tartományba kerül és kis erőhatásra is deformálódik. A részben kristályos termoplasztok esetén a fizikai tulajdonságai az anyagnak kisebb mértékben változnak, mert a kristályos rész olvadáspontja alacsonyabb, mint az üvegesedési hőmérséklete, vagy a kettő különbsége csekély (Kalácska et al.²¹, 2007).

Fajlagos hőkapacitás

A fajlagos hőkapacitás [J/(kgK)] az egységi tömegű anyaggal közölt hő mennyisége, melynek hatására egy fokos hőmérséklet növekedés megy végbe (Kalácska et al.²¹, 2007).

Hővezetési tényező

A hővezetési tényező [W/(mK)] időegység alatt, egységnyi keresztmetszeten, egységnyi hőmérséklet-gradiens hatására létrejövő hőáram áthaladásának mértékét fejezi ki (Kalácska et al.²¹, 2007).

Hődiffúziós tényező

A hődiffúziós tényező egy olyan anyagi állandó, amely meghatározza, hogy egy adott anyagban mennyire hatékonyan terjed a hő (Kalácska et al.²¹, 2007).

$$a = \frac{\alpha}{\rho c_p} \quad (19.)$$

ahol a [m^2] a hődiffúziós tényező, α [W/(mK)] a hővezetési tényező, c_p [J/kgK] az állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitás (Kalácska et al.²¹, 2007).

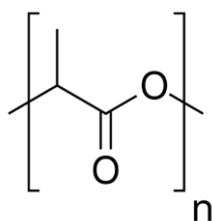
4.2. FDM/FFF nyomtatókban használt műanyagok

Az FDM 3D nyomtatásban gyakran használt anyagok közé tartozik a PLA és a PET-G, elsősorban könnyű nyomtathatóságuk miatt. A 3D nyomtatástechnológia terjedésének eredményeként egyre több nehezen nyomtatható, műszaki felhasználásra alkalmas műanyag nyomtatására van igény, mint például a PC és a PA66. A leggyakoribb nyomtatóanyagok a következők:

- **PLA** (politejsav) ipari körülmények között komposztálható műanyag. Könnyen nyomtatható, alacsony olvadáspontú, feldolgozásakor nem keletkeznek illékony anyagok („szagmentes”). Széleskörben alkalmazzák dísz tárgyak, prototípusok és funkcionális tárgyak nyomtatására.

11. ábra: Politejsav molekula szerkezete

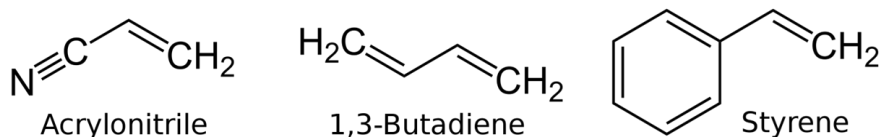
(Forrás: Wikipedia.org, n.a.⁴⁶)



- **ABS** (akronitril-butadién-sztirol) kiváló vegyszerállóságú, nagy mechanikai igénybevételeknek ellenáll. Nyomtatása a vetemedési hajlama miatt tapasztalatot igényel, hevítésekor a felszabaduló mérgező gázok miatt pedig elszívás mellett célszerű feldolgozni. Oldószerrel (aceton) a nyomtatott termék felületi egyenetlenségei javíthatóak és kiváló felületi minőség érhető el (Xometry, n. a.)

12. ábra: Akronitril-butadién-sztirol molekula szerkezete

(Forrás: Wikipedia.org, n.a.⁴²)

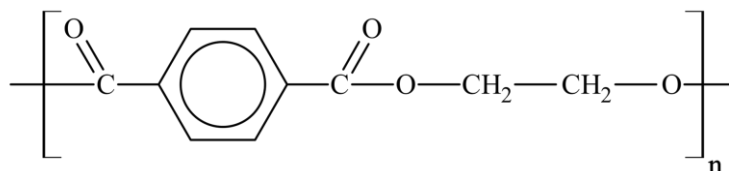


- **PET-G** (polietilén-tereftalát-glikol): ellenáll a gyenge lúgoknak, savaknak, UV sugárzásnak. Nyomtathatósága nem igényel különleges beállításokat, könnyen nyomtatható. A kedvező hőállósága átmentet képez az ABS és a PLA felhasználása

között, azonban fokozottan hajlamos a nedvességfelvételre, ami jelentősen ronthatja a szilárdsági tulajdonságait.

13. ábra: Polietilén-tereftalát-glikol molekula szerkezete

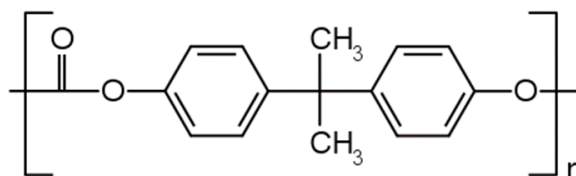
(Forrás: Wikipedia.org, n.a.⁴⁵)



- **PC** (polikarbonát): kiváló hő és ütésállósági tulajdonsággal rendelkezik. Ipari felhasználása a kedvező tulajdonságai miatt elterjedt. Nyomtathatósága tapasztalatot igényel, valamint fűthető nyomtató teret a vetemedési hajlama okán.

14. ábra: Polikarbonát molekula szerkezete

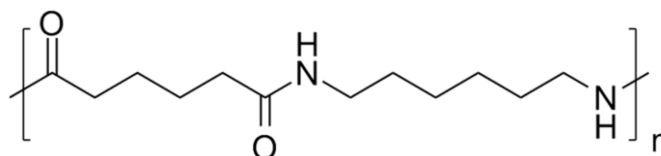
(Forrás:Frwiki.wiki, n.a.)



- **PA66** (poli-amid): kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező műszaki műanyag. Kopásállósága és kiváló vegyszerállósága miatt az autóiparban széleskörben használják. Nyomtatása nagy tapasztaltot, zárt és fűtött nyomtatóteret, magas extrúder hőmérséklet igényel, nedvességfelvételre fokozottan hajlamos

15. ábra: Poli-amid molekula szerkezete

(Forrás: Wikipedia.org, n.a.⁴³)

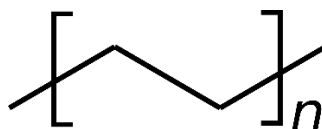


- **HDPE/LDPE** (nagy/alcsony molekulatömegű poli-etilén): A háztartásokban leggyakrabban előforduló újrahasznosítható műanyag. Kiváló mechanikai és vegyi ellenállással rendelkeznek. Nyomtatásuk a zsugorodásuk miatt rendkívül nehéz,

pontos nyomtatási beállításokat igényel. Újrahasznosíthatósága miatt a jövőben széleskörű elterjedésére lehet számítani nyomtatóanyagként.

16. ábra: Polietilén-tereftalát-glikol molekula szerkezete

(Forrás: Wikipedia.org, n.a.⁴⁴)



Az 1. táblázatban összesítve a leggyakrabban alkalmazott *FDM rendszerű* 3D nyomtató filamentek termikus és nyomtatástechnológiai tulajdonságai láthatóak.

1. táblázat: FDM/FFF nyomtatókban használt polimerek

(Forrás: Latko- Durablek et al.²⁵, 2020)

Jellemző	[-]	HDPE	LDPE	PLA	ABS	PET-G	PC	Nylon 66
Anyagsűrűség	[g/cm ³]	0,94	0,91	1,26	1,06	1,34	1,2	1,14
Olvadáspont	[°C]	130	110	145-160	170	200	250-320	220-268
Üvegesedési hőmérséklet	[°C]	110	100	60	105	65	150	85
Fajlagos hőkapacitás	[J/kg·K]	1330-2400	2400-2600	1200	1260-1675	1040-1050	1200-1300	1670
Hővezetési tényező	[W/(m·K)]	0,44	0,34	0,12-0,15	0,24	0,24	0,19-0,22	0,2-0,26
Termikus diffúzió	[mm ² /s]	0,17-0,18	0,15-0,2	0,058-0,1	0,13-0,18	0,16-0,17	0,144	0,18-0,21
Fúvóka hőmérséklet	[°C]	220-250	115-120	190	230-240	220-240	250-320	255-275
Asztal hőmérséklet	[°C]	100-130	55-60	50-60	100	60-80	80-150	60-70
Nyomtatási sebesség Ø0,4 [mm] fúvóka	[mm/s]	20-40	20-30	10-50	30-50	40-80	30-70	30-50

5. Polimerek extrudálása

Az extrúzió folyamatos alakadási eljárás, mind a klasszikus extrudálás, mind a 3D nyomtatás esetében. A csigás extrúderben lezajló termikus- és reológiai folyamatok feltételezhetően hasonlóak a 3D nyomtató extrúziós folyamataival, ezért célszerű a vonatkozó szakirodalom áttekintése.

5.1. Az extrudálás

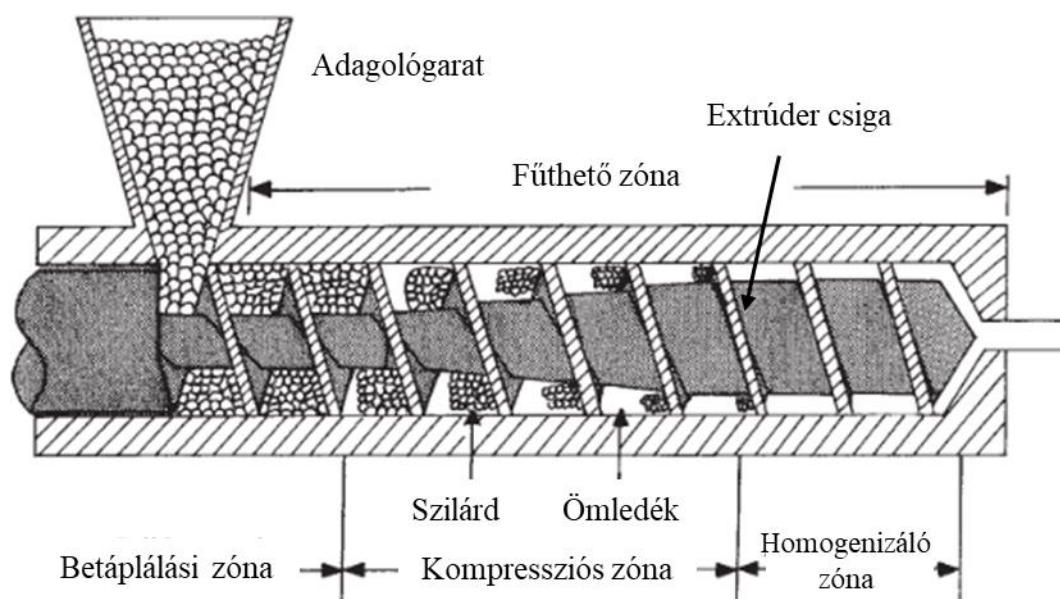
Az extrúzió során a kezdeti alapanyag homogén polimer ömledékké alakul, majd az így létrejött polimer ömledék formázódik késztermékké, rúdanyaggá, vagy profillá. Jellemző típusai a direkt extrúzió, reaktív extrúzió, koextrúzió, fűvások formázás, fóliafűvások (Crawford, 1997).

5.1.1. Csigás extrúder felépítése

A hagyományos extrúder felépítését a 17. ábra szemlélteti.

17. ábra: Csigás extrúder felépítése

(Forrás: Kalácska et al.²¹, 2007)



A folyamatos extrúzió feltétele az alapanyag és adalékanyagok keverékének betáplálása az adagológaratba. Az extrúdercsatornában haladva a betáplált szilárd halmazállapotú műanyag szakaszosan plasztifikálódik, a kompressziós zónában az ömledékképződés megkezdődik, a kilépési pont előtti homogenizáló részig végbemegy.

A csigás extrúder technológiai áttekintésénél a kompressziós zóna részletesebb elemzésére van szükség, mivel az ömledékképződés ezen a szakaszon történik.

5.1.2. Kompressziós zóna

A kompressziós zónában a csiga geometriai kialakítása miatt a szilárd műanyag a nyomás és a súrlódás hatására eléri az üvegesedési hőmérsékletét, majd ömledékké alakul.

Az itt létrejövő áramlást három összetevőre lehet bontani, a nyomáskülönbség hatására létrejövő visszaáramlásra $Q_p [mm^3/s]$, a térfogatkiszorításra $Q_d [mm^3/s]$, és az üzemi hézag miatt létrejövő térfogat visszaáramlásra $Q_L [mm^3/s]$. Az extrúder térfogatárama így felírható (Crawford, 1997):

$$Q = Q_d - Q_p - Q_L \quad (20.)$$

Térfogatkiszorítás

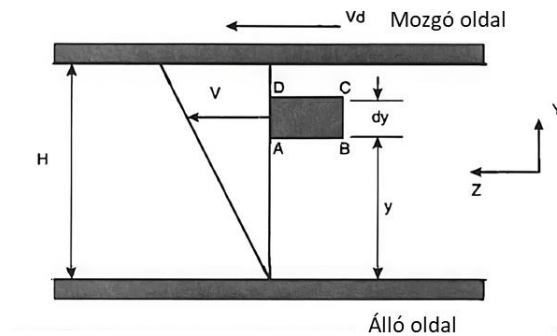
A térfogatkiszorítás megvalósul, ha az ömledék az extrúdercsiga forgásából eredő tolóerő hatására az extrúdercső (álló oldal) palástján megcsúszik, azonban a csigára nem tapadhat fel. A fluidum a 18. ábrán az ABCD téglalap, az extrúdercsiga (mozgó oldal) felületével együtt mozdul el. Térfogatáram meghatározható az alábbi egyenlettel:

$$dQ = V \cdot dy \cdot dx \quad (21.)$$

ahol, $V [m/s]$ a vizsgált áramlási keresztmetszet áramlási sebessége (Crawford, 1997).

18. ábra: Extrúdercsiga által kiszorított térfogat

(Forrás: Crawford, 1997)



Az ömledék sebességváltozását lineárisnak feltételezzük a 18. ábra szerint, akkor az extrúder kapilláris $y [mm]$ magasságában az ömledék sebessége kiszámítható (Crawford, 1997):

$$V = V_d \cdot \left[\frac{y}{H} \right] \quad (22.)$$

Behelyettesítve a (21.) egyenletbe a térfogatáram (Crawford, 1997):

$$Q_d = \int_0^H \int_0^T \frac{V_d \cdot y}{H} \cdot dy \cdot dx \quad (23.)$$

ahol H [mm] menetárok mélysége, T [mm] az áramlási keresztmetszet szélessége.

Az integrálást elvégezve:

$$Q_d = \frac{1}{2} THV_d \quad (24.)$$

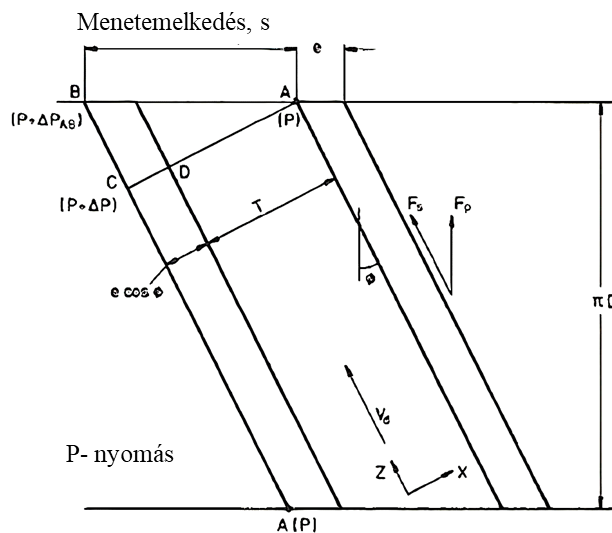
A csigás extrúder esetén az áramlási keresztmetszet szélessége 19. ábra szerint:

$$T = (\pi \cdot D_b \cdot \tan\phi - e) \cdot \cos\phi \quad (25.)$$

ahol az e [mm] csigamenet vastagsága, ϕ [°] menetemelkedési szög (Crawford, 1997).

19. ábra: Áramlási keresztmetszet vázlata

(Forrás: Crawford, 1997)



A csigás extrúder esetén V_d [mm/s] ömledék sebessége:

$$V_d = \pi \cdot D_b \cdot N \cdot \cos\phi \quad (26.)$$

ahol D_b [mm] extrúdercső átmérője, N [1/min] csiga fordulatszáma. (Crawford, 1997).

A csigamenet vastagsága e [mm] az extrúdercső D_b [mm] átmérőjéhez képest elhanyagolható, így visszahelyettesítve a (25.), (26.) egyenletet a (24.) egyenletbe az extrúder térfogatkiszorítása (Crawford, 1997):

$$Q_d = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D_b^2 N \cdot H \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \quad (27.)$$

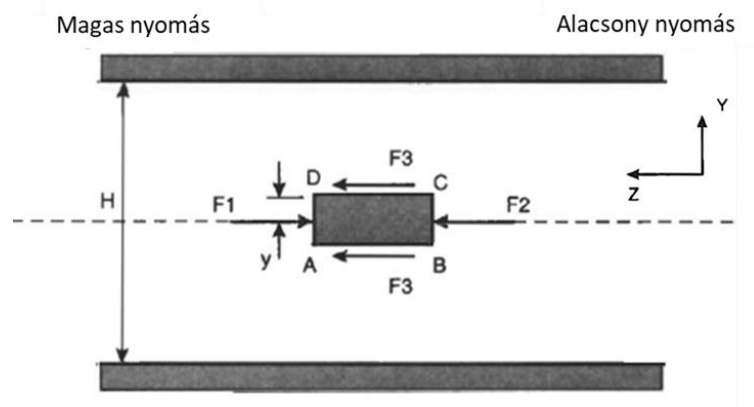
Nyomáskülönbség hatására létrejövő visszaáramlás

Az ömledéknyomás az extrúder kilépési pontja felé növekszik, ezért a nyomáskülönbség hatására visszaáramlás történik. A visszaáramló ömledék csökkenti az extrúder elméletileg elérhető térfogatáramát.

A 20. ábrán a fluidum elemre ható erőket mutatja be az extrúder hosszmeteszetében, ahol elemszélesség: dz , elemvastagság: dx , elem magasság: dy .

20. ábra: Vizsgált fluidum-elemre ható erők

(Forrás: Crawford, 1997)



A fluidum elemre ható erők:

$$F_1 = \left(P \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot dy \cdot dx$$

$$F_2 = P \cdot dy \cdot dx$$

$$F_3 = \tau_y \cdot dy \cdot dx$$

(28.)

ahol, F_1 a $p + dp$ nyomásból származó erő, F_2 kiinduló p nyomásból ébredő erő, F_3 a vizsgált fluidum elem áramlással párhuzamos élein ébredő csúsztató feszültségből létrejövő erőpár (Crawford, 1997).

Állandósult áramlás esetén felírható (Crawford, 1997):

$$F_1 = F_2 + 2F_3$$

(29.)

A nyírófeszültségre rendezve (Crawford, 1997):

$$\tau_y = y \cdot \frac{dP}{dz}$$

(30.)

Polimer ömledékek esetén a nyírófeszültség függ a viszkozitástól és a nyírási sebességtől a (4.) egyenlet szerint. Az összefüggést felhasználva a nyírófeszültség (Crawford, 1997):

$$\tau_y = y \cdot \frac{dP}{dz} = \gamma \cdot \eta = \eta \cdot \frac{dV}{dy} \quad (31.)$$

$$\int_0^V dV = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dP}{dz} \int_{H/2}^y y dy \quad (32.)$$

Az integrálást elvégezve:

$$V = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dP}{dz} \cdot \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) \quad (33.)$$

A térfogatáram (Crawford, 1997):

$$dQ_p = V \cdot T \cdot dy \quad (34.)$$

Behelyettesítve kiszámítható a nyomáskülönbségből származó térfogatáram (Crawford, 1997):

$$Q_p = 2 \cdot \int_0^{H/2} \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dP}{dz} \cdot \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) \cdot T \cdot dy \quad (35.)$$

Integrálást elvégezve:

$$Q_p = -\frac{1}{12\eta} \cdot \frac{dP}{dz} \cdot H^3 \cdot T \quad (36.)$$

Az extrúder adott hosszán, a nyomásváltozás a menetemelkedési szög és a fluidum elem z [mm] irányú helyzetétől függ (Crawford, 1997):

$$\sin\phi = \frac{dL}{dz} \text{ tehát } \frac{dP}{dz} = \frac{dP}{dL} \cdot \sin\phi \quad (37.)$$

A (36.) egyenletbe behelyettesítve a (37.) egyenlet összefüggését és a (25.) egyenletet a nyomáskülönbség hatására létrejövő térfogatáram az extrúder hosszára vetítve (Crawford, 1997):

$$Q_p = \frac{\pi \cdot D_b \cdot H^3 \cdot \sin^2\phi}{12\eta} \cdot \frac{dP}{dL} \quad (38.)$$

Résáramlás

Az extrúdercső és az extrúdercsiga közötti illesztési hézagra a hőtágulás, és gyártástechnológiai okok miatt van szükség. A hézagon az ömledék a nyomáskülönbség hatására visszaáramlik, ezzel csökkentve az extrúder hasznos térfogatáramát (Crawford, 1997).

A hézag: δ_{FLT} [mm], menet szélessége: $e_L = e \cdot \cos \phi$ [mm], áramlási keresztmetszet szélessége: $T_L = \frac{\pi \cdot D_b}{\cos \phi}$ [mm].

Visszaáramlás (Crawford, 1997):

$$Q_L = \frac{\pi^2 \cdot D_b^2 \cdot \delta_{FLT}^3}{12\eta \cdot e_L} \cdot \tan \phi \cdot \frac{dP}{dL} \quad (39.)$$

FDM rendszerű 3D nyomtatás esetén az áramlási keresztmetszethez hasonlóan a szilárd filament szál és a kapilláris palástja között hézagra van szükség. A műanyag-kapilláris palást közti tapadás(súrlódás) elkerülése miatt, ezen a hézagon az ömledék a nyomás hatására és a szál visszahúzása miatt visszaáramolhat, blokkolást előidézve (Crawford, 1997).

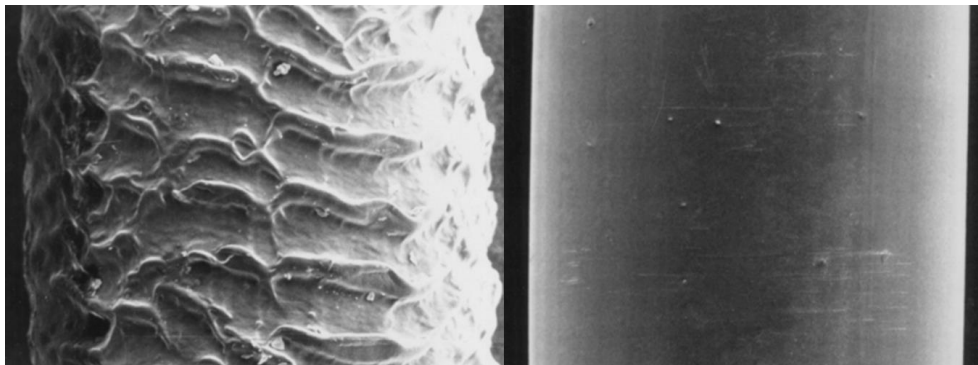
5.2. Extrudálási hibák

A termelékenység és a termék minőség biztosításának érdekében fontos az extrúziós hibák elkerülése. Továbbiakban a leggyakrabban előforduló hibák kerülnek ismertetésre.

Felületi hullámosodás (Shark skinning)

A kapillárisból való kilépéskor az ömledék falmenti, lassabb áramlási sebességgel rendelkező rétegének fel kell zárkóznia az ömledék középpontjához. Ha a felzárkózási folyamat az ömledék megszilárdulása előtt nem megy végbe, akkor a külső lassan mozgó réteg megszilárdul és az ömledék belső rétegei tovább mozdulnak, így az extrudált felületen a 21. ábrán látható hullámos felületi hiba jelenik meg (Denn, 2001; GIAForm, 2021).

21. ábra: Balra: felület hullámosodás, jobbra: megfelelő felület minőség
(Forrás: Denn, 2001)



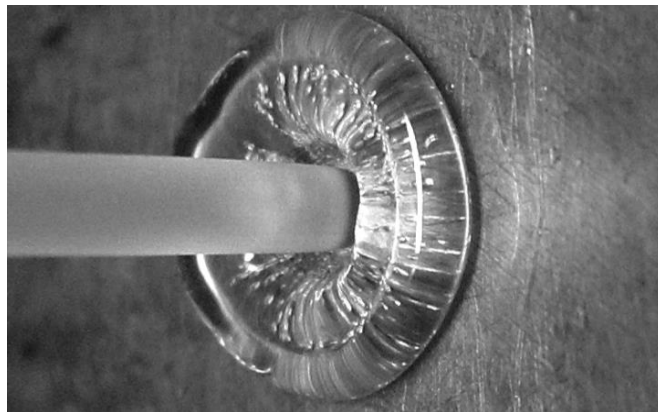
Elkerülése lehetséges hosszabb kapilláris geometriával, mivel így a 1.1.4 fejezetben részletezett hatás csökkenthető, továbbá az extrudálás sebességének csökkentésével, illetve a hűtőközeg hőmérsékletének szabályzásával (Schwartz-Webber, 2021).

Ömledék lerakódás kilépéskor (Die build-up)

Az extrudált műanyag lerakódik a szerszám kilépési pontjánál és megszilárdul, ami akadályozhatja a kiáramlást vagy dugulást okozhat. Lerakódásnak az oka az alacsony molekulatömegű polimerek, különböző töltőanyagok és pigmentek az áramlás külső rétegeiben való felhalmozódása majd akkumulálódása a kilépési ponton (Schwartz-Webber, 2021).

22. ábra: Műanyag lerakódás a kilépési pontnál

(Forrás: Zatloukal-Musil, 2015)

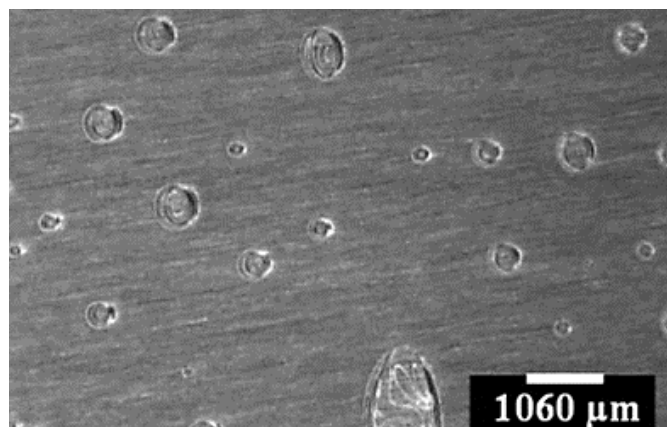


Folytonossági hiba

A (gőz) buborék képződés az extrúzió során a polimer alapanyag higroszkopikus tulajdonsága miatt fordulhat elő. Nem megfelelően tárolt polimer alapanyag a környezetéből a nedvességet megköti, ami későbbi feldolgozás során az ömledékben gőzbuborékokként jelenik meg és folytonossági hibát idéz elő (Schwartz-Webber, 2021).

23. ábra: Folytonossági hibák az ömledékben

(Forrás: Schwartz-Webber, 2021)

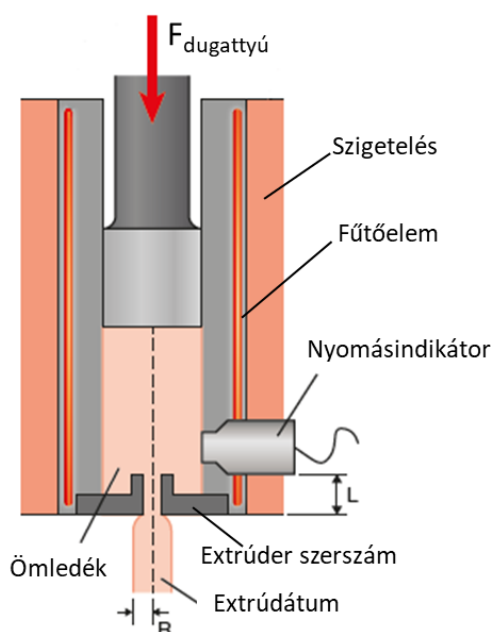


5.3. Hidrosztatikus extrúzió

Hidrosztatikus extrúzió olyan eljárás, mely során a műanyagot nyomás alatt préselnek egy fűtött kapillárison keresztül, majd ezt követően egy szerszámmal alakot adnak a műanyag ömledéknek.

24. ábra: Hidrosztatikus extrúder

(Forrás: Demets et. al.⁷, 2021)



A hidrosztatikus extrúder nyomásindikátorával az extrúder szerszám előtti nyomásvesztése mérhető, a hidraulikus rendszernyomásból pedig a kilépés előtti nyomáskülönbség meghatározható, így a viszkozitás az (1.) egyenletbe való behelyettesítéssel számolható az extrúder szerszám geometriai méreteinek ismeretében.

A mért érték alapján következtetéseket lehet levonni a polimer ömledék reológiai jellemzőiről és feldolgozhatóságáról, valamint az extrúzió típusát lehet megválasztani a 2.1-es bekezdésben felsoroltak közül (Demets et. al.⁷, 2021).

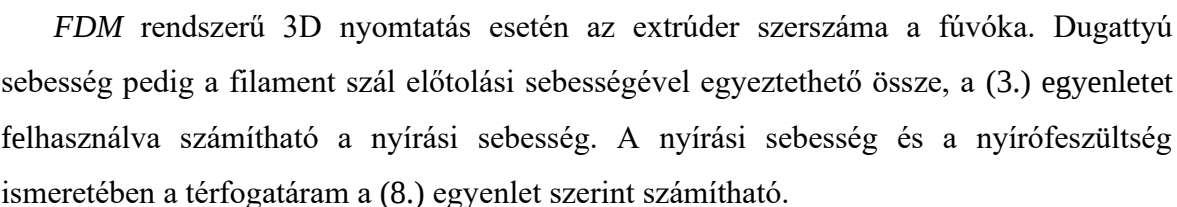
Ezzel az eljárással meghatározható az *MFI* (*Melt Flow Index*) anyagáramlási index:

$$MFI = \frac{m_p \cdot s_{10}}{t_m} \quad (40.)$$

ahol s_{10} [-] szabvány által meghatározott idő szorzótényezője (600 másodperc), t_m [s] idő mely alatt az m_p [g] anyagmennyiség extrudálható, m_p [g] anyagmennyiség, amit a dugattyú t_m [s] idő alatt extrudál (Demets et. al.⁷, 2021).

Háztartásokban használt műanyagok jellemző anyagáramlási indexe a 25. ábrán található.

(Forrás: Demets et. al.⁷, 2021)



Az *FDM* típusú extrúder hőre lágyuló polimer szálból (filament) ömledéket hoz létre és ezt az ömledéket a tárgyasztalon hűtőventilátorok segítségével megszilárdítja. Az *FDM* rendszerű 3D nyomtató legfontosabb részegységét, az extrúdert a **26.** ábra szemlélteti.

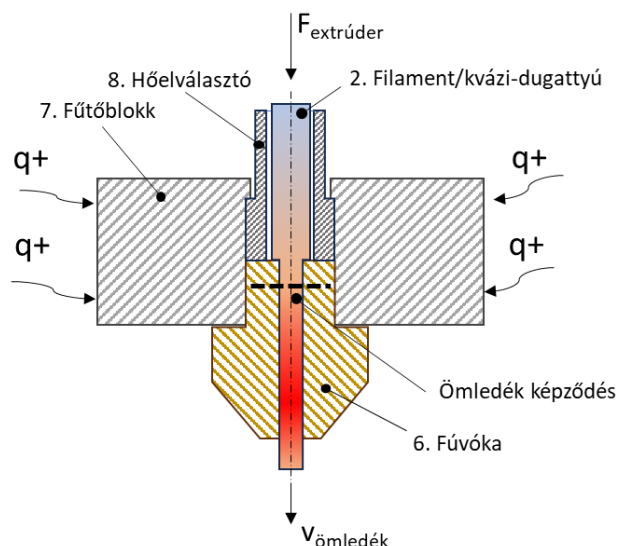
(Forrás: Clarke, 1997; Bábel, 2020)



Az extrúder egyik fő funkciója az alapanyag (ömledék) adagolása, melynek részei az előtoló motor fogaskerékpárja (1), a teflonbetét (10.), a hűtőborda (9.), a hőelválasztó (8), a fűtőblokk (7.) és a fűvóka (6.) melyek a 27. ábrán látható ömledék képződésért felelnek.

27. ábra: Filament ömledékképződés a fűvókában

(Forrás: saját szerkesztés)



A filament kvázi-dugattyú funkciója csak szilárd állapotban valósul meg, ezért az ömledékképződés előtti szakaszon a filament termikus leválasztása szükséges a hőelválasztó (8.) segítségével, mely egy rossz hővezető anyagból készült. Feladata továbbá a filament szál megvezetése is. A szilárd filamentet így az extrúder fogaskerékpáron (2.) keresztül az extrúder motor elő tudja tolni. A kvázi-dugattyú (filament) a fűtőblokkban (7.) felmelegszik, és a fűvókához (6.) érve ömledékké alakul, majd a folyamatos előtolás következtében az ömledék kiáramlik, és a fűvóka (6.) a kilépő ömledéknek alakot ad (Bábel, 2020).

6. Ömledékszálás leolvasztó extrúder funkció alapú tervezése

A diplomamunkám témáját adó *FDM* rendszerű 3D nyomtató extrúderének termikus optimalizálását funkció/modell alapú tervezés módszertanával valósítom meg. A tervezés során kvantifikálom az extrúder műszaki feladatait (funkcióit), beazonosítom a működési elveket, majd fizikai modell vagy kísérlet alapján javaslatot teszek az optimalizációjára.

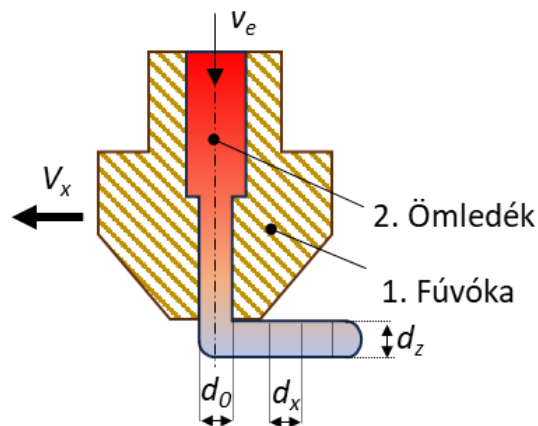
6.1. Filament adagolási funkció elemzése

Az *FDM* rendszerű 3D nyomtató extrúdere a filament szálból az alakadás érdekében ömledéket kell képezzen. A nyomtatási sebesség maximumának a limitációja (az extrúder tervezés szempontjából) a leolvasztható térfogatáram.

Az extrúder előtolási sebesség-szükségletét a nyomtatási sebesség, vagyis másként felírva a d_x [mm] a fűvóka egységnyi idő alatt megtett úthossza, a d_0 [mm] fűvóka kilépőfurat átmérője, d_z [mm] a nyomtatni kívánt rétegmagassága határozza meg.

28. ábra: Kilépő térfogatigényt befolyásoló méretek vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



Az extrúder konstrukciós szempontjai

A kiválasztott konstrukciós szempontokat a következő alfejezetek részletezik, mely eredményeket piackutatás, illetve *FDM* rendszerű 3D nyomtatóval szerzett tapasztalat alapján határoztam meg:

- minimum leolvasztandó térfogat: $20 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$, mely érték a piacon elérhető legnagyobb nyomtatási sebességhez tartozik,
- az extrúder méretezés során a d_0 [mm] fűvóka kilépőfurat átmérőjének 0,8 [mm]-t választok, a *FDM* 3D nyomtatás tapasztalatok alapján ez a fűvóka méret a legoptimálisabb a nagyteljesítményű nyomtatáshoz,

- $d_z [mm]$ a nyomtatni kívánt rétegmagasságnak 0,2 [mm], ami optimális a nyomatminőség és nyomtatási idő szempontjából,
- $d_f [mm]$ a feldolgozható filament átmérője 1,75 [mm],
- PLA, PETG, HDPE, ABS anyagok feldolgozására legyen alkalmas.

6.1.1. Mértékadó térfogatáram meghatározása

Ahhoz, hogy meghatározható legyen a nyomtatás térfogatáram-szükséglete, a piacon elérhető 3D nyomtatók nyomtatási sebességét szükséges megvizsgálni, ami alapján meghatározható az extrúder által leolvasztandó térfogatáram.

2. táblázat: Szeletelő beállítások 0,4 [mm] fűvóka, 0,1 [mm] rétegmagasság esetén
(Forrás: saját szerkesztés)

Kialakítás	Gyártó	Nyomtatási sebesség	Gyorsulás	Szükséges úthossz a maximális sebesség eléréséhez
[-]	[-]	[mm/s]	[mm/s ²]	[mm]
	Prusa I3 MK3S	80	1000	3,2
Cartesian	Prusa I3 MK4	200	5000	4
	Ender 3 V3	200	5000	4
Core XY	Ultimaker S5	150	5000	2,25
	Ultimaker S7	300	5000	9
	Prusa XL	200	5000	4
	Bambu Lab X1	500	2500	50
	Bambu Lab P1P	200	2500	8

A 2.táblázatban szereplő értékek a gyártók által szoftveresen beállított maximumok. A méretezés során így a legnagyobb nyomtatási sebességgel 500 [mm/s] rendelkező Bambu Lab X1 nyomtatóhoz tartozó leolvasztást szükséges figyelembe venni.

Időegység alatt nyomtatott térfogat:

$$\dot{V}_{ny} = d_0 \cdot dx \cdot v_{ny} = 0,4mm \cdot 0,1mm \cdot 500 \frac{mm}{s} = 20 \frac{mm^3}{s} \quad (41.)$$

ahol $v_{ny} [mm/s]$ a nyomtatási sebesség.

Bambu Lab X1 500-hoz tartozó időegység alatt maximálisan nyomtatható térfogat alapján a 0,8 [mm]-es fűvókához tartozó nyomtatási sebesség 0,2 [mm]-es rétegmagasság esetén:

$$v_{ny} = \frac{\dot{V}_{ny}}{d_0 \cdot dx} = \frac{20 \frac{mm^3}{s}}{0,8mm \cdot 0,2mm} = 125 \frac{mm}{s} \quad (42.)$$

A nyomtatási sebességet valójában az időegység alatt leolvasztható térfogat határozza meg, ami független a fűvóka méretétől vagy a nyomtatási rétegmagasság beállításától.

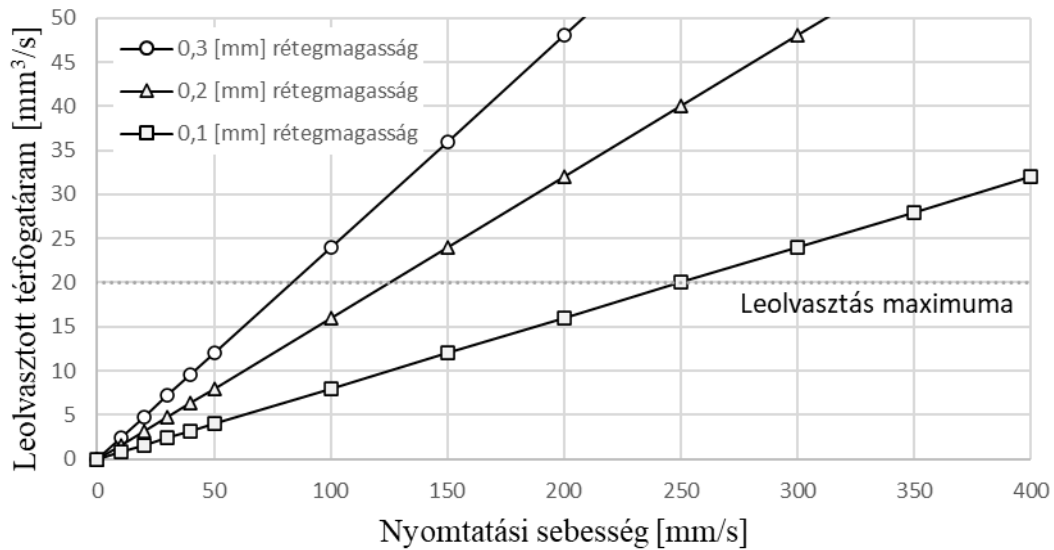
6.1.2. Rétegmagasság meghatározása

A rétegmagasság a nyomtatás z (vertikális) irányú felbontását határozza meg, melynek jellemző méretei 0,05 [mm] és 0,3 [mm] közöttiek.

A rétegmagasság növelésével csökken a nyomtatási idő is, azonban a leolvasztandó térfogatot is növeli. A rétegmagassághoz tartozó leolvasztandó térfogat adott nyomtatási sebesség mellett számítható a (41) használatával, melynek eredményeit a 29. ábra szemlélteti.

29. ábra: A 0,8 [mm]-es fűvóka leolvasztó-teljesítmény igénye a nyomtatási sebesség függvényében

(Forrás: saját szerkesztés)



6.1.3. Extrúder előtolási-sebesség méretezése

A kilépő térfogatáram $\dot{V}_{ki} [\frac{mm^3}{s}]$ megegyezik az időegység alatt nyomtatott térfogattal $\dot{V}_{ny} [\frac{mm^3}{s}]$ a kontinuitás egyenlete szerint. A kilépő térfogatáram:

$$\dot{V}_{ki} = \dot{V}_{ny} = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \cdot \bar{v}_{ki} \quad (43.)$$

ahol $\bar{v}_{ki} [mm/s]$ kilépési sebesség.

$\bar{v}_{ki} [mm/s]$ kilépési sebesség a (41) nyomtatott térfogat alapján:

$$\bar{v}_{ki} = \frac{\dot{V}_{ki} \cdot 4}{d_0^2 \cdot \pi} = \frac{20 \cdot 4}{0,8^2 \cdot \pi} = 39,79 \frac{mm}{s} \quad (44.)$$

Az extrúder előtolási sebessége:

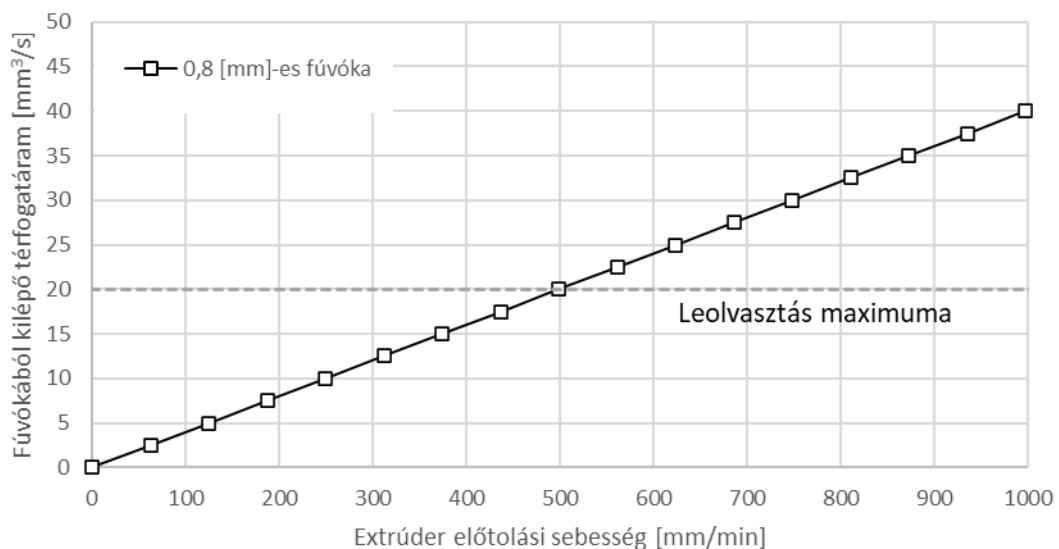
$$\bar{v}_e = \bar{v}_{ki} \frac{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d_f^2 \cdot \pi}{4}} = 40 \frac{mm}{s} \cdot \frac{\frac{0,8mm^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{1,75mm^2 \cdot \pi}{4}} = 8,36 \frac{mm}{s} = 501,5 \frac{mm}{min} \quad (45.)$$

ahol d_f [mm] filament átmérője.

A 0,8 [mm]-es fűvóka esetén az extrúder előtolási sebesség-szükséglete a 30. ábrán látható módon változik.

30. ábra: Extrúder előtolási sebessége különböző ömledékáramok esetén

(Forrás: saját szerkesztés)



6.2. Ömledékduzzadás vizsgálata

Az extrúderből kilépő ömledék az 1.1.4 fejezetben megismert rugalmas energiatároló képessége miatt kilépéskor a 6. ábra szerint duzzad, így rontja a nyomat minőségét. Ebben a fejezetben a kapilláris kialakításának hatását vizsgálom a kilépő ömledék duzzadásának szempontjából.

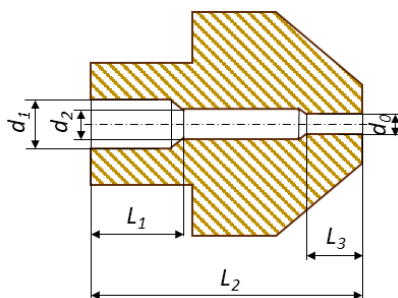
6.2.1. Az alkalmazott kapilláris-geometria

Az eltérő fűvóka geometriai kialakítások alkalmazásával vizsgálható az ömledékduzzadás mértéke kilépéskor. A vizsgálat során változtatott paraméter a kilépő

térfogatáram $\dot{V}_{ki} [\frac{mm^3}{s}]$ és a kapilláris-geometria, amit a 31. ábrán látható fúvóka L_3 [mm] furathossza jellemez.

31. ábra: Fúvóka geometriai vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



A 3. táblázatban tartalmazza az ömledékduzzadás vizsgálatához használt fúvókák jellemző méreteit. A részletes mérési vázlatot a 2. melléklet tartalmazza.

3. táblázat: Vizsgált fúvókák geometriai méretei

(Forrás: saját szerkesztés)

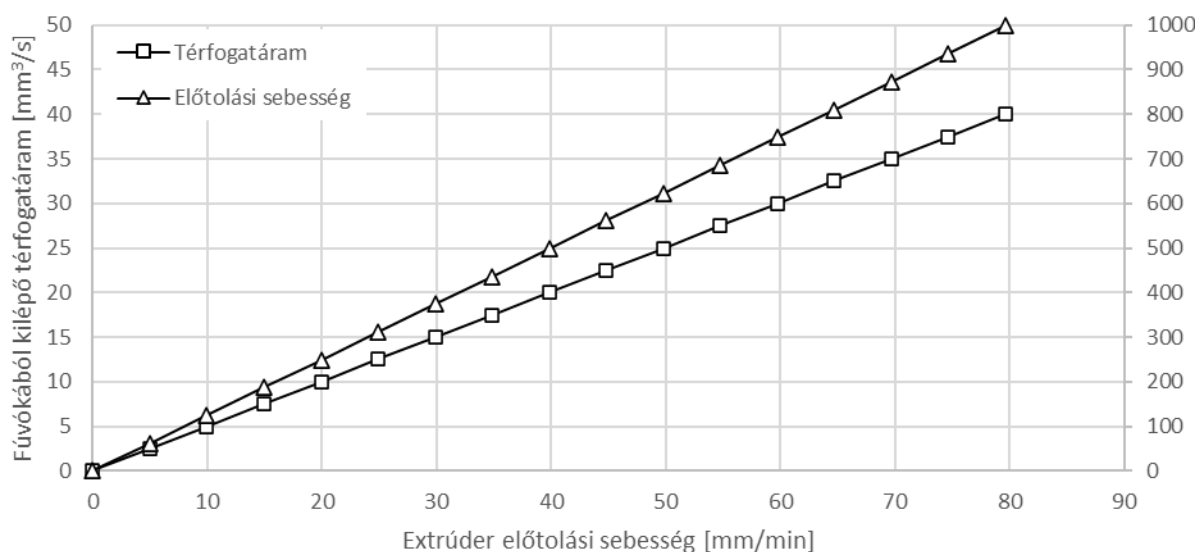
Fúvóka sorszáma	L_1	L_2	L_3	d_1	d_2	d_0
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	4,96	17,9	8	1,6	1,3	0,8
2	4,93	17,84	6,4	1,6	1,3	0,8
3	4,97	17,6	2,6	1,6	1,3	0,8

6.2.2. Extrúder-előtolási sebesség meghatározása

A kísérlet elvégzéshez szükséges meghatározni az előtolási sebességet (42) és (44) felhasználásával.

32. ábra: 0,8 [mm]-es fúvóka esetén szükséges extrúder előtolási sebességek a vizsgált térfogatáram esetén

(Forrás: saját szerkesztés)



A mérési beállítások tesztelése során a $40 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right]$ térfogatáramhoz tartozó előtolási sebesség esetén a fűtőblokk már nem képes leolvasztani adott idő alatt a szükséges térfogatot, ezért a mérés ismételhetőségének érdekében $34 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right]$ -ben szükséges maximalizálni a vizsgált térfogatáramot.

6.2.3. PLA kilépéskori duzzadása

A kísérlet során PLA alapanyag kerül felhasználására az 1. táblázatban javasolt $200 \text{ [}^\circ\text{C]}$ nyomtatási hőmérsékleten. A nyomtató manuálisan vezérelt Pronterface környezetben, kilépéskor pedig a duzzadás mérése optikai elven történik.

Előkészítés

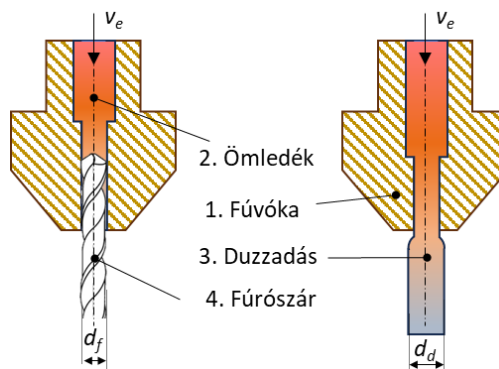
A fúvókák használat előtt ömledékanyag felhasználásával (*cold-pull*) tisztítva lettek, ezáltal a gyártás során keletkezett sorja és anyagmaradványok eltávolításra kerültek.

Mérés

A mérést egy ismert d_f [mm] csigafúró mérésével szükséges kezdeni, a pozícióba állított fúvókába helyezve a 33. ábra bal oldalán látható metszeti vázlat szerint. A rögzített felvételen így a fúró szármérete d_f [mm] egy referencia méretként használható a duzzadás d_d [mm] mértékadó síkjában.

33. ábra: Referencia méret felvételének a vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



A 34. ábrán a csigafúró átmérőjét kitevő pixelek száma a d_f [mm]-hez társítható, így az ömledék duzzadást vizsgáló felvételeken annak mérete meghatározható.

34. ábra: Referencia csigafúró mérete (bal), alacsony előtolási sebesség mellett a duzzadt PLA filament (jobb)

(Forrás: saját szerkesztés)



A mérés menetét az 1. melléklet tartalmazza, ahol mérési folyamat az ismételhetőség érdekében részletesen ismertetésre kerül.

6.2.4. Duzzadás vizsgálata PLA alapanyag esetén

A mérés során tapasztalható, hogy a leghosszabb (kapilláris) furathosszú fúvóka esetén a meghatározott legnagyobb előtolási sebességen a mérés nem végezhető el, mert az extrúder előtoló fogaskereke megcsúszás nélkül nem képes a PLA filamentet adagolni.

35. ábra: Filament duzzadás eltérő extrúder előtolási sebesség esetén

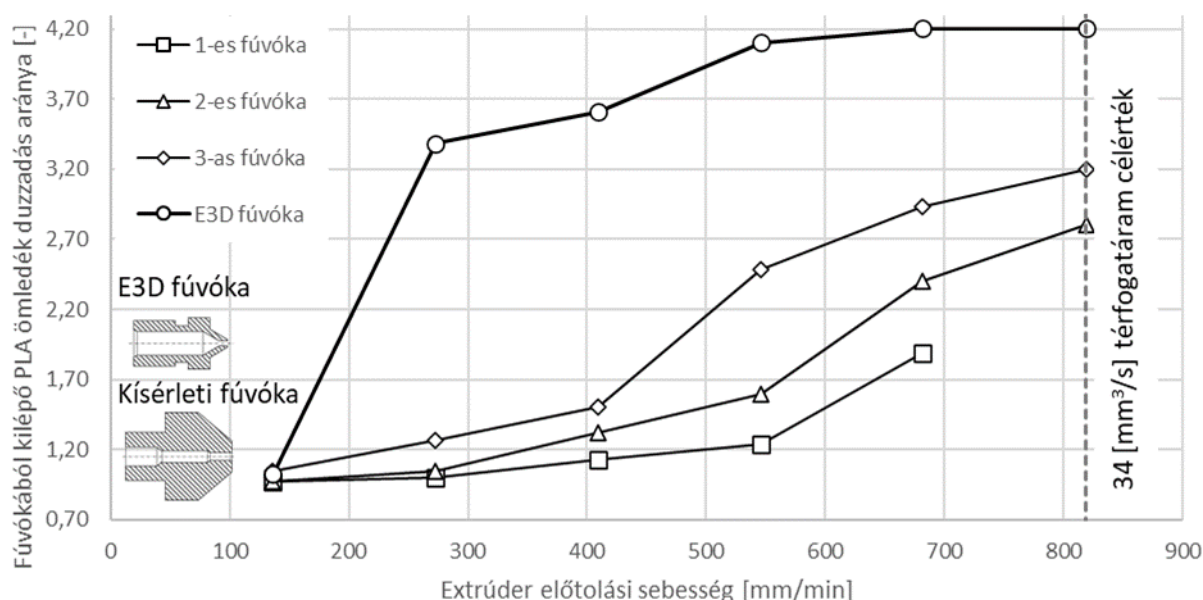
(Forrás: saját szerkesztés)



A 3. táblázatban szereplő fűvókákkal elvégzett kísérlet eredményeit a 36. ábra ismerteti.

36. ábra: PLA filament duzzadása eltérő előtolási sebességek esetén

(Forrás: saját szerkesztés)



A PLA alapanyag esetén a duzzadás az 1-es fűvóka esetén már alacsony előtolási sebesség mellett 10%-ot meghaladó mértékű, a 2-es, 3-as fűvóka esetén 270 [mm/perc] előtolási sebesség felett kezd növekedni. Az E3D fűvóka esetén a dagadás már a kezdeti előtolási sebességnél is jelentős mértékű.

Kilépéskori duzzadás meghatározása

A furatgeometria 6. ábrán látható kilépéskori duzzadás arányának megállapítására a 3.2.3 összeállított kísérlet elvégzésével és kiértékelésével lehetséges.

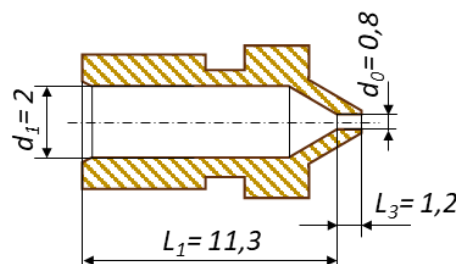
A (9.) egyenletet alapján az áramlási keresztmetszet és a kilépéskori keresztmetszet mértéke a mérési eredmények felhasználásával:

$$B_{SR} = \frac{\text{Kilépéskori keresztmetszet}}{\text{Áramlási keresztmetszet}} = \frac{\frac{d_d^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}} \quad (46.)$$

A 36. ábra tartalmazza különböző előtolási sebesség mellett a PLA kilépéskori duzzadás arányát kísérleti -, valamint az összehasonlítás érdekében egy piacon kapható (E3D) fűvóka esetén. Az E3D fűvóka esetén a furatgeometria jelentősen egyszerűbb, a furatátmenet egylépcsős. A fűvóka főbb geometriai méreteit a 33. ábra tartalmazza.

37. ábra: E3D fűvóka geometria

(Forrás: saját szerkesztés)



Az eredmények alapján a kilépő kapilláris hossz fordítottan arányos a duzzadás mértékével. A referencia fűvókával összehasonlítva piacon kaphatót, kijelenthető, hogy a duzzadás mértékét jelentősen csökkentik a kilépő kapilláris előtt kialakított furatátmenetek.

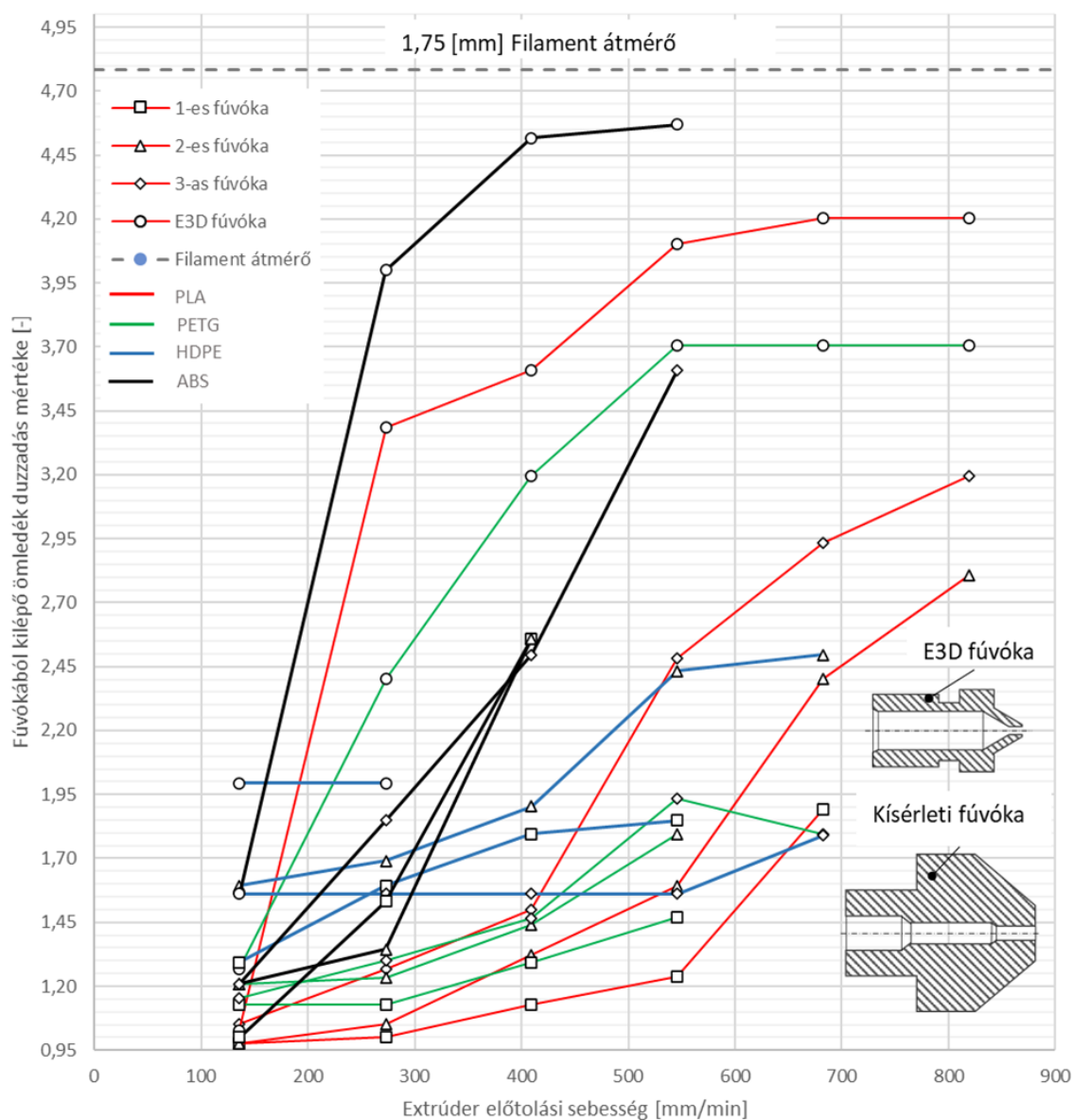
6.3. Kilépéskori duzzadás aránya további alapanyagok esetén

Az előző fejezet vizsgálati módszere szerint a kilépési duzzadás mérhető és további alapanyagok duzzadási aránya is számszerűsíthető.

A vizsgált anyagok (ABS, PETG, HDPE) duzzadás arányai, mértékei a 2. mellékletben találhatóak továbbá a 38. ábra grafikusán összegzi a duzzadás mértékét.

38. ábra: Vizsgált fúvókák ömledékduzzadásának mértéke eltérő anyagok használata esetén, különböző előtolási sebességeken

(Forrás: saját szerkesztés)



A vizsgálat során egyes anyagoknál a hosszabb kapillárisok esetén az előtolómű nem volt képes megfelelően adagolni a szálanyagot, ezért további vizsgálat indokolt a kapilláris nyomásveszteségének meghatározására.

A kísérlet során a legnagyobb duzzadási arány eltérést a leghosszabb kilépő furattal rendelkező 1-es fúvóka és az E3D fúvókával lehetett mérni ABS alapanyag esetén 273 [mm/min] előtolási sebességnél. Az eltérést a két fúvóka között a 39. ábra szemlélteti.

39. ábra: Balra 1-es kísérleti fűvóka, jobbra E3D fűvóka kilépéskori dagadása ABS alapanyag esetén, 273 [mm/ min] előtolási sebesség esetén

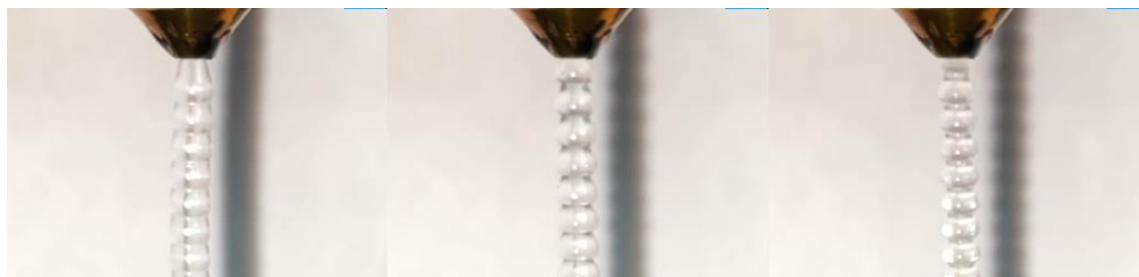
(Forrás: saját szerkesztés)



Az egylépcsős E3D fűvóka esetén 409 [mm/min] előtolási sebességtől kezdődően a 40. ábrán látható ömledék instabilitás alakult ki, amit az előtolási sebesség csökkentésével lehetséges megszüntetni.

40. ábra: Egyszerű furatú E3D fűvóka HDPE ömledéke balra 409 [mm/ min], középen 546 [mm/ min], jobbra 682 [mm/min] előtolási sebességnél

(Forrás: saját szerkesztés)



A számozott kísérleti fűvókákon az ömledék instabilitás nem jelentkezett, egységes térfogatváltozás figyelhető HDPE alapanyag esetén a 41. ábra szerint.

41. ábra: Kísérleti fűvóka kilépéskori ömledék képe HDPE alapanyag esetén

(Forrás: saját szerkesztés)



A duzzadás mértéke a kísérleti fűvókáknak jelentősen kedvezőbb az *E3D* fűvókához képest. Az 1-es kísérleti fűvóka esetén mérhető a legkisebb duzzadás, azonban az előtolási sebesség maximum a magasabb olvadáspontú anyagok esetén 2-es, 3-as fűvókához képest elmarad. A nyomtatási sebességet limitáló nyomásveszteséggel a következő fejezet foglalkozik.

6.4. Kapillárisáramlás nyomásveszteségeinek vizsgálata

Az 1.1.3-as fejezetben a Bagley korrekció alkalmazásával vizsgálható a kísérleti fűvókák kapilláris átmenet-hossz arányának nyomásváltozásra gyakorolt hatása. A fűvókában felépülő maximális nyomás vizsgálatával a kapilláris geometria és a maximális nyomtatási sebesség kapcsolatát lehet modellezni. A fűvóka kapilláris hosszán a nyomásesés műszaki okok miatt közvetve, filament előtolási sebesség maximumához tartozó léptetőmotor nyomatékából kerül meghatározásra.

6.4.1. A nyírási sebesség meghatározása

A maximális előtolási sebesség vizsgálatát a célkitűzésben meghatározott anyagokra szükséges elvégezni a kísérleti és az *E3D* fűvókák használatával.

Az első vizsgálat során meghatározásra kerül az adott fűvóka és anyagpárosítás maximális előtolási sebessége, melyhez társítva a motornyomatékot meghatározható a maximálisan felépülő nyomás.

Az ismert viszkozitás-nyírási sebesség görbéből a második vizsgálat során meghatározható a fűvókán eső nyomás az (1), (4) egyenlet használatával.

4. táblázat: Lépésvesztés nélkül elérhető maximális előtolási sebesség az ajánlott nyomtatási hőmérséklet esetén

(Forrás: saját szerkesztés)

Típus	HDPE	PLA	ABS	PETG
[-]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]
1-es fűvóka	575	705	460	570
2-es fűvóka	700	840	450	630
3-as fűvóka	700	860	500	725
E3D fűvóka	295	910	560	830

A mérés során a vizsgált anyagokhoz a szakirodalomban elérhető hőmérséklet függő viszkozitás-nyírási sebesség függvény alapján az előtolási sebességet 5 [mm/min]

lépésközönként emelve meghatározható az a maximális előtolási sebesség, ahol még az extrúder lépésvesztés nélkül képes előtolni az anyagot.

A méréshez a gyártó által ajánlott nyomtatási hőmérsékletet került felhasználásra (HDPE 230 [°C]; PLA 190 [°C]; ABS 230 [°C]; PETG 220 [°C]). A mérés eredményét az 4. táblázat tartalmazza.

A nyírási sebességhez a (2) egyenlet alapján a kilépő térfogatáramot szükséges meghatározni:

$$\dot{V} = \frac{d_f^2 \pi}{4} \cdot \bar{v}_{ref} \quad (47.)$$

A számítást elvégezve az 4.táblázat eredményei alapján, a kapott térfogatáramot adott fűvóka, anyag esetén a 5.táblázat tartalmazza.

5. táblázat: Kilépő térfogatáram

(Forrás: saját szerkesztés)

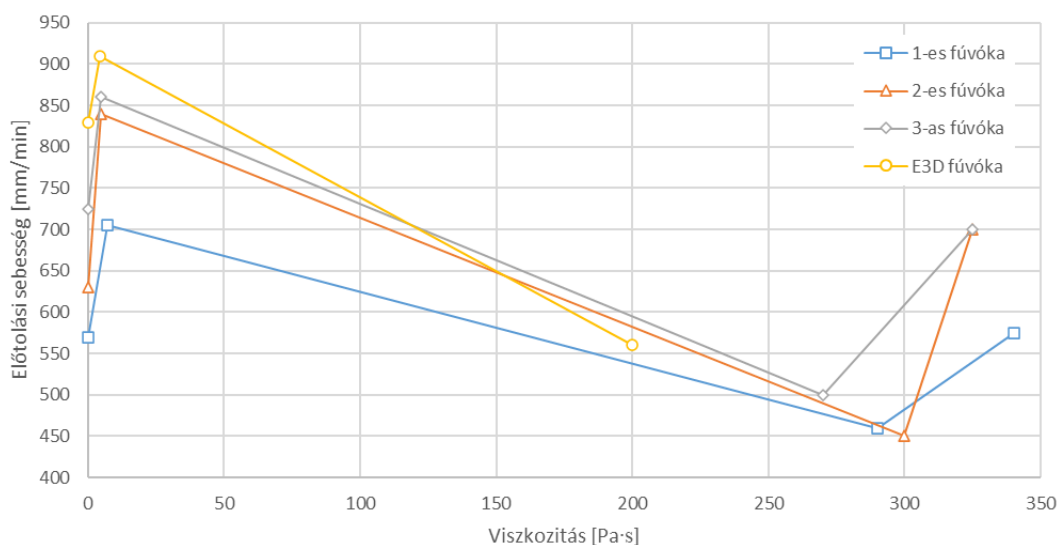
Típus	HDPE	PLA	ABS	PETG
[-]	[mm ³ /s]	[mm ³ /s]	[mm ³ /s]	[mm ³ /s]
1-es fűvóka	23,05	28,26	18,44	22,85
2-es fűvóka	28,06	33,67	18,04	25,25
3-as fűvóka	28,06	34,47	20,04	29,06
E3D fűvóka	11,83	36,48	22,45	33,27

A nyírási sebesség a (3) egyenlet alapján meghatározható a fűvókák kapilláris átmérőire, melynek eredményét a 15.táblázat tartalmazza a mellékletekben.

Az 1. táblázatban található és az ajánlott nyomtatási hőmérséklet ismeretében leolvasható az anyagok viszkozitása adott nyírási sebesség mellett az 5. mellékletben található ábrákról. A 42. ábra ismerteti, hogy milyen viszkozitású anyag extrudálható adott előtolási sebességen adott fűvóka esetén

42. ábra: Kilépő kapillárison extrudálható anyagok viszkozitása adott előtolási sebességen
balról: PETG, PLA, ABS, HDPE

(Forrás: saját szerkesztés)



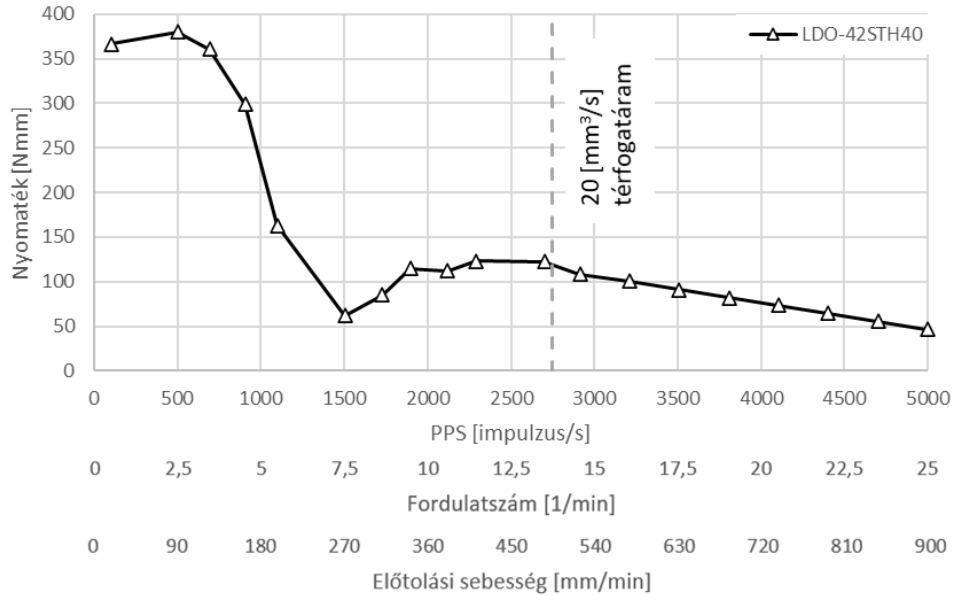
A kilépő kapillárison a magas előtolási sebességből következő nyírási sebesség esetén a PETG alapanyag viszkozitása szakirodalmak alapján a nullához konvergál.

6.4.2. Extrúder nyomatékterhelés meghatározása

Az extrúder léptetőmotor karakterisztika ismeretében meghatározható az adott előtolási sebességhez tartozó maximális motornyomaték. Az előzőek ismeretében a fűvókában áramló ömledék nyomása számítható abban az esetben, ha mértéke eléri a motor által kifejtett nyomatékot, azaz lépésvesztést idéz elő. A 43. ábra a kísérlethez használt LDO-STH40 léptetőmotor nyomatékgörbáját tartalmazza (Brainkart.com, n.a).

43. ábra: LDO-STH40 nyomategőgörbéje teljes lépések esetén

(Forrás: Brainkart.com, n.a; LDO Motors, 2021)



Az előtolási sebességhez tartozó nyomaték számításához az 14. táblázat tartalmazza a léptetőmotor műszaki adatait, melyből a lépésszög ismeretével meghatározható a léptetőmotor fordulatszáma:

$$n_{\text{léptetőmotor}} = \frac{PPS}{\frac{360^\circ}{\omega_{\text{lépés}}}} \quad (48.)$$

Ahol $PPS [1/s]$ a vezérlő által adott impulzusok száma másodpercenként, $\omega_{\text{lépés}} [^\circ]$ a léptetőmotor lépésszöge. Az előtolási sebességhez tartozó fordulatszám:

$$n_{ref} = \frac{1}{\frac{2\pi \cdot \frac{d_e}{2}}{\bar{v}_{ref}}} \quad (49.)$$

ahol $d_e [mm]$ az extrúder előtoló kerekének átmérője, $\bar{v}_{ref} [\frac{mm}{min}]$ a választott előtolási sebesség.

A 43. ábráról a fordulatszám ismeretében leolvasható az extrúder léptetőmotor maximális nyomatéka, a leolvasott eredményeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: Extrúder léptetőmotor maximális fordulatszámához tartozó nyomaték lépésvesztés határán

(Forrás: saját szerkesztés)

Típus	HDPE		PLA		ABS		PETG	
[-]	[1/min]	[Nmm]	[1/min]	[Nmm]	[1/min]	[Nmm]	[1/min]	[Nmm]
1-es fúvóka	16,64	96,0	20,40	73,0	13,31	121,0	16,49	96,4
2-es fúvóka	20,26	74,8	24,31	48,9	13,02	121,0	18,23	85,0
3-as fúvóka	20,26	74,8	24,89	44,2	14,47	108,0	20,98	69,7
E3D fúvóka	8,54	82,0	26,33	42,8	16,21	97,5	24,02	49,3

6.4.3. A fúvókában felépülő maximális nyomásvesztés

A legnagyobb mérhető nyomás a fúvókában akkor jöhet létre, amikor az extrúder a maximális nyomatékát adja le lépésvesztés nélkül, melynek értékét anyaghoz és fúvókához párosítva a 6. táblázat tartalmazza.

A fúvókában maximálisan felépíthető nyomás:

$$P_{max} = \frac{M_{ref}}{\frac{d_f^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot d_e + \frac{1}{2} \cdot d_f\right)} = \frac{350 [Nmm]}{\frac{1,75 [mm]^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 11 [mm] + \frac{1}{2} \cdot 1,75 [mm]\right)} = 22,8 MPa \quad (50.)$$

Ahol M_{ref} [Nmm] a fordulatszámhoz tartozó nyomaték.

(49), (50) felhasználásával a felépülő nyomás számítható, melynek eredményeit a 7.táblázat tartalmazza.

7. táblázat: Fúvókában maximálisan felépülő nyomás

(Forrás: saját szerkesztés)

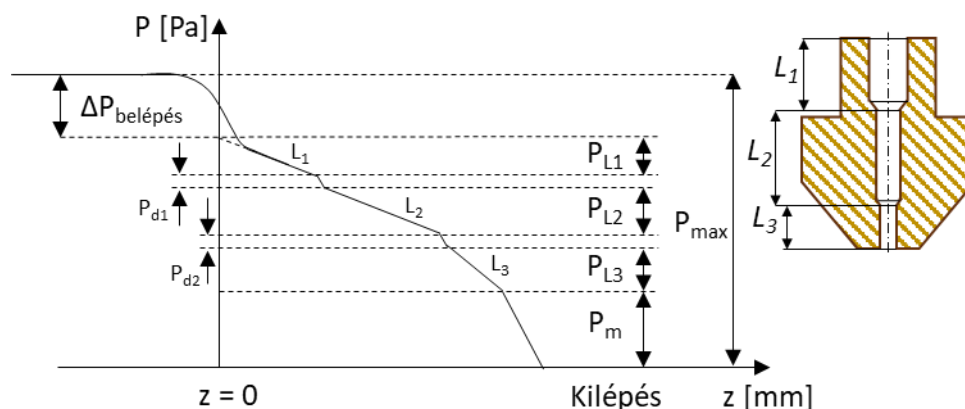
Típus	HDPE	PLA	ABS	PETG
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1-es fúvóka	6,39	4,89	7,95	6,39
2-es fúvóka	4,95	3,26	8,02	5,80
3-as fúvóka	4,95	3,06	7,17	4,69
E3D fúvóka	5,41	2,48	6,65	3,39

6.4.4. Nyomásesés meghatározása

A vizsgált alapanyag viszkozitásának ismeretében, továbbá (1), (5) alapján számítható a kapillárison és a kapilláris átmeneteken a nyomásesés, ezt a 8. táblázat tartalmazza. A 44. ábrán a kapilláris előtt és a kapilláris kilépési pontjáig látható a nyomás változás vázlata, mely ábrázolja az átmentek és a kapilláris hosszán a történő nyomásváltozásokat.

44. ábra: Nyomás veszteség vázlata a kapilláris hosszon

(Forrás: saját szerkesztés)



8. táblázat: Számított nyomásvesztés adott kapillárison, kapilláris átmeneten a vizsgált alapanyagok esetén

(Forrás: saját szerkesztés)

Anyag	Típus	P_{L1}	P_{L2}	P_{L3}	P_{d1}	P_{d2}	P_m
[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
PLA	1-es fúvóka	0,071	0,100	0,160	0,001	0,002	4,556
	2-es fúvóka	0,075	0,134	0,107	0,001	0,003	2,940
	3-as fúvóka	0,080	0,207	0,045	0,001	0,003	2,724
	E3D	-	-	0,019	-	-	2,461
HDPE	1-es fúvóka	0,498	0,487	3,669	0,009	0,015	1,712
	2-es fúvóka	0,516	0,730	3,210	0,009	0,017	0,468
	3-as fúvóka	0,520	1,121	1,200	0,009	0,018	2,082
	E3D	-	-	0,494	-	-	4,916
ABS	1-es fúvóka	0,370	0,572	4,256	0,007	0,017	2,728
	2-es fúvóka	0,366	0,804	3,445	0,007	0,019	3,379
	3-as fúvóka	0,372	1,172	1,400	0,007	0,018	4,201
	E3D	-	-	0,536	-	-	6,114
PETG	1-es fúvóka	0,011	0,000128	0,001	0	0	6,378
	2-es fúvóka	0,005	0,000187	0,001	0	0	5,794
	3-as fúvóka	0,002	0,000332	0,001	0	0	4,687
	E3D	-	-	0,000	-	-	3,390

Ahol P_{Li} [MPa] az L_i [mm]-es kapilláris nyomás vesztesége,

P_{dj} [MPa] az d_j [mm]-es kapilláris nyomás vesztesége,

P_m [MPa] az áramlási csatorna veszteségei.

A fúvóka kapilláris átmeneteinél a kúpos kialakításon eső nyomás mértéke csekély a kapillárison eső nyomásához képest. A kilépő kapilláris veszteségek esetén a legnagyobb értéket a leghosszabb furatú fúvóka esetén lehet számítani.

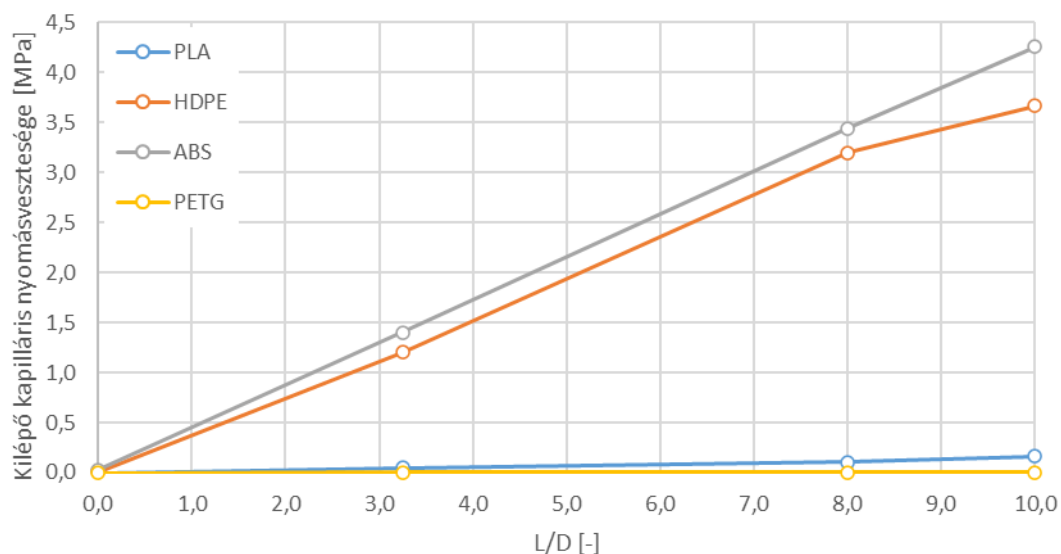
Az eredményeket a (6). egyenletbe behelyettesítve a Bagley-korrektció PLA esetén:

$$P_0 = \frac{0,045 \text{ [MPa]} \cdot 8 \text{ [mm]} - 0,16 \text{ [MPa]} \cdot 2,6 \text{ [mm]}}{8 \text{ [mm]} - 2,6 \text{ [mm]}} = -0,01 \text{ [MPa]} \quad (51.)$$

Az áramlási veszteséget leginkább befolyásoló tényező a számítás eredményei és a mérési eredmények esetén is a vizsgált fúvókák kilépési kapilláris hossza, melyet a 45. ábra foglal össze különböző anyagok esetén. A furatátmenetek a kúpos kialakítás következtében elhanyagolható nyomás veszteséget okoznak.

45. ábra: Nyomásveszteségek a különböző kapilláris-hossz aránypárok esetén

(Forrás: saját szerkesztés)



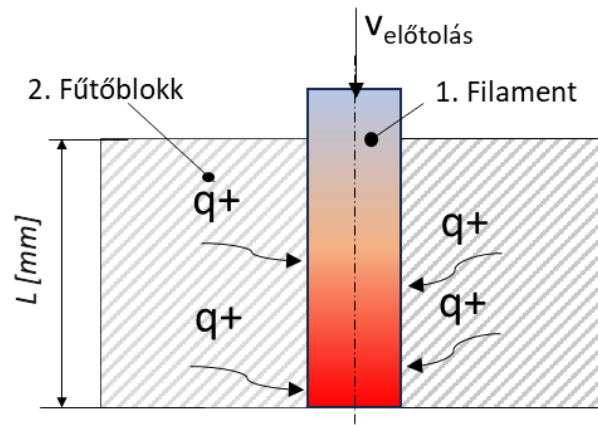
6.5. Ömledékképződés termikus vizsgálata

Az ömledék adagolásnak a feltétele, hogy a filament teljes keresztmetszetében ömledékállapotba kerüljön a fúvókába lépés előtt. A feltétel teljesüléséhez a filament szál a fűtőblokkban az ömledék képződéshez szükséges időt el kell töltenie.

A 45. ábra a filamenthevítés termikus folyamatait mutatja be. A filament palástja a fűtőblokkba beérve érintkezik a fűtőblokk szabályozott hőmérsékletével és a hevítési folyamat megkezdődik, ami eltart egészen a fűtőblokk kilépési pontjáig.

46. ábra: Filament hevítése a fűtőblokkban

(Forrás: saját szerkesztés)



A számítás során a fűtőblokkban eltöltött idő az előtolási sebesség alapján határozható meg. A filament kezdeti hőmérséklete $T_b=20\text{ [}^\circ\text{C]}$ az állandó környezeti hőmérséklet $T_k=20\text{ [}^\circ\text{C]}$.

A hőátadási tényező értékét a polimer ömledék és a fűtőblokk áramlási csatornája között növeli az ömledék nyomása, a becsült értéke szakirodalom alapján $10000\text{ [W/m}^2\text{K]}$ (Kurganov, 2011).

A számítások egyszerűsítése érdekében az alapanyag szilárd-ömledék fázisváltozása elhanyagolásra kerül. További feltételezés, hogy a hőátadás a filament és a fűtőblokk között izoterm, tehát a fűtőblokk állandó hőmérsékletű az előtolás során.

6.5.1. Hőátadás közelítő vizsgálata

A filament szál hőmérsékletének időbeli változásának meghatározásához egyterminusú közelítést (*one-term approximation*) lehet alkalmazni, amennyiben a Fourier szám legalább 0,2 [-]. A vizsgált térfogat egy $L\text{ [mm]}$ hosszúságú, d_f átmérőjű [mm] henger, melynek keresztmetszetében szükséges vizsgálni a hőmérsékleteloszlást. A szükséges előtolási sebesség esetén a filament fűtőblokkban eltöltött ideje függ a fűtőblokk hosszától, jellemző fűtőblokk hossz $L = 12\text{ [mm]}$.

$$t = \frac{L}{\bar{v}_e} = \frac{12\text{ [mm]}}{1100\text{ [mm/min]}} = 0,655\text{ s}$$

(52.)

A Fourier szám, maximum előtolási sebességnél a legnagyobb termikus diffúzióval rendelkező alapanyag (ABS) esetén:

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{\frac{d_f^2}{2}} = \frac{0,2 \left[\frac{mm^2}{s} \right] \cdot 0,655[s]}{\frac{1,75 [mm]^2}{2}} = 0,085$$

(53.)

ahol $\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$ termikus diffúzió, $t [s]$ a filament fűtőblokkban eltöltött ideje.

A szükséges feltétel a termikus diffúzió alacsony értéke miatt a legtöbb anyag esetén nem teljesül, ezért egyterminusú megoldás nem alkalmazható. A filament hőmérsékleteloszlásának vizsgálatához ezért numerikus módszert szükséges alkalmazni.

6.6. Hőátadás numerikus vizsgálata

A filament hőátadás numerikus vizsgálata során a filament maghőmérsékletét időbeli változását lehet vizsgálni. A vizsgálat során azt az időpillanatot szükséges megállapítani, amikor a vizsgált anyag teljes keresztmetszetében eléri az ömledékképződés hőmérsékletét, mely PLA esetén $160 [^{\circ}C]$, ABS esetén $190 [^{\circ}C]$.

6.6.1. Peremfeltételek

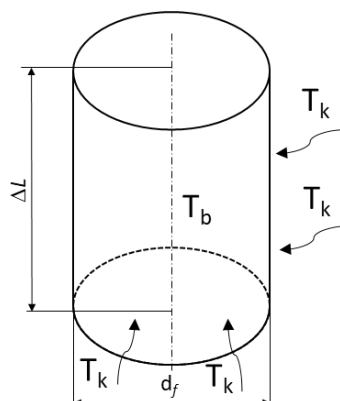
A vizsgált filament hengerpalástja állandó hőmérsékletű környezettel érintkezik (PLA esetén $190 [^{\circ}C]$; ABS esetén $230 [^{\circ}C]$). Az állandó hőmérsékletű felület az ideális fűtőblokkot helyettesíti, melynek a nyomtatás során nem változik a hőmérséklete.

Az idő függvényében meghatározható a keresztmetszet hőmérséklet eloszlása, ezáltal meghatározható az a szükséges idő, ami alatt a filament teljes keresztmetszetében eléri az olvadás hőmérsékletét.

A filament tengelyirányú hővezetését a henger homlokfelületére illesztett állandó hőmérsékletű környezet helyettesíti, így vizsgálható a filament tengelyirányú hővezetésének hatása a keresztmetszet hőmérséklet eloszlásra.

47. ábra: Filament hőátadás peremfeltételei

(Forrás: saját szerkesztés)



Modellezési megfontolásból a különböző előtolási sebességeket a vizsgált hengeres test hosszának változtatásával lehet megvalósítani, a vizsgált modellek hossza: $\Delta L = 10; 20; 30 \text{ [mm]}$.

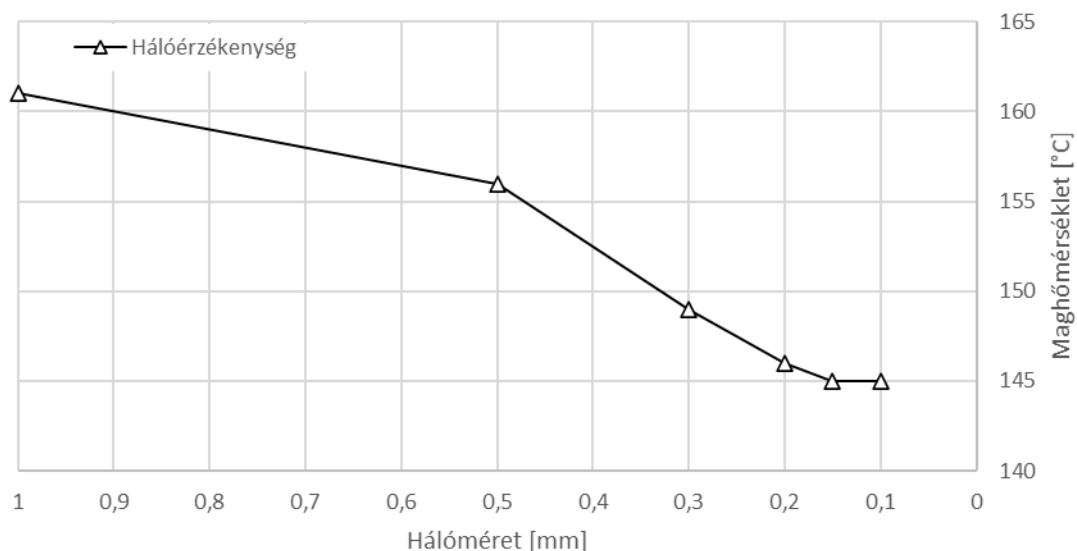
A szükséges szimulációk számának csökkentése érdekében két anyagon elegendő futtatni a szimulációt, mivel a polimerek hővezetési tényezője közel azonosak (1. táblázat). A PLA melynek a legalacsonyabb ajánlott nyomtatási hőmérséklete $190 \text{ [}^\circ\text{C]}$ és ABS melynek a legmagasabb $230 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

6.6.2. Hálófüggetlenségi vizsgálat

A hálófüggetlenségi vizsgálat során a hálóméret finomításával meghatározható az a felbontás, amelynél a filament maghőmérsékletének értéke konvergál, tehát nem változik a háló további finomításával.

A filament maghőmérséklet vizsgálata 1 [s] hevítési idő elteltével történik. A tetraéderes, kvadratikus háló 1 [mm] és $0,1 \text{ [mm]}$ közötti méreteken kerül alkalmazásra. A vizsgálat eredményét a 48. ábra ismerteti.

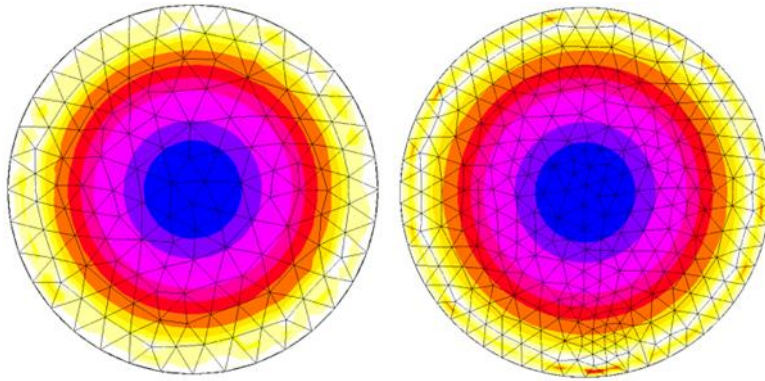
48. ábra: Maghőmérséklet változása 1 [s] hevítési idő után a hálófelbontás függvényében
(Forrás: saját szerkesztés)



A legkisebb, $0,1 \text{ [mm]}$ -es és a $0,15 \text{ [mm]}$ -es vizsgált hálóméret esetében a maghőmérséklet megegyezett, azonban a hőeloszlás radiális irányban fluktuációt mutat, hibás eredmények tapasztalhatóak az 49. ábra szerint.

49. ábra: Hőeloszlás bal 0,15 [mm]-es hálóméret, jobb 0,1 [mm]

(Forrás: saját szerkesztés)



Az optimális hálóméret a vizsgált környezetben a 0,15 [mm], a hőeloszlás-pontosságának javítása érdekében szükséges az időbeli felbontást növelni 0,1 [s]-ről 0,05 [s]-ra.

6.6.3. Filament maghőmérsékletének vizsgálata

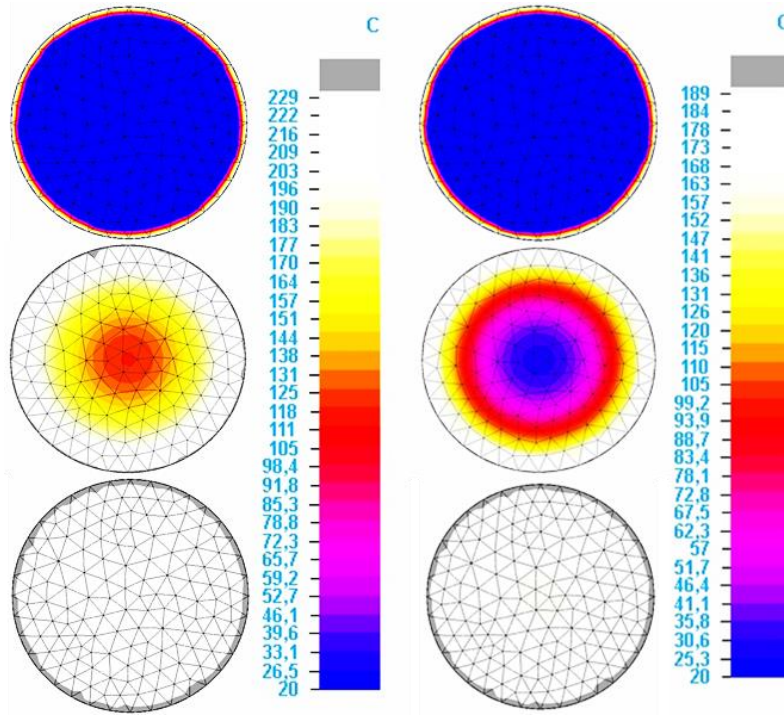
A keresett időpillanatban két elkülönülő rész figyelhető meg a filament keresztmetszetében. A határréteg a külső felületen, melynek hőmérséklete megegyezik a fűtőblokk hőmérsékletével, ami időben már nem változik, csak a határréteg mérete növekszik. A másik rész a határrétegtől elkülönülő (mag) keresztmetszet azon része, melynek hőmérséklete még nem érte el az ömledékképződési hőmérsékletet.

PLA alapanyag esetén a teljes keresztmetszet 0,63 [s] után éri el az ömledékképződés hőmérsékletet, amit az 50. ábra szemléltet. ABS alapanyag esetén a teljes keresztmetszet ömledékképződése 1,75 [s] után megy végbe.

A szimuláció eredménye az ajánlott nyomtatási hőmérsékleteken a filament fűtőblokkban eltöltendő ideje, PLA esetén 0,63 [s] ABS esetén 1,75 [s]. Az időeredmények felhasználásával meghatározható az adott előtolási sebességnek megfelelő fűtőblokk-hossz.

50. ábra: Balra ABS alapanyag: felül 1. időpillanat után, középen 0,8125 [s] után, alul 1,75 [s] után, jobbra PLA alapanyag: felül 1. időpillanat után, középen 0,3125 [s], alul 0,63 [s] után

(Forrás: saját szerkesztés)



$L = 12 \text{ [mm]}$ hosszúságú fűtőblokkhoz tartozó elméleti maximális előtolási sebesség PLA esetén:

$$\bar{v}_e = \frac{L}{t} = \frac{12 \text{ [mm]}}{0,63 \text{ [s]}} = 1140 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (54.)$$

ABS esetén:

$$\bar{v}_e = \frac{L}{t} = \frac{12 \text{ [mm]}}{1,75 \text{ [s]}} = 411 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (55.)$$

A 4. táblázatban megjelenített maximális előtolási sebesség PLA alapanyag esetén elmarad az elméletileg elérhető maximális előtolási sebességtől, mely magyarázható a 8. táblázat fűvóka áramlási veszteségeivel.

ABS alapanyag esetén a 4. táblázat alapján a mért előtolási sebességek nagyobbak, mint az elméletileg elérhető maximális előtolási sebesség az (55) egyenlet alapján. A teljes keresztmetszet még nem érte el az ömledékképződési hőmérsékletet a fűtőblokk hosszán, azonban az ömledékképződés a fűvóka teljes hosszán is folytatódhat.

6.7. A fűtőblokk méretezése

Az 5.6.5, 5.6.6 fejezetben az ömledékképződéséhez szükséges idő került meghatározásra. A filament fűtőblokkban eltöltött ideje meghatározza a maximális előtolási sebességet, a kívánt előtolási sebesség ismeretében meghatározható a szükséges fűtőblokk magasság (45):

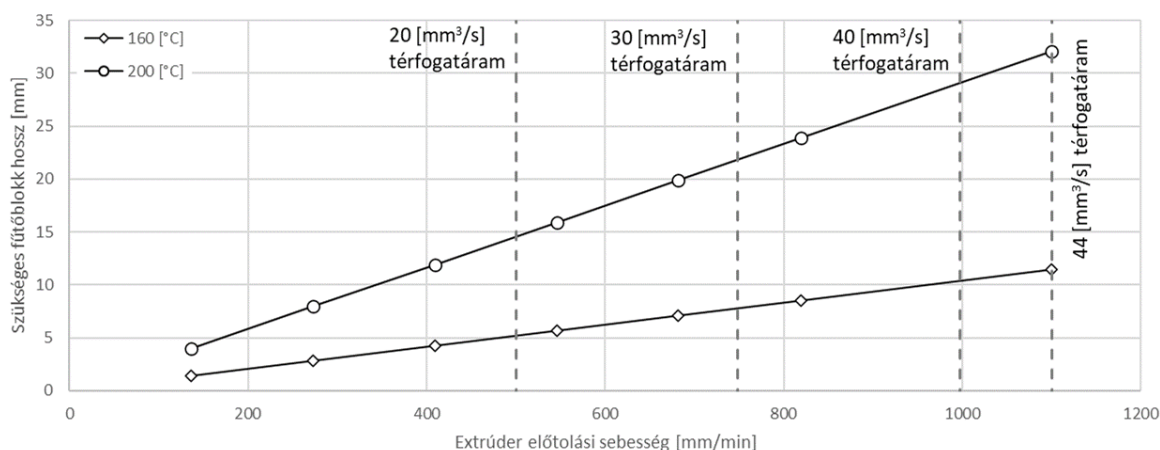
$$L = \bar{v}_e \cdot t \quad (56.)$$

ahol t [s] a filament ömledékképződéséhez szükséges idő.

Az 55. ábra PLA és ABS alapanyag ömledékképződési hőmérsékletén ábrázolja a szükséges fűtőblokk magasságát a filament előtolási sebesség függvényében a szimuláció eredményeit felhasználva

51. ábra: Szükséges fűtőblokk hossz az előtolási sebesség függvényében

(Forrás: saját szerkesztés)



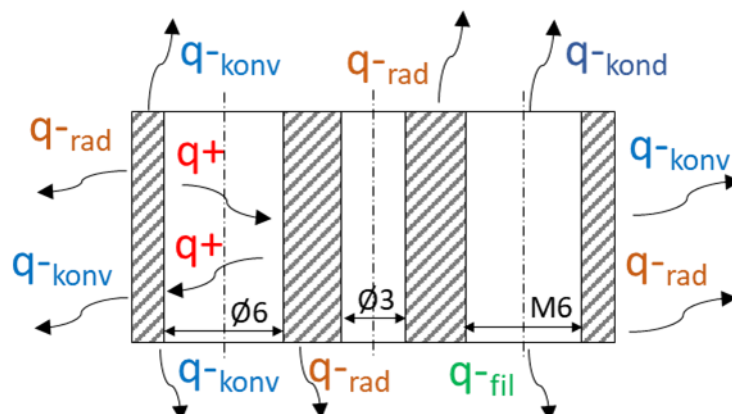
Abban az esetben, ha az előtolási sebesség vagy a fűtőblokk hossza miatt a filament maghőmérséklete nem éri el az ömledékképződési hőmérsékletet, akkor az extrúder a szilárd filamentet nem képes a fűvókán extrudálni.

6.8. Fűtőblokk anyagválasztás

A fűtőblokk funkciója a hőcsere a fűtőpatron, a filamentszálat tartalmazó hőelválasztó és a hőmérsékletmérő szenzor között. A folyamat során időben változik a vizsgált rendszer hőmérséklete, így a vizsgálat során az optimális fűtőblokk anyag meghatározása tranziens szimulációval valósítható meg a nyomtatási körülmények során létrejövő parazita hőáramok(hőelvonás) figyelembevétele mellett, melyeket a tárgyhűtő ventilátor és a nyomtató fej mozgásából létrejövő relatív légáram okoz.

52. ábra: Fűtőblokk termikus vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



A filament leolvasztás funkciónak a teljesítése érdekében a lehető legjobb hőelvezetéssel rendelkező anyagot szükséges választani, hogy a fűtőblokk hőmérséklet változását a hőmérsékletszabályozás a lehető leghamarabb le tudja követni. A környezeti hatások következtében létrejövő hőáram távozást is figyelembe kell venni az optimális fűtőblokk anyag kiválasztásához.

9. táblázat: Fűtőblokkanyagok termikus jellemzői

(Forrás: saját szerkesztés)

Jellemző	[-]	Sárgaréz	Réz	Aluminium 6061-T6	Rozsdamentes acél	Titán
Olvadáspont	[°C]	940	1085	660	1500	1670
Anyagsűrűség	[kg/m ³]	8470	8940	2712	7750	4511
Fajlagos hőkapacitás	[J/kg·K]	377	385	920	502	519
Hővezetési tényező	[kW/(m·K)]	0,116	0,391	0,18	0,017	0,016

6.8.1. Fűtőblokk geometria

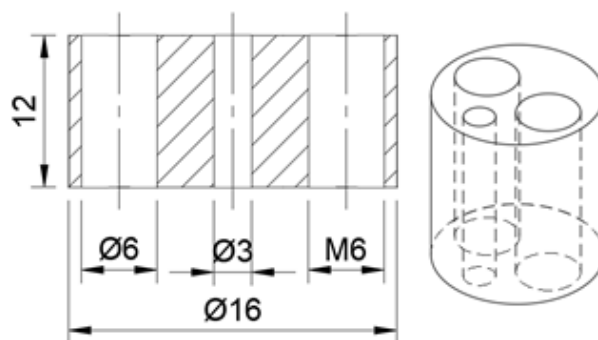
A szimuláció során a fűtőblokk keresztmetszetének hőmérsékletváltozását szükséges vizsgálni a hűtőventilátorok bekapcsolását követően, mely a fűtőblokk felületén kényszerkonvekciót hoz létre. A vizsgálat alapján megállapítható, melyik anyag esetén a legstabilabb a fűtőblokk hőmérséklete.

A modell az 53. ábra szerinti furatokat tartalmazza, elhelyezésük háromszög alakban történik a lehető legkisebb fűtőblokk méret elérésének érdekében.

Az M6-os furaton keresztül hővezetés révén távozik a hőenergia az extrúder irányába hőelválasztón keresztül, melynek feladata a filament megvezetése és a fűtőblokk pozícióban tartása. Anyaga rozsdamentes acél az alacsony hővezetési tényezője miatt.

53. ábra: Vizsgált fűtőblokk vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



6.8.2. Peremfeltételek

A vizsgálat során az 5.8.1-es fejezetben ismertetett fűtőblokk hevítése (q_+) a Ø6 [mm]-es átmenő furat palástján történik, így helyettesítve a fűtőelemből érkező hőmennyiséget. A szimuláció során a hevítés teljesítménye 40 [W] a kezdeti hőmérséklet 190 [°C].

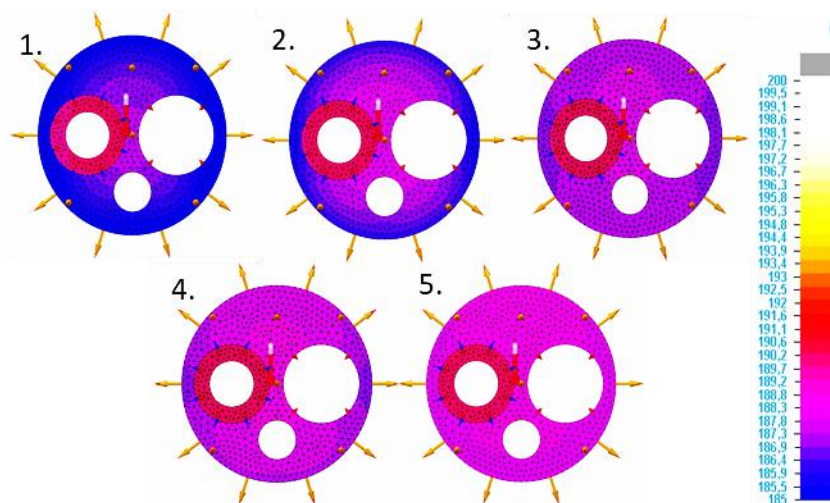
A fűtőblokk termikus vázlatát az 52. ábra szemlélteti. A rendszerből távozó hőáram a fűtőblokk felületén kényszerkonvekció (q_{konv}), mivel a tárgyhűtő és az extrudert hűtő ventilátorok a levegőt áramlásra kényszerítik, valamint a hőelválasztó felé hőkondukción (q_{kond}). A kényszerkonvekció a 20 [°C]-os környezet felé 100 [W/m²K]. További energia távozik a rendszerből hősugárzás (q_{rad}) révén a 20 [°C]-os környezet és a 60 [°C]-os tárgyasztal felé.

A szimuláció során kvadratikus háló alkalmazása történt 0,01 [s]-os időlépésekkel, egészen a 0,5 [s]-os vizsgált időpillanatig.

A kezdeti, majd végső időpillanatokban a hőmérséklet szenzor által mérhető hőmérsékletet és a hőelválasztó hőmérsékletét szükséges összehasonlítani. A vizsgált fűtőblokkok 0,5 [s] utáni hőmérséklet eloszlását az 54. ábra szemlélteti. A vizsgált hőmérséklet tartomány minimuma 185 [°C].

54. ábra: 1. titán, 2. rozsdamentes acél, 3. alumínium, 4. sárgaréz, 5. réz hőmérséklet eloszlása 0,5 [s] után a hővezetési tényező szerint növekvő sorrendbe rendezve

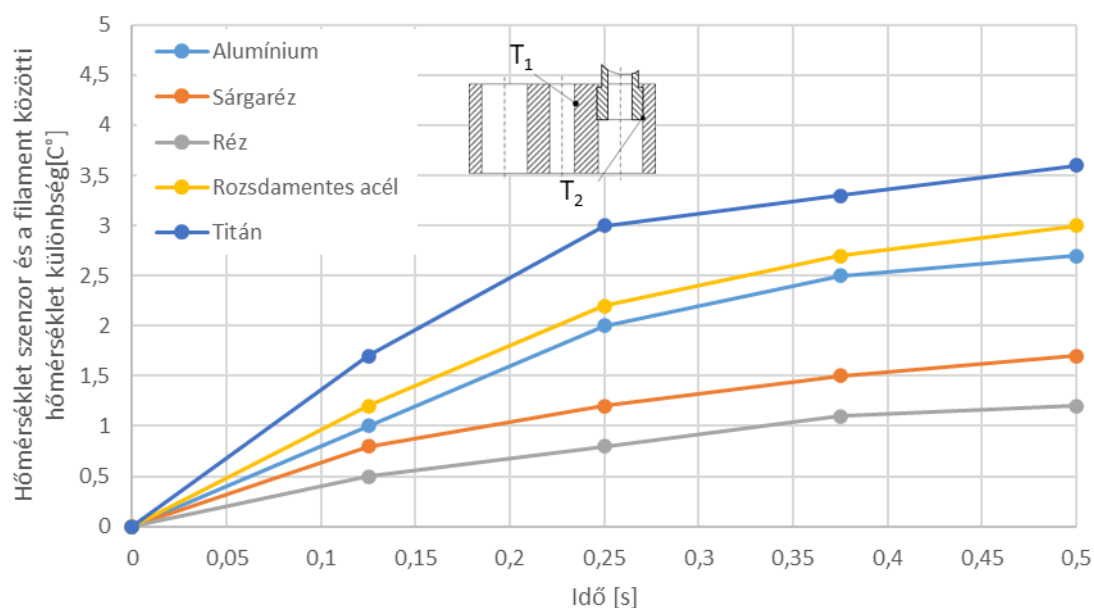
(Forrás: saját szerkesztés)



A rozsdamentes acél és a titán fűtőblokkok a vizsgált hőmérséklet-tartomány alá hűltek le, így a fűtőblokk keresztmetszetének a várható hőmérséklete kevesebb mint $185 [^{\circ}\text{C}]$, ezért az 55. ábrán látható hőmérséklet különbségek titán és rozsdamentes acél esetén a valóságban még nagyobb.

55. ábra: Fűtőblokk hőmérséklet változása

(Forrás: saját szerkesztés)



Az optimális fűtőblokkanyag, ahol a legkisebb filament hőmérsékletváltozás jön létre az a réz, melyet a 55. ábra szemléltet. Az anyagválasztásnál azonban figyelembe kell venni, hogy a réz rendelkezik a legjobb hővezetési tényezővel, mely a hőelválasztás szempontjából nem előnyös, a hőelválasztón a maximális hőmérséklet nagyobb lehet egy magas hővezetéssel rendelkező fűtőblokk esetén.

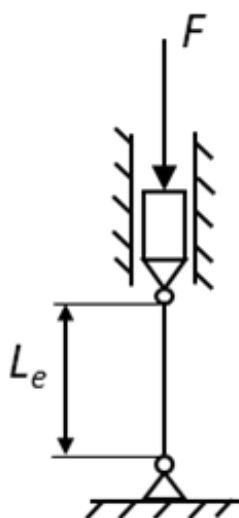
6.9. Filamentszál stabilitásvesztése

A filamentszál igénybevétele az előtolás következtében nyomás, ami hatására a filament szál kihajolhat, és a hőelválasztó elem furat falával érintkezhet. Ez megnöveli az előtolás erőszükségletet, szélsőséges esetben a kihajolt filament dugulást is okozhat.

A filament szál kihajlási modelljét a 56. ábra szemlélteti. A szakirodalom szerint a kihajlási félhullámhossz $\beta=1$ [-] (Greminger, 2022).

56. ábra: Filament kihajlás modellje

(Forrás: saját szerkesztés)



Jellemző előtolási hossz az extrúder kerék és a fűtőblokk között a jelenleg kapható FDM/FFF nyomtatók esetén meghaladja a 30 [mm]-t, azonban a léptetőmotor és a fűtőblokk geometriája megengedi, hogy akár 20 [mm]-re csökkenjen ez a távolság.

Johnson vagy Euler féle formula használatát a kritikus törőfeszültség számításához a karcsúsági tényező értéke határozza meg. Johnson egyenlete akkor alkalmazható, ha a karcsúsági tényező $1 < \lambda < \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E}{S_y}}$, ahol E [GPa] a rugalmassági modulus, S_y [MPa] a folyáshatár, egyéb esetben a Euler- formula használata szükséges.

A számításhoz szükséges mechanikai tulajdonságokat és a Johnson féle karcsúsági tényező maximális értékét a 10.táblázat tartalmazza a vizsgált anyagok esetén.

10. táblázat: Vizsgált filamentek tulajdonságai

(Forrás: Matweb adatlapok^{27;28;29;30}, n.a, Prusa Polymers^{31;32;33;34}, 2022)

Jellemző	[-]	HDPE	PLA	ABS	PETG
Rugalmassági modulus	[GPa]	0,995	5,92	2,04	3,03
Folyáshatár	[MPa]	31,3	85	72,7	70,5
Johnson féle karcsúsági tényező	[-]	25	37	23,5	29

Előtolási minimum hossz az extrúder és a fűtőblokk között 20 [mm], a karcsúsági tényező értéke ebben az esetben:

$$\lambda = \frac{L_e \cdot \beta}{\sqrt{\frac{I_x}{\frac{d_f^2 \cdot \pi}{4}}}} = \frac{20 [\text{mm}] \cdot 1}{\sqrt{\frac{0,46 [\text{mm}^4]}{\frac{1,75 [\text{mm}]^2 \cdot \pi}{4}}} = 45,7 [-] \quad (57.)$$

ahol $L_e [\text{mm}]$ a vizsgált filament hossz, $I_x [\text{mm}^4]$ filament másodrendű nyomatéka.

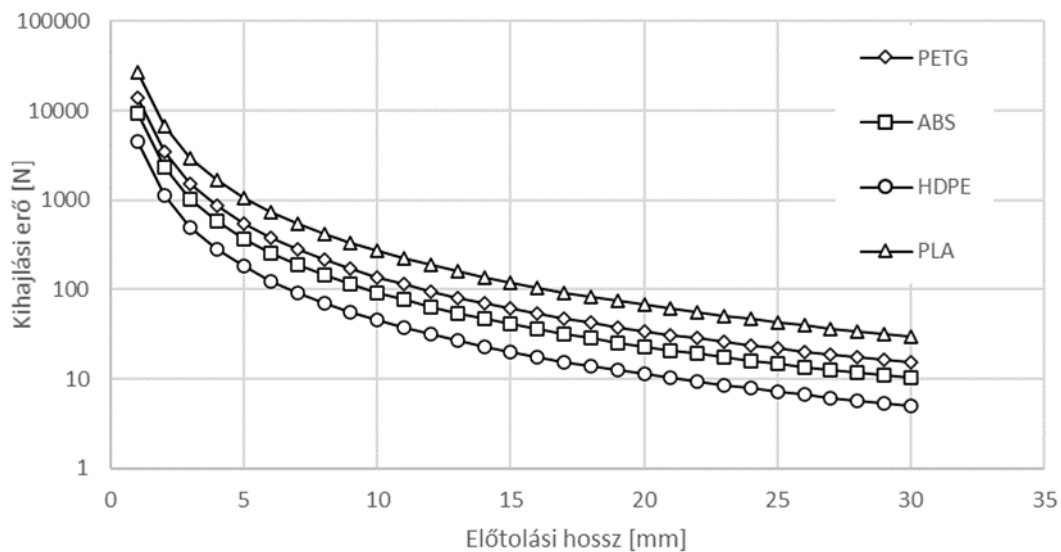
Az eredmények alapján a törőfeszültség számításához az Euler formulát szükséges használni, melynek eredményeit az 57. ábra szemlélteti.

Euler féle törőfeszültség:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{d_f^2 \cdot \pi}{4}}{\lambda^2} \quad (58.)$$

57. ábra: Kihajlászó az előtolási hossz függvényében

(Forrás: saját szerkesztés)

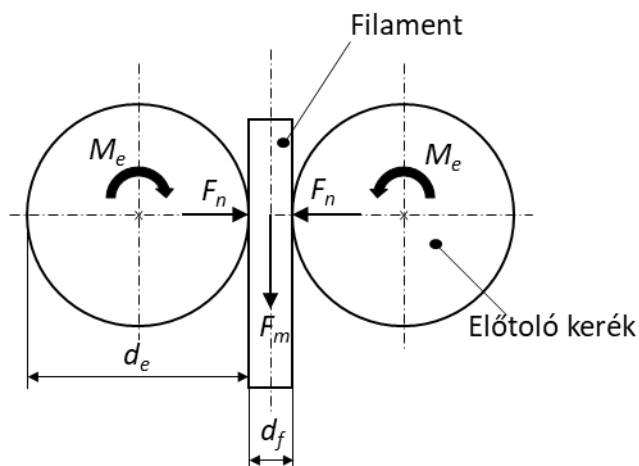


Az előtolási erő értéke az extrúder léptetőmotor nyomtatékából adott fordulatszámon, az előtoló kerék átmérőjéből és a filament szál átmérőjéből számítható:

$$F_m = \frac{M_e}{\frac{d_e}{2} + \frac{d_f}{2}} \quad (59.)$$

58. ábra: Előtolómű vázlata

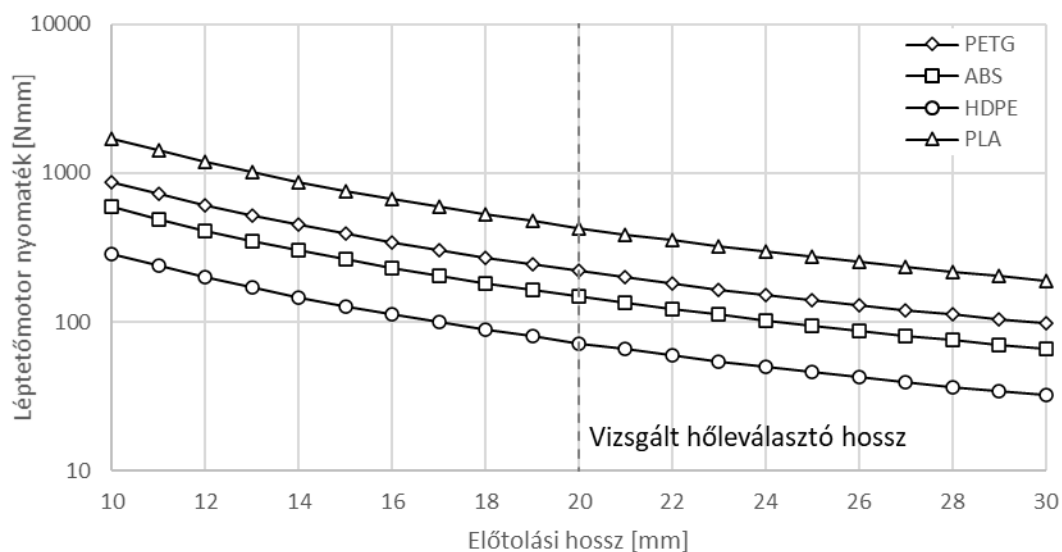
(Forrás: saját szerkesztés)



A (59) egyenletet felhasználva meghatározható maximális extrúder léptetőmotor nyomaték egyes előtolási hosszok esetén, ahol még a filament szál nem hajlik ki, az eredményeket az 59. ábra mutatja be.

59. ábra: Extrúder léptetőmotor nyomaték szükséglete a filament kihajlásához

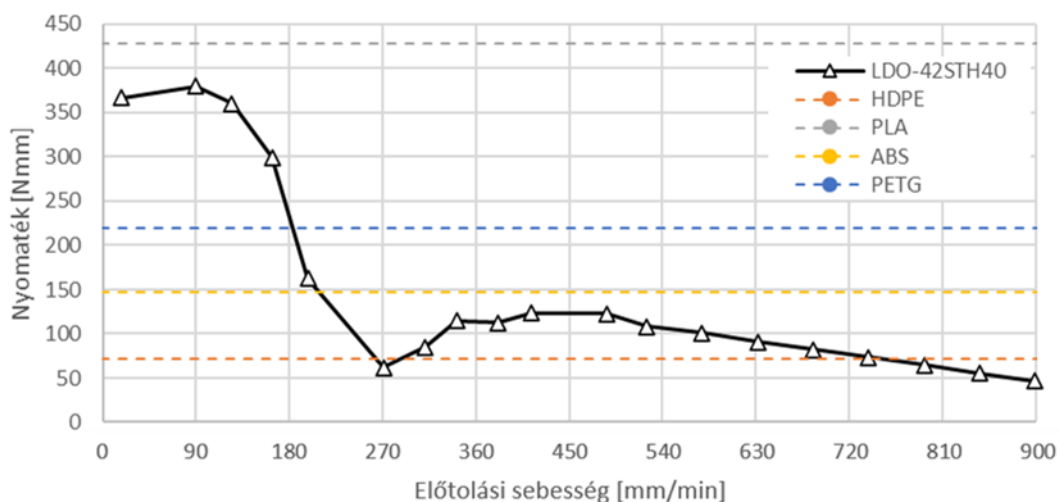
(Forrás: saját szerkesztés)



A 60. ábrán a kapott maximális kihajlási erőszükségletből visszaszámolt nyomaték értékek kerültek megjelenítésre az LDO-42STH40 léptetőmotor nyomatékgörbéjén. Az eredmények alapján a 20 [mm]-es előtolás hosszánál a PLA filament kihajlása nem lehetséges, a legkönnyebben kihajló anyag a HDPE, mely az extrúder munkapontjain ki tud hajolni.

60. ábra: Vizsgált anyagok kihajlási (erő) nyomaték igénye az extrúder léptetőmotor nyomatékgörbéjén ábrázolva

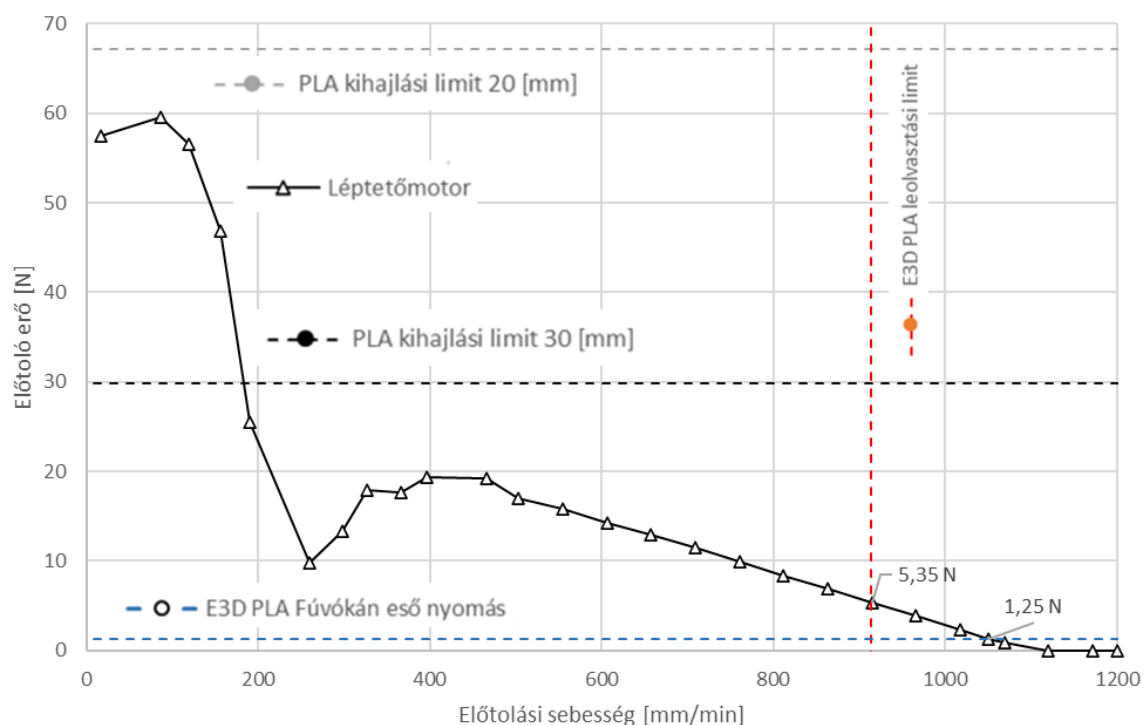
(Forrás: saját szerkesztés)



Az E3D fúvóka előtolóerő szükségletét a 61. ábra mutatja be. PLA alapanyag extrudálásához szükséges erőt a fúvókán eső nyomásból számítható, melynek értéke 1,25 [N], a mért előtolás erő szükséglet 5,35 [N] az előtolási limitnél. A különbség a filament súrlódásából, a nyomatékgörbe pontatlanságából és az előtolómű veszteségeiből adódhat.

61. ábra: E3D fűvóka előtoló erőszükséglete PLA alapanyag esetén az extrúder léptetőmotor nyomatékgörbéjén ábrázolva

(Forrás: saját szerkesztés)



A meghatározott törőfeszültség akkor értelmezhető, ha a termikus terhelés hatására a filament nem éri el az üvegesedési hőmérsékletét és az anyag tulajdonságai nem változnak meg a közvetett hevítés következtében. Ezért fontos megvizsgálni, hogy milyen hőelválasztó anyag és geometria esetén lehet a legkisebb hőterhelést elérni.

6.10. Hőelválasztó elem vizsgálata

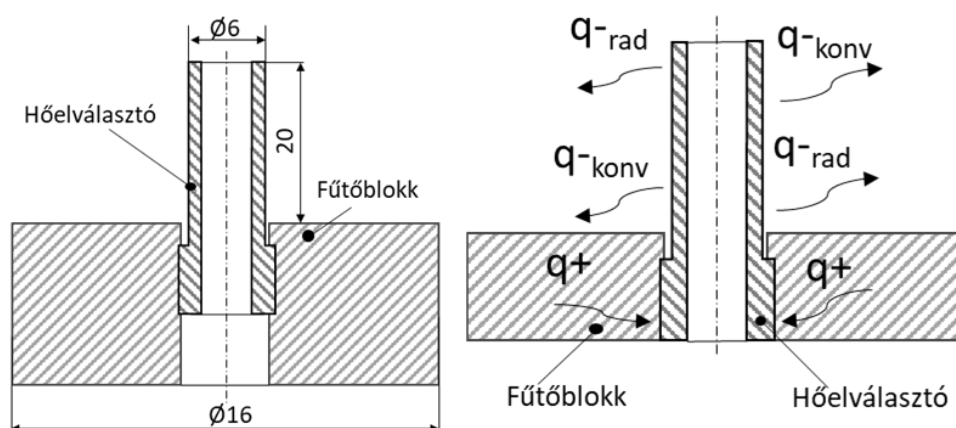
A hőelválasztó elem hőmérséklete a filament stabilitását befolyásolja, abban az esetben, ha a filament eléri az üvegesedési hőmérsékletét a fűtőblokkba lépés előtt. Ekkor az anyagtulajdonságai is megváltoznak, a törőfeszültség értéke lecsökken. A nyomtatás során a fűtőblokk hőmérséklete a szabályzás miatt nem változik, ezért állandósult állapotot szükséges vizsgálni a szimulációval.

A fűtőblokkba helyezett hőelválasztó elemet a fűtőblokk a nyomtatás során hevíti, ami egy idő után állandósult hőmérsékletet ér el. A hőelválasztás vizsgálata a 9. táblázatban felsorolt anyagpárosításokkal kerül elvégzésre és a hőelválasztó elem $60 [^{\circ}\text{C}]$ -os izotermájának pozíciója kerül meghatározásra a fűtőblokkhoz képest.

A hőelválasztó elem tengelyirányú hőmérséklet eloszlását állandósult állapotban szükséges vizsgálni, a hőmérséklet értékek meghatározásához szimuláció elvégzésére van szükség. A vizsgált modell termikus vázlatát a 62. ábra szemlélteti.

62. ábra: Fűtőblokkba szerelt hőelválasztó elem metszete és termikus vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



6.10.1. Hőtani modell és peremfelételek

A hővezetés a $\text{Ø}6$ [mm]-es fűtőblokk furat és a hőelválasztó elem palástja között történik. A szimuláció során a fűtőblokk hevítés teljesítménye 40 [W] és a furat paláston 190 [°C]-os hőmérséklet kényszer van elhelyezve.

A rendszerből távozó hőáram a hőelválasztó és a fűtőblokk felületén kényszerkonvenció a környezeti légmozgás következtében. A kényszerkonvenció a 20 [°C]-os környezet felé 100 [W/m²·K]. További energia távozik a fűtőblokk és a hőelválasztó külső felületén hősugárzás révén a 20 [°C]-os környezet felé, valamint a fűtőblokk alsó homlokfelületén 60 [°C]-os tárgyasztal felé.

A tetraéderes, kvadratikus háló $0,1$ [mm] méreten kerül alkalmazásra mindkét komponens esetén.

6.10.2. Hőmérséklet eloszlás

A szimuláció futtatásra került a 9. táblázat összes anyagpárosításával és meghatározásra került az a távolság, ahol már kevesebb mint 60 [°C]-os a hőelválasztó elem. Az anyagpárosításokat és az eredményeket a 11. táblázat tartalmazza. A szimuláció alapján a fűtőblokk anyaga nem befolyásolja állandósult állapotban a hőmérséklet maximum értékét.

11. táblázat: Hőelválasztó elem minimum hőmérséklete anyagpárosítások esetén

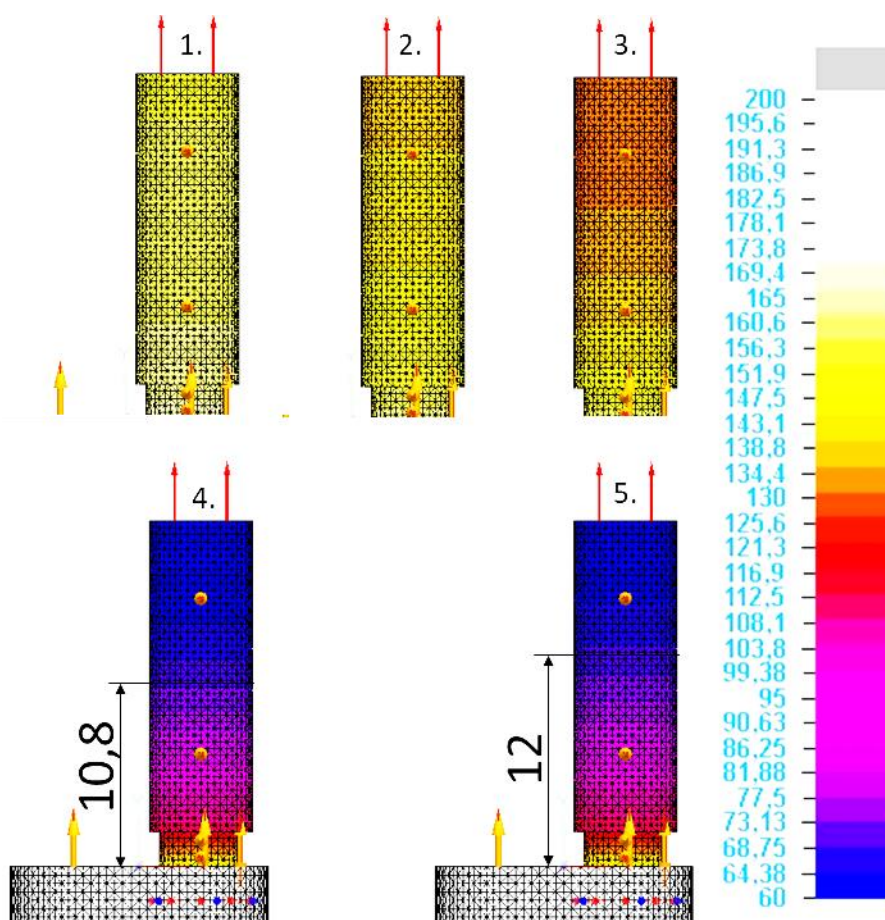
(Forrás: saját szerkesztés)

	Fűtőblokk anyaga	Hőelválasztó anyaga				
		Titán	Rozsdamentes acél	Alumínium	Vörösréz	Réz
	Titán	60 [°C]	60 [°C]	145 [°C]	130 [°C]	160 [°C]
	Rozsdamentes acél	60 [°C]	60 [°C]	145 [°C]	130 [°C]	160 [°C]
	Alumínium	60 [°C]	60 [°C]	145 [°C]	130 [°C]	160 [°C]
	Vörösréz	60 [°C]	60 [°C]	145 [°C]	130 [°C]	160 [°C]
	Réz	60 [°C]	60 [°C]	145 [°C]	130 [°C]	160 [°C]

Állandósult állapotban a hőelválasztó hőmérséklet nem befolyásolta a fűtőblokk anyaga így öt különböző eredmény jött létre melyet a 63. ábra szemléltet. A 60 [°C]-os határt a rozsdamentes acél 10,8 [mm]-nél éri el, a titán 12 [mm]-nél.

63. ábra: 1.Réz, 2. Alumínium, 3. Vörösréz, 4.Titán, 5. Rozsdamentes acél hőelválasztó elem tengelyirányú hőmérsékleteloszlása

(Forrás: saját szerkesztés)



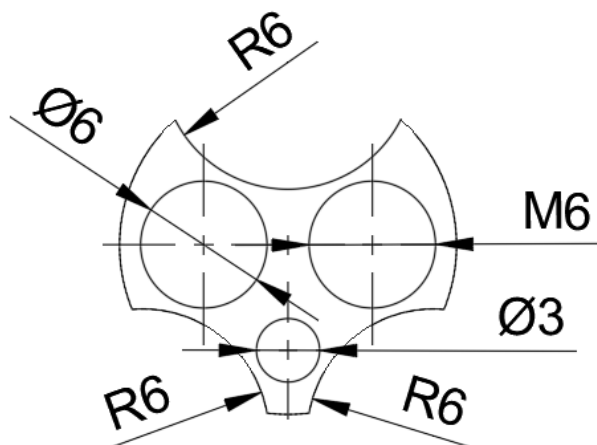
Az eredmények alapján a legkisebb termikus terhelés a titán és a rozsdamentes acél hőelválasztó esetén éri a filamentet a fűtőblokk előtt. A megmunkálhatóság szempontjából és a közel azonos eredmények alapján a rozsdamentes acél hőelválasztó az optimális, mellyel további vizsgálatokat szükséges elvégezni.

6.10.3. További termikus optimalizálás

Az 5.8.2 fejezet alapján az optimális fűtőblokk anyag a réz, az 5.10.1 fejezetben ismertetett szimulációt csökkentett tömegű fűtőblokkal lefuttatásra került annak érdekében, hogy vizsgálható legyen a hőelválasztó hőmérséklet eloszlásának a változása. A változtatott geometriát a 71. ábra mutatja be.

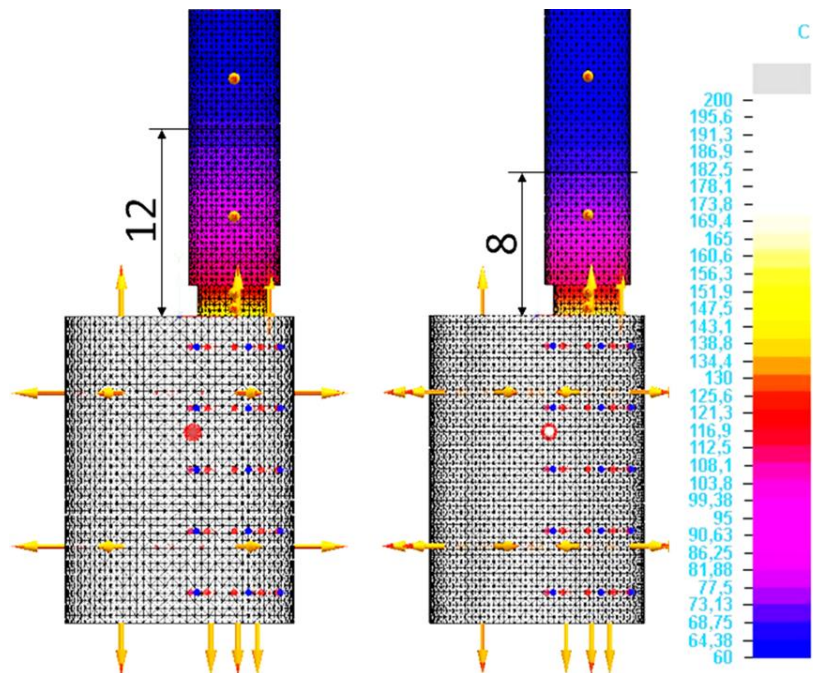
64. ábra: Fűtőblokk csökkentett tömegű geometriája

(Forrás: saját szerkesztés)



A szimuláció eredménye alapján a filament hőterhelése a fűtőblokk előtt tovább csökkenthető a fűtőblokk tömegének csökkentésével. A filament ebben az esetben 8 [mm]-rel a fűtőblokk előtt kerül a 60 [°C]-nál nagyobb környezeti hőmérsékletbe.

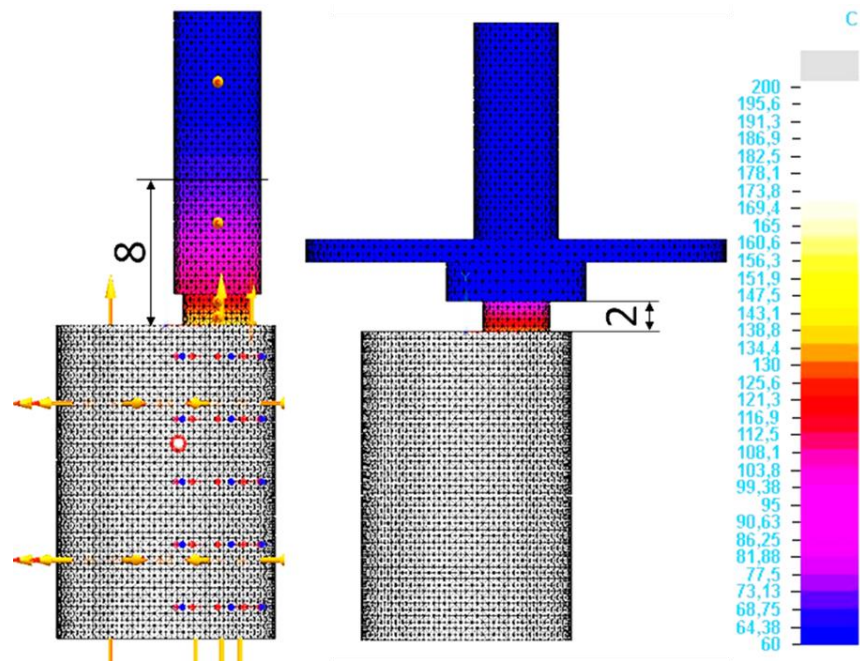
65. ábra: Jobbra hőelválasztó hőmérséklet eloszlása csökkentett fűtőblokk tömeggel
(Forrás: saját szerkesztés)



A hőelválasztás javítása lehetséges a hőelválasztóra szerelt alumínium hűtőbordával, így a rendszerből távozó hőáram növekszik a hőelválasztó megnövekedett felületén létrejövő kényszerkonvekció miatt.

A változtatott geometriát a 66. ábra mutatja be, melyen a 5.10.1 fejezetben ismertetett szimuláció került lefuttatásra. A hőelválasztó geometriájának változtatásával a hőeladásra alkalmas felület növekedett meg, így a filament hőterhelése csökkent.

66. ábra: Jobbra hőelválasztó hőmérséklet eloszlása alumínium hűtőbordával
(Forrás: saját szerkesztés)



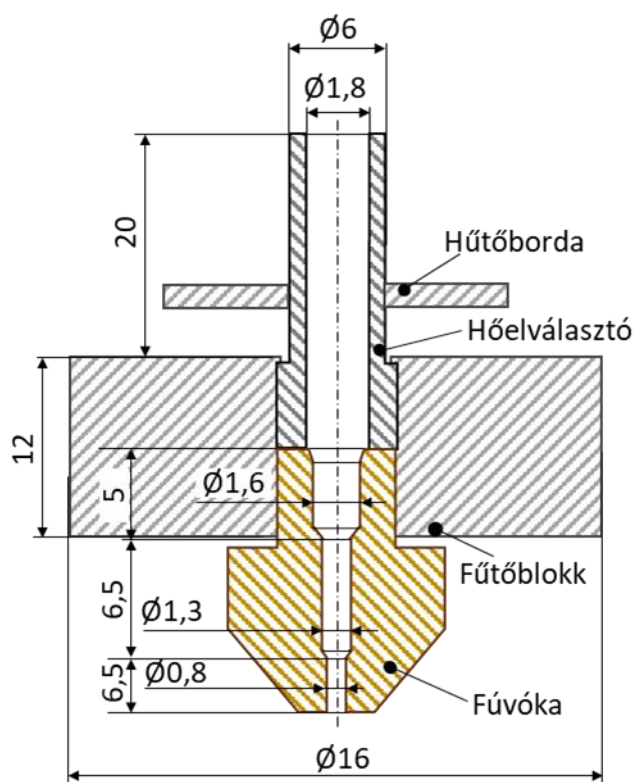
A geometria optimalizálásával a filament hőterhelését a fűtőblokk előtt 12 [mm]-ről 2 [mm]-re sikerült csökkenteni.

7. Eredmények, javaslatok

Az 5. fejezetben elvégzett analitikus számítások, kísérletek és numerikus vizsgálatok eredménye alapján az ajánlott extrúder felépítést a fúvókától kezdve az extrúder előtoló kerékig tartalmazza ez a fejezet, melynek fontosabb méreteit a 67. ábra összegzi.

67. ábra: Extrúder geometriai vázlata

(Forrás: saját szerkesztés)



7.1. Fúvóka

Az 5.3-as és az 5.4-es fejezetben a fúvókából kilépő ömledékduzzadás kísérlet és a nyomás esés analitikus számítása alapján 2-es kísérleti fúvóka az optimális. A választott furat geometria esetén a kilépő ömledék duzzadása jelentősen csökkent a referencia fúvókához képest, viszont az elérhető nyomtatási sebesség még kellően magas.

További vizsgálati lehetőség a fúvóka optimális fűtőblokk csatlakoztatása, mely során a fúvókában áramló ömledék hőmérsékletét lehet vizsgálni.

7.2. Fűtőblokk

Az 5.6-os és 5.7-es fejezet alapján meghatározásra került a leolvasztás fűtőblokk-hossz szükséglete a térfogatáram függvényében, melynek eredménye alapján a minimális fűtőblokk hossz $20 [mm^3/s]$ műanyag leolvasztása esetén $12 [mm]$.

Az 5.8-as fejezetben numerikus vizsgálat során a fűtőblokk alapanyagának meghatározása történt, az eredmények alapján az optimális fűtőblokk anyag a réz, melynek geometriája a hőelválasztás javítása érdekében a 64. ábra szerinti.

További vizsgálati lehetőség a fűtőblokk szigetelése, mely által a környezeti befolyások csökkenthetőek és a hőmérséklet szabályzás pontosítható.

7.3. Hőelválasztó

Az 5.9-es fejezetben a filament stabilitásvesztés analitikus számítása alapján és a géptervezési szempontokat figyelembe véve $20 [mm]$ -es hőelválasztó elem hosszúság került meghatározásra, melynek anyaga rozsdamentes acél és tartalmaz egy alumínium hűtőbordát a hőelválasztás optimalizálásának céljából.

További vizsgálati lehetőség a filament stabilitás vesztese esetén a hőelválasztó furat palástja és a filament palástja közötti súrlódás csökkentése.

7.4. További optimalizálási lehetőségek

A diplomamunka az extrúder léptetőmotorjának méretezésével és az előtolómű áttételezésének vizsgálatára nem tért ki, de a jövőben egy komplett extrúder értékesítése esetén szükséges a vizsgálata. Az előtolómű áttételezésének méretezése továbbá lehetőséget biztosítana a feldolgozható műanyagok listájának kibővítésére.

8. Minősegbiztosítás

Az Isikawa módszer szerint kidolgozott hibaanalízis a leggyakoribb hibaképek gyökérokának a megtalálását segíti elő. *FDM/FFF* nyomtatásnál a leggyakoribb extrúderhez köthető hibákat a 68. ábra mutatja be, melyek a fűvóka eldugulása, a filament ömledék fűvóka melletti kiáramlása, hőelválasztó dugulása a PTFE cső megégése miatt és az extrúder kerék fogainak elkopása.

68. ábra: Jellemző extrúder hibák: balról: eldugult fűvóka, ömledék eresztés, előtoló kerék kopása, hőelválasztó dugulása

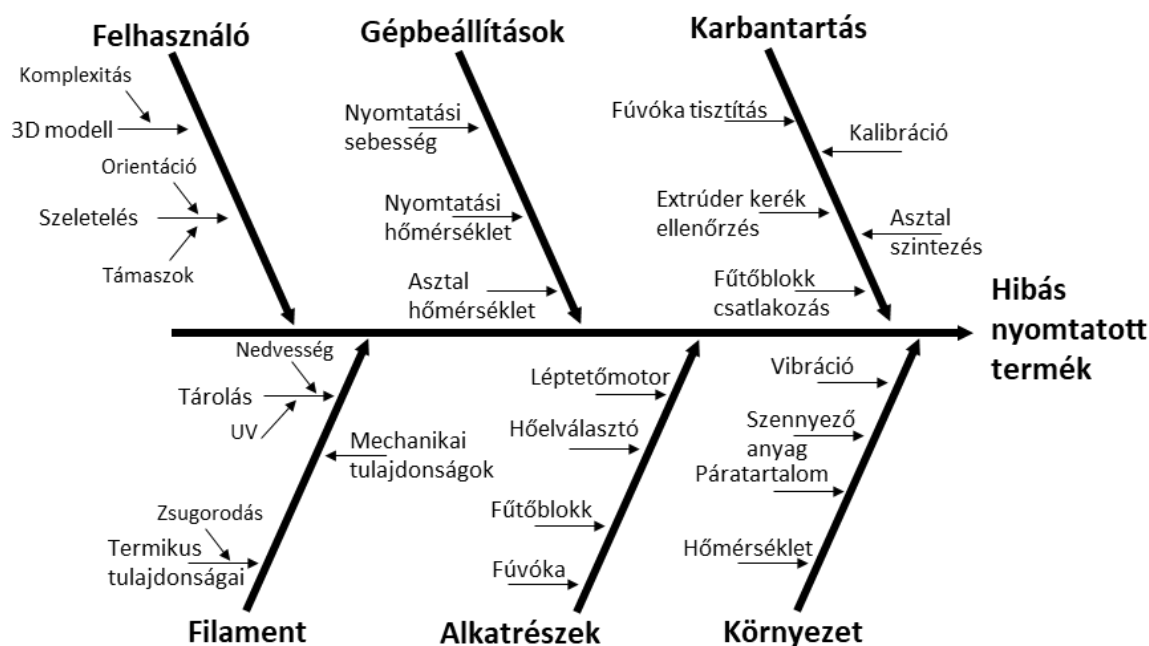
(Forrás: Saját szerkesztés Grames, 2018 és Boissonneault, 2024 alapján)



Az ismertetett hibák képek mind a nyomat minőségét rontják, hibaanalízis elősegítése érdekében a 69. ábra az Isikawa diagrammot mutatja be.

69. ábra: Isikawa diagramm

(Forrás: Lang et. al.²⁴, 2020)



Összefoglalás

A diplomamunkám célkitűzését, kutatás témáját a bevezetésben ismertettem. A diplomamunkám lezárásaként az elvégzett kutatást foglalom össze.

A szakirodalmi feldolgozásban bemutattam a polimer ömledékek reológiáját és reológiai anyagmodelleket szakirodalmaztam a későbbi számítások elvégzéséhez. A számítások, kísérletek elvégzéséhez szükséges jellemző FDM/FFF 3D nyomtatási anyagok termikus anyagjellemzőinek áttekintését végeztem el.

A következő fejezetben az FDM/FFF nyomtatókhoz hasonló extrúziós eljárások működését dolgoztam fel, melyben a csigás extrúder és FFF/FDM nyomtató működési hasonlóságot részletesen bemutattam.

A szakirodalmi rész utolsó fejezetében a FFF/FDM rendszerű nyomtatók hidrosztatikus extrúziós folyamatáról írtam.

Az érdemi rész kezdetén a filament adagolási funkció elemzését végeztem el és piac kutatás alapján meghatároztam a mértékadó térfogatáramot.

Az extrúder fűvóka tervezési aspektusánál a kilépő ömledékduzzadást valamint a fűvóka kapillárisokon eső nyomást vizsgáltam. A kísérlethez szükséges fűvókákat megterveztem és legyártottam, majd méréseket végeztem, melynek eredménye alapján javaslatot tettem az optimális furatgeometriára.

A következő fejezetben az ömledékképződés termikus vizsgálatát végeztem el, ami alapján meghatároztam a célkitűzésben ismertetett anyagok ömledékképződéséhez szükséges időt. Az eredményeket felhasználva fűtőblokk hossza javaslatot tettem és az optimális anyagát hőtani szimulációval meghatároztam.

A fűtőblokk és a filament-előtolómű közötti optimális távolság meghatározására a filament stabilitásvesztéséhez szükséges erőt határoztam meg, adott távolságok esetén, mely eredmény alapján javaslatot tettem a hőelválasztó hosszára.

Az utolsó vizsgálatnál végeselem-módszer használatával a hőelválasztó elem anyagának meghatározása volt, melynek célja, hogy a filament stabilitását befolyásoló hőterhelés a lehető legrövidebb szakaszon érje a fűtőblokkba lépés előtt.

A javasolt méreteket, geometriákat, anyagválasztásokat összegeztem majd a gyakran előforduló extrúder meghibásodásokra Isikawa elemzést végeztem az esetleges hibák lehető leggyorsabb feltárásához.

Felhasznált szakirodalmak

1. Bábel, P.B. (2020). *FDM 3D nyomtató fűvókájának optimalizálása nagysebességű nyomtatáshoz szakdolgozat*.
2. Boissonneault, T. (2024). *How to Clean 3D Printer Nozzles and Prevent Clogs*. [Elektronikus kiad.] Wevolver. Forrás: <https://www.wevolver.com/article/how-to-clean-3d-printer-nozzle> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
3. Brainkart.com. (n.a). *Torque-Speed Characteristics*. [Elektronikus kiad.] Forrás: https://www.brainkart.com/article/Torque-Speed-Characteristics---stepper-motor_11753/#google_vignette (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
4. Clarke, C. (2017). *Bondtech releases lightweight BMG extruder with 'best force to weight' ratio on the market - 3D Printing Industry*. [Elektronikus kiad.] 3D Printing Industry. Forrás: <https://3dprintingindustry.com/news/bondtech-releases-lightweight-bmg-extruder-best-force-weight-ratio-market-108969/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
5. Crawford, R.J. (1997). *Plastics engineering*. Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann.
6. Dae Han, C. (2007). *Polymer rheology*. Oxford: Oxford University Press.
7. Demets, R., Van Kets, K., Huysveld, S., Dewulf, J., De Meester, S. and Ragaert, K. (2021). Addressing the complex challenge of understanding and quantifying substitutability for recycled plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, p.105826. 39doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105826>.
8. Denn, M.M. (2001). Extrusion Instabilities and Wall Slip. *Annual Review of Fluid Mechanics* , 33(265-287).
9. Drobny, J.G. (2007). Processing Methods Applicable to Thermoplastic Elastomers. In: *Handbook of Thermoplastic Elastomers*. William Andrew Publishing.
10. Duhduh, A., Noor, H., Kundu, A. and Coulter, J. (2019). *Advanced Additive Manufacturing of Functionally Gradient Multi Material Polymer Components with Single Extrusion Head: Melt Rheology Analysis*. [Elektronikus kiad.] ResearchGate. Forrás: https://www.researchgate.net/publication/339585944_Advanced_Additive_Manufacturing_of_Functionally_Gradient_Multi_Material_Polymer_Components

- [with Single Extrusion Head Melt Rheology Analysis](#) (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
11. Dynisco (n.a). *Practical Rheology Section 3*. [Elektronikus kiad.] Dynisco.com.
Forrás: https://www.dynisco.com/userfiles/files/Practical_Rheology_Section_3.pdf
(Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 12. Frankland, J. (2019). *Understanding Viscosity in Extrusion*. [Elektronikus kiad.]
Plastics Technology. Forrás: <https://www.ptonline.com/articles/understanding-viscosity-in-extrusion> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.) 10
 13. Frwiki.wiki. (n.a). *Polikarbonát*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: https://hu.frwiki.wiki/wiki/Polycarbonate#google_vignette (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 14. GIAForm. (2021). *4+1 fröccsöntési hiba és annak okai – geometriai eltérések*.
[Elektronikus kiad.] Forrás: <https://giaform.hu/2021/01/11/41-froccsontesi-hiba-es-annak-okai-geometriai-eltereseek/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 15. Giang, K. (2017). *PLA vs. ABS: What's the difference?* [Elektronikus kiad.]
Robohub. Forrás: <https://robohub.org/pla-vs-abs-whats-the-difference/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 16. Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH (n.a). *Increased selectivity through continuous measurement of the extensional viscosity*. [Elektronikus kiad.]
Goettfert.com. Forrás: <https://www.goettfert.com/application-knowledge/rheo-info/for-online-rheometers/increased-selectivity-through-continuous-measurement-of-the-extensional-viscosity> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 17. Grames, E. (2018). *Nozzle Clogging vs Hot End Oozing – What's the Difference?* [Elektronikus kiad.] All3DP. Forrás: <https://all3dp.com/2/nozzle-clogging-vs-hot-end-oozing-what-s-the-difference/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 18. Greminger, M. (2022). *Calculating the Johnson-Euler Buckling Load*.
[Elektronikus kiad.] The Official EngineeringPaper.xyz Blog.
Forrás: <https://blog.engineeringpaper.xyz/calculating-the-johnson-euler-buckling-load> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
 19. Hofstätter, T., Pimentel, R., Pedersen, D.B., Mischkot, M. and Hansen, H.N. (2015). *Simulation of a Downsized FDM Nozzle*.

20. IMATEK (n.a). *Calculation*. [Elektronikus kiad.] R6000.com.
Forrás: <https://www.r6000.com/product/calculation.html> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
21. Kalácska, G., Kozma, M., Zsidai, L. and Keresztes, R. (2007). *Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban*. Gödöllő: 3C-Grafika Kft.
22. Kontopoulou, M. (2011). *Applied Polymer Rheology*. John Wiley & Sons.
23. Kurganov, V.A. (2011). Heat Transfer Coefficient. www.thermopedia.com.
[Elektronikus kiad.] doi:https://doi.org/10.1615/AtoZ.h.heat_transfer_coefficient.
24. Lang, V., Weingarten, S., Wiemer, H., Scheithauer, U., Glausch, F., Johne, R., Michaelis, A. and Ihlenfeldt, S. (2020). Process Data-Based Knowledge Discovery in Additive Manufacturing of Ceramic Materials by Multi-Material Jetting (CerAM MMJ). *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), p.74.
doi:<https://doi.org/10.3390/jmmp4030074>.
25. Latko-Duralek, P., Dydek, K. and Boczkowska, A. (2019). Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(11), pp.2600–2606. doi:<https://doi.org/10.1007/s10924-019-01544-6>.
26. LDO Motors. (2021). *Nyomatékgörbe ábrája*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0239/9287/files/LDO-42STH40-1004ASH_Torque_Curve.pdf?v=1632931667 (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
27. Matweb. (n.a). *ABS Adatlap*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a8afcdac864d4b8f58d40570d2e5aa&ckck=1> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
28. Matweb. (n.a). *HDPE Adatlap*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=fce23f90005d4fbe8e12a1bce53ebdc8 (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
29. Matweb. (n.a). *PET-G Adatlap*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0 (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
30. Matweb. (n.a). *PLA Adatlap*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)

31. Prusa Polymers (2022a). *Prusament PA11 (Nylon) adatlap*. [Elektronikus kiad.] Prusament.com. Forrás: <https://prusament.com/materials/prusament-pa11-nylon-carbon-fiber/> (Letöltés dátuma: 2024.04.02.)
32. Prusa Polymers (2022b). *Prusament PC adatlap*. [Elektronikus kiad.] Prusament.com. Forrás: <https://prusament.com/materials/prusament-pc-blend/> (Letöltés dátuma: 2024.04.02.)
33. Prusa Polymers (2022c). *Prusament PET-G adatlap*. [Elektronikus kiad.] Prusament.com. Forrás: <https://prusament.com/materials/prusament-petg-recycled/> (Letöltés dátuma: 2024.04.02.)
34. Prusa Polymers (n.a). *Prusament PLA adatlap*. [Elektronikus kiad.] Prusament.com. Forrás: <https://prusament.com/materials/pla/> (Letöltés dátuma: 2024.04.02.)
35. Rao, N.S. and Schumacher, G. (2004). *Design Formulas for Plastics Engineers*.
36. Robledo-Ortíz, J.R., Ramírez-Arreola, D.E., González-Núñez, R. and Rodrigue, D. (2006). Effect of Freeze-Line Position and Stretching Force on the Morphology of LDPE-PA6 Blown Films. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 22(4), pp.287–314. doi:<https://doi.org/10.1177/8756087906073120>.
37. Schwartz, H. and Webber, M. (2021). *Effect of Processing Aid Additives on Flow Instabilities and Die Build Up*. [Elektronikus kiad.] Kafrit.com. Forrás: <https://kafrit.com/news/effect-of-processing-aid-additives-on-flow-instabilities-and-die-build-up/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
38. Spiryn, J. (2020). *LDPE: CNC Machining Materials Overview*. [Elektronikus kiad.] Zmorph. Forrás: <https://zmorph3d.com/blog/ldpe-cnc-machining-materials-overview/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
39. Spoerk, M., Arbeiter, F., Raguž, I., Holzer, C. and Gonzalez-Gutierrez, J. (2019). Mechanical Recyclability of Polypropylene Composites Produced by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Polymers*, 11(8), p.1318. doi:<https://doi.org/10.3390/polym11081318>.
40. Tábi, T. (n.a). *Polimerek alkalmazásának előnyei-hátrányai*.
41. Trhlíková, L., Zmeskal, O., Psencik, P. and Florian, P. (2016). Study of the thermal properties of filaments for 3D printing. *AIP Conference Proceedings*, 1752(1). doi:<https://doi.org/10.1063/1.4955258>.

42. Wikipedia.org. (n.a). *Akrilnitril-butadién-sztirol*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Akrilnitril-butadi%C3%A9n-sztirol#> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
43. Wikipedia.org. (n.a). *Nylon 66*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon_66# (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
44. Wikipedia.org. (n.a). *Polietilén*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Polietil%C3%A9n#> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
45. Wikipedia.org. (n.a). *Polietilén-tereftalát*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Polietil%C3%A9n-tereftal%C3%A1t#> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
46. Wikipedia.org. (n.a). *Politejsav*. [Elektronikus kiad.]
Forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Politejsav#> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
47. Xometry (n.a). *ABS 3D Printing Service*. [Elektronikus kiad.] Xometry.
Forrás: <https://www.xometry.com/capabilities/3d-printing-service/3d-printing-abs/> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)
48. Zatloukal, M. and Musil, J. (2015). *Investigation of Die Drool Phenomenon for Linear HDPE Polymer Melts Having Identical Polydispersity Index but Different MZ and MZ+1 Average Molecular Weights*. [Elektronikus kiad.]
Extrusionwiki.com. Forrás: <http://extrusionwiki.com/wiki/Print.aspx?Page=POTM-May-2012> (Letöltés dátuma: 2024.11.01.)

Táblázatok és ábrák jegyzéke

1. táblázat: FDM/FFF nyomtatókban használt polimerek	17
2. táblázat: Szeletelő beállítások 0,4 [mm] fűvóka, 0,1 [mm] rétegmagasság esetén	29
3. táblázat: Vizsgált fűvókák geometriai méretei	32
4. táblázat: Lépésvesztés nélkül elérhető maximális előtolási sebesség az ajánlott nyomtatási hőmérséklet esetén	39
5. táblázat: Kilépő térfogatáram	40
6. táblázat: Extrúder léptetőmotor maximális fordulatszámához tartozó nyomaték lépésvesztés határán.....	43
7. táblázat: Fűvókában maximálisan felépülő nyomás.....	43
8. táblázat: Számított nyomásvesztés adott kapillárison, kapilláris átmeneten a vizsgált alapanyagok esetén	44
9. táblázat: Fűtőblokkanyagok termikus jellemzői.....	52
10. táblázat: Vizsgált filamentek tulajdonságai	56
11. táblázat: Hőelválasztó elem minimum hőmérséklete anyagpárosítások esetén	61
12. táblázat: Összesített kilépő duzzadás arány eredmények	77
13. táblázat: Összesített kilépő duzzadás mérték eredmények	78
14. táblázat: Prusa MK3S extrúder léptetőmotor műszaki adatai.....	81
15. táblázat: Nyírási sebesség a kilépő kapillárisban.....	82
1. ábra: A kapilláris áramlás jelöléseinek értelmezése	5
2. ábra: Kapillárisok közötti átmenet geometriája.....	6
3. ábra: Newtoni (bal) és nem-newtoni (jobb) áramlási kép	7
4. ábra: Bagley korrekció elvi vázlata	7
5. ábra: Nyomás változás a kapillárisban	8
6. ábra: Kilépéskori térfogatváltozás hosszú kapilláris esetén	9
7. ábra: Carreau- Yasuda modell paramétereinek meghatározása szerkesztéssel	11
8. ábra: 3D nyomtatásban használt filamentek viszkozitásváltozása a nyírási sebességük függvényében.....	12
9. ábra: Különböző faktorok ömledék viszkozitásra gyakorolt hatása.....	13
10. ábra: Viskozitás változása hőterhelés hatására	13
11. ábra: Politejsav molekula szerkezete	15
12. ábra: Akronitril-butadién-sztirol molekula szerkezete	15
13. ábra: Polietilén-tereftalát-glikol molekula szerkezete	16
14. ábra: Polikarbonát molekula szerkezete	16
15. ábra: Poli-amid molekula szerkezete	16
16. ábra: Polietilén-tereftalát-glikol molekula szerkezete	17
17. ábra: Csigás extrúder felépítése	18
18. ábra: Extrúdercsiga által kiszorított térfogat	19
19. ábra: Áramlási keresztmetszet vázlata.....	20
20. ábra: Vizsgált fluidum-elemre ható erők	21
21. ábra: Balra: felület hullámosodás, jobbra: megfelelő felület minőség	23
22. ábra: Műanyag lerakódás a kilépési pontnál.....	24
23. ábra: Folytonossági hibák az ömledékben.....	24
24. ábra: Hidrosztatikus extrúder.....	25
25. ábra: Háztartási műanyagok jellemző anyagáramlási indexe.....	26
26. ábra: Extrúder metszete	26
27. ábra: Filament ömledékképződés a fűvókában.....	27
28. ábra: Kilépő térfogatigényt befolyásoló méretek vázlata	28

29. ábra: A 0,8 [mm]-es fűvóka leolvasztó-teljesítmény igénye a nyomtatási sebesség függvényében.....	30
30. ábra: Extrúder előtolási sebessége különböző ömledékáramok esetén	31
31. ábra: Fűvóka geometriai vázlata.....	32
32. ábra: 0,8 [mm]-es fűvóka esetén szükséges extrúder előtolási sebességek a vizsgált térfogatáram esetén.....	33
33. ábra: Referencia méret felvételének a vázlata	34
34. ábra: Referencia csigafűró mérete (bal), alacsony előtolási sebesség mellett a duzzadt PLA filament (jobb)	34
35. ábra: Filament duzzadás eltérő extrúder előtolási sebesség esetén	35
36. ábra: PLA filament duzzadása eltérő előtolási sebességek esetén	35
37. ábra: E3D fűvóka geometria.....	36
38. ábra: Vizsgált fűvókák ömledékduzzadásának mértéke eltérő anyagok használata esetén, különböző előtolási sebességeken	37
39. ábra: Balra 1-es kísérleti fűvóka, jobbra E3D fűvóka kilépéskori dagadása ABS alapanyag esetén, 273 [mm/ min] előtolási sebesség esetén	38
40. ábra: Egyszerű furatú E3D fűvóka HDPE ömledéke balra 409 [mm/ min], középen 546 [mm/ min], jobbra 682 [mm/min] előtolási sebességnél	38
41. ábra: Kísérleti fűvóka kilépéskori ömledék képe HDPE alapanyag esetén.....	38
42. ábra: Kilépő kapillárison extrudálható anyagok viszkozitása adott előtolási sebességen balról: PETG, PLA, ABS, HDPE	41
43. ábra: LDO-STH40 nyomatékgörbéje teljes lépések esetén	42
44. ábra: Nyomás veszteség vázlata a kapilláris hosszon.....	44
45. ábra: Nyomásveszteségek a különböző kapilláris-hossz aránypárok esetén	45
46. ábra: Filament hevítése a fűtőblokkban.....	46
47. ábra: Filament hőátadás peremfeltételei	47
48. ábra: Maghőmérséklet változása 1 [s] hevítési idő után a hálófelbontás függvényében.....	48
49. ábra: Hőeloszlás bal 0,15 [mm]-es hálóméret, jobb 0,1 [mm]	49
50. ábra: Balra ABS alapanyag: felül 1. időpillanat után, középen 0,8125 [s] után, alul 1,75 [s] után, jobbra PLA alapanyag: felül 1. időpillanat után, középen 0,3125 [s], alul 0,63 [s] után	50
51. ábra: Szükséges fűtőblokk hossz az előtolási sebesség függvényében	51
52. ábra: Fűtőblokk termikus vázlata	52
53. ábra: Vizsgált fűtőblokk vázlata	53
54. ábra: 1. titán, 2. rozsdamentes acél, 3. alumínium, 4. sárgaréz, 5. réz hőmérséklet eloszlása 0,5 [s] után a hővezetési tényező szerint növekvő sorrendbe rendezve.....	53
55. ábra: Fűtőblokk hőmérséklet változása	54
56. ábra: Filament kihajlás modellje.....	55
57. ábra: Kihajlásierő az előtolási hossz függvényében	56
58. ábra: Előtolómű vázlata	57
59. ábra: Extrúder léptetőmotor nyomaték szükséglete a filament kihajlásához	57
60. ábra: Vizsgált anyagok kihajlási (erő) nyomaték igénye az extrúder léptetőmotor nyomatékgörbéjén ábrázolva.....	58
61. ábra: E3D fűvóka előtoló erőszükséglete PLA alapanyag esetén az extrúder léptetőmotor nyomatékgörbéjén ábrázolva	59
62. ábra: Fűtőblokkba szerelt hőelválasztó elem metszete és termikus vázlata	60
63. ábra: 1.Réz, 2. Alumínium, 3. Vörösréz, 4.Titán, 5. Rozsdamentes acél hőelválasztó elem tengelyirányú hőmérsékleteloszlása	61
64. ábra: Fűtőblokk csökkentett tömegű geometriája.....	62
65. ábra: Jobbra hőelválasztó hőmérséklet eloszlása csökkentett fűtőblokk tömeggel	63

66. ábra: Jobbra hőelválasztó hőmérséklet eloszlása alumínium hűtőbordával	64
67. ábra: Extrúder geometriai vázlata.....	65
68. ábra: Jellemző extrúder hibák: balról: eldugult fűvóka, ömledék eresztés, előtoló kerék kopása, hőelválasztó dugulása.....	67
69. ábra: Isikawa diagramm	67
70. ábra: L3 furathossz ellenőrzés mérési vázlata	78
71. ábra: L1 furathossz ellenőrzés mérési vázlata	79
72. ábra: Általános léptetőmotor nyomaték karakterisztikája	79
73. ábra: PLA viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében.....	80
74. ábra: HDPE viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében.....	80
75. ábra: ABS viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében.....	81
76. ábra: PET-G viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében	81

Melléklet

1. 3.2.3 Mérés menete

1. Nyomtatási hőmérséklet beállítása
2. Vizsgálandó fűvóka fűtőblokkba való rögzítése,
3. A PLA filament szál befűzése, előtölása a fűvókából való kiáramlásig,
4. Hőmérséklet ellenőrzése,
5. Képrögzítés bekapcsolása,
6. Ismert átmérőjű csigafúrót a kilépő furatba helyezni,
7. Extrúder relatív pozíciójának nullázása a G92 paranccsal,
8. Extrúdálás parancs: G1 E100 Fx, ahol x az extrúder előtolási sebessége [mm/perc] mértékegységben,
9. A 7.-8. pontot ismételni a 3.táblázatban meghatározott extrúder előtolási sebességekkel,
10. Felvétel leállítása,
11. Fűtőblokk hőmérséklete a PLA üvegesedési hőmérséklet alá beállítani, és cold-pull-t elvégezni,
12. 1. ponttól ismételni a további fűvókákkal.

2. Fűvókából kilépő duzzadás aránya, összesített eredmények

12. táblázat: Összesített kilépő duzzadás arány eredmények

Előtölási sebesség	PLA				PETG			
	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka
[mm/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
136	0,99	0,99	1,03	1,01	1,06	1,10	1,08	1,13
273	1,00	1,03	1,13	1,84	1,06	1,11	1,14	1,55
409	1,06	1,15	1,23	1,90	1,14	1,20	1,21	1,79
546	1,11	1,26	1,58	2,03	1,21	1,34	1,39	1,93
682	1,38	1,55	1,71	2,05	-	-	1,34	1,93
819	-	1,68	1,79	2,05	-	-	-	1,93
Előtölási sebesség	HDPE				ABS			
	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka
[mm/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
136	1,14	1,26	1,25	1,41	1,00	1,10	1,10	1,25
273	1,26	1,30	1,25	1,41	1,24	1,16	1,36	2,00
409	1,34	1,38	1,25	-	1,60	1,60	1,58	2,13
546	1,36	1,56	1,25	-	-	-	1,90	2,14
682	-	1,58	1,34	-	-	-	-	-
819	-	-	-	-	-	-	-	-

13. táblázat: Összesített kilépő duzzadás mérték eredmények

Előtolási sebesség	PLA				PETG			
	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka
[mm/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
136	0,98	0,98	1,05	1,03	1,13	1,21	1,16	1,27
273	1,00	1,05	1,27	3,39	1,13	1,23	1,30	2,40
409	1,13	1,32	1,50	3,61	1,29	1,44	1,46	3,20
546	1,24	1,59	2,48	4,10	1,47	1,80	1,93	3,71
682	1,89	2,40	2,93	4,20	-	-	1,80	3,71
819	-	2,81	3,20	4,20	-	-	-	3,71

Előtolási sebesség	HDPE				ABS			
	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka	1-es fűvóka	2-es fűvóka	3-as fűvóka	E3D fűvóka
[mm/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
136	1,29	1,59	1,56	2,00	1,00	1,21	1,21	1,56
273	1,59	1,69	1,56	2,00	1,53	1,35	1,85	4,00
409	1,80	1,90	1,56	-	2,56	2,56	2,50	4,52
546	1,85	2,43	1,56	-	-	-	3,61	4,57
682	-	2,50	1,79	-	-	-	-	-
819	-	-	-	-	-	-	-	-

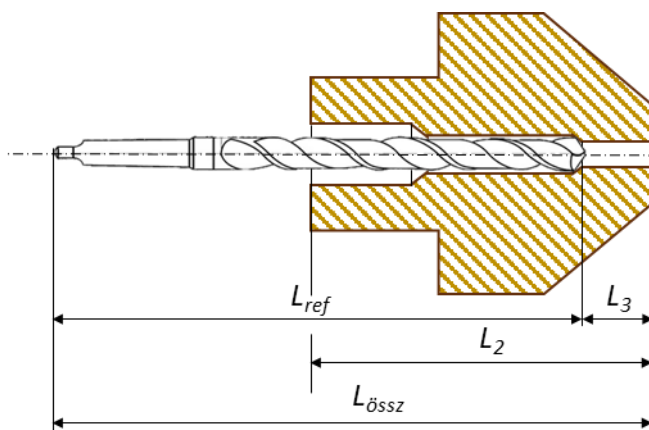
3. Kísérleti fűvókák furathossz ellenőrzési folyamatának leírása

A kísérlethez szükséges fűvókákat legyártottam és méreteit ismert méretű csigafúró segítségével visszamértem. A referencia csigafúró szárát L_{ref} [mm] a fűvóka furatába helyeztem a 70. ábra szerint és az $L_{össz}$ [mm] hosszt tolómérővel lemértem, majd a fűvóka hosszát L_2 [mm] is megmértem. Az L_3 [mm] furathossz mérete így számítható:

$$L_3 = L_{össz} - L_{ref} \quad (60.)$$

70. ábra: L3 furathossz ellenőrzés mérési vázlata

(Forrás: Saját szerkesztés)

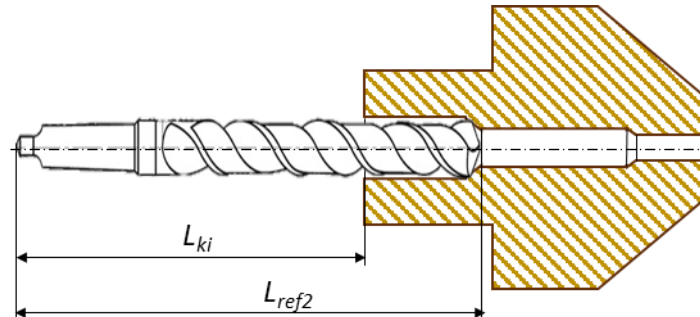


Az L_1 [mm] furathossz méréséhez d_2 [mm] átmérőnél nagyobb átmérőjű L_{ref2} [mm] hosszúságú csigafúrót használtam, így a csigafúró az első furat végénél megakadt a 71. ábra szerint. Az L_1 [mm] furathossz számítása:

$$L_1 = L_{ref2} - L_{ki} \quad (61.)$$

71. ábra: L1 furathossz ellenőrzés mérési vázlata

(Forrás: Saját szerkesztés)



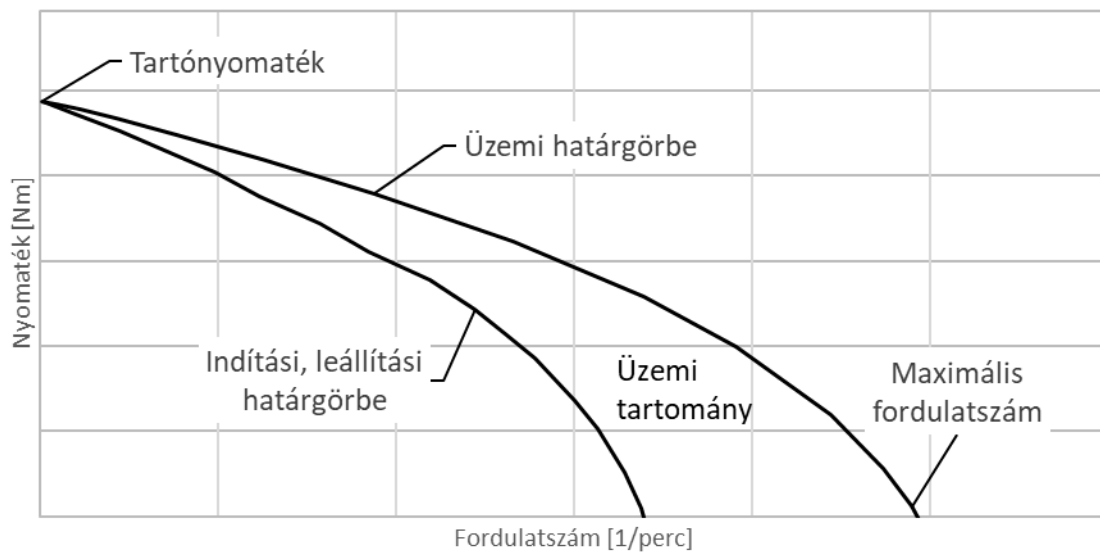
Az köztes furathossz kiadódik az $L_3 [mm]$ $L_1 [mm]$ ismeretében:

$$L_2 = L_{össz} - L_{ref2} \quad (62.)$$

4. Általános léptetőmotor nyomaték karakterisztikája

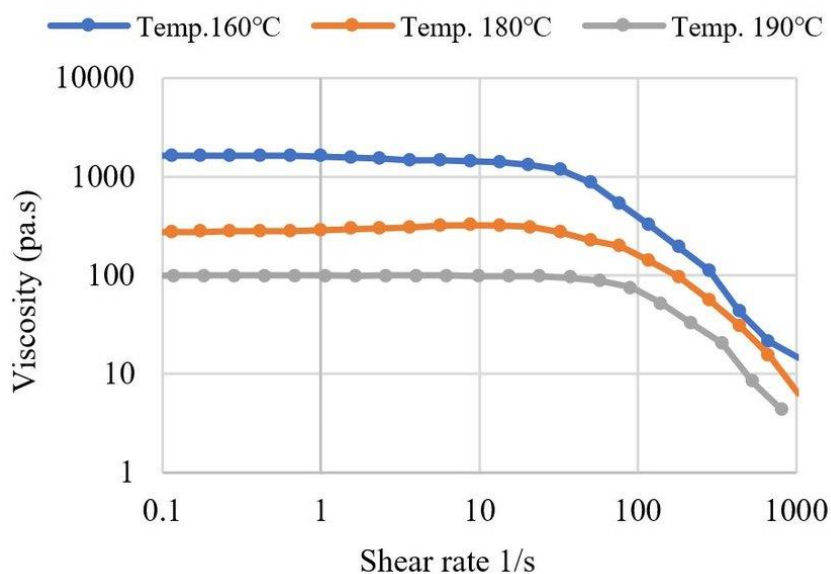
72. ábra: Általános léptetőmotor nyomaték karakterisztikája

(Forrás: Brainkart.com, n.a)

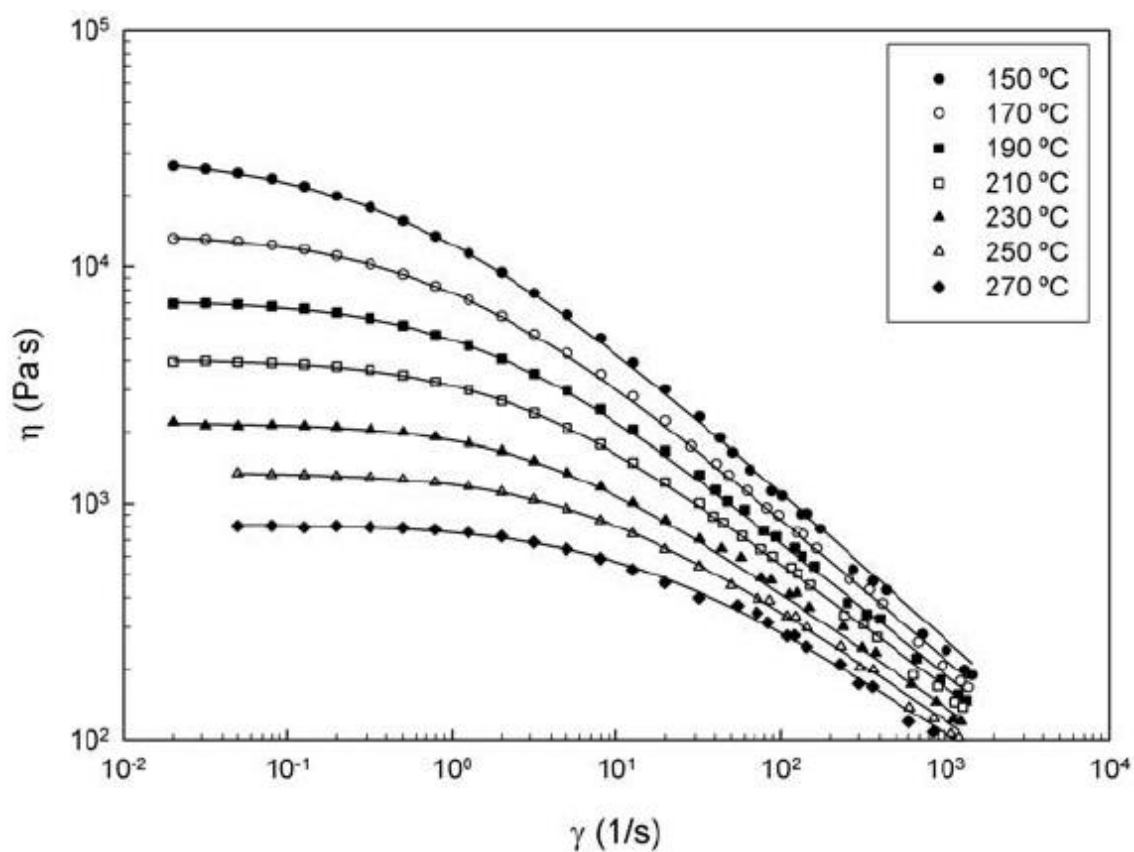


5. Anyagok viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében.

73. ábra: PLA viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében
(Forrás: Duhduh et. al.¹⁰, 2021)

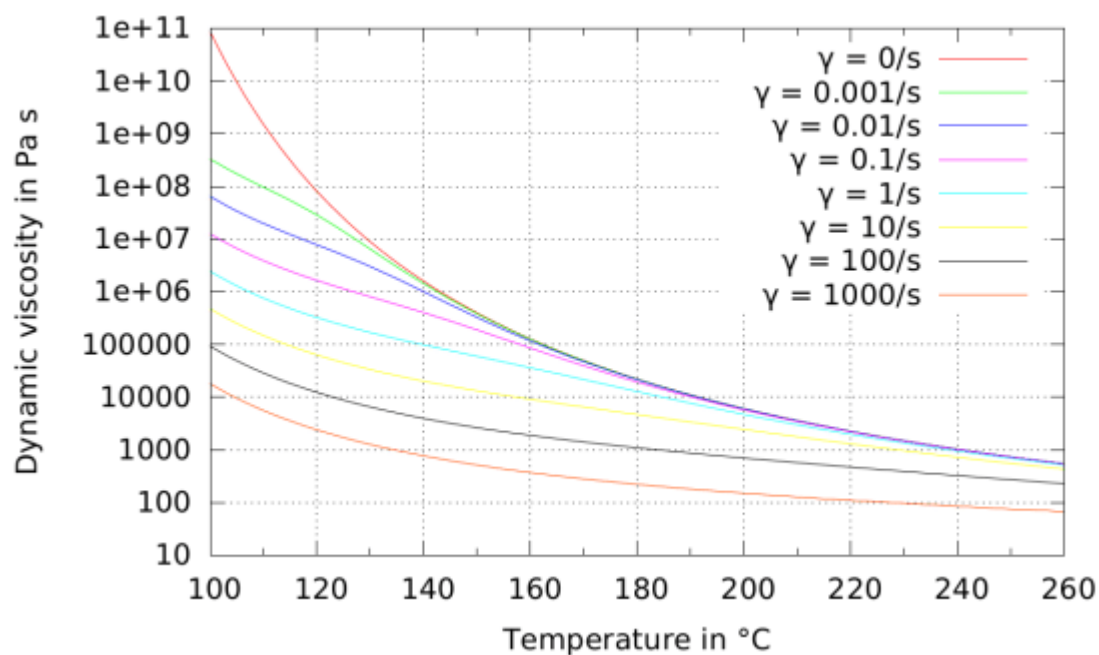


74. ábra: HDPE viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében
(Forrás: Robledo-Ortíz et. al.³⁶, 2006)



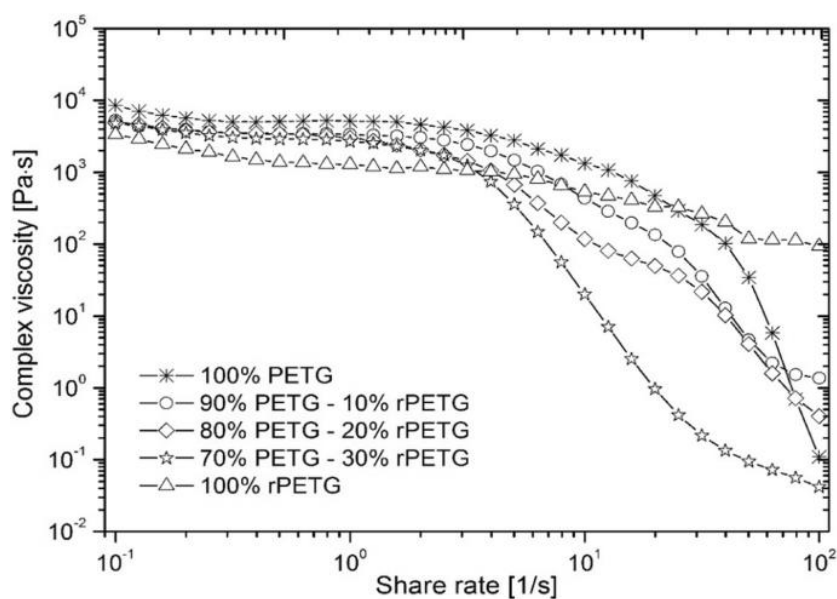
75. ábra: ABS viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében

(Forrás: Hofstätter et. al.¹⁹, 2015, Trhliková et. al.⁶ 2016)



76. ábra: PET-G viszkozitás függése a nyírósebesség, hőmérséklet függvényében

(Forrás: Brainkart.com, n.a; Latko-Duralek et. al.²⁵, 2019)



6. Prusa MK3S extrúder léptetőmotor műszaki adatai

14. táblázat Prusa MK3S extrúder léptetőmotor műszaki adatai

(Forrás: Saját szerkesztés)

Típus	Feszültség	Áramfelvétel	Ellenállás	Tartónyomaték	Rotor inercia	Lépésszög	Induktivitás
[-]	[V]	[A]	[Ω]	[Nmm]	[g/cm ²]	[°]	[mH]
Nema 17	6,5	1	6,5	500	63,7	1,8	13

7. Nyírási sebesség a kilépő kapillárisban

15. táblázat Nyírási sebesség a kilépő kapillárisban

(Forrás: Saját szerkesztés)

Típus	HDPE	PLA	ABS	PETG
[-]	[1/s]	[1/s]	[1/s]	[1/s]
1-es fúvóka	459	562	367	455
2-es fúvóka	558	670	359	502
3-as fúvóka	558	686	399	578
E3D fúvóka	235	726	447	662

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve:	Bábel Péter Bence
A Hallgató Neptun kódja:	D9GHFV
A dolgozat címe:	Ömledékszálás Leolvasztó Extrúder Termikus Optimalizálása
A megjelenés éve:	2024
A konzulens intézetének neve:	Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve:	Járműtechnika Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

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.

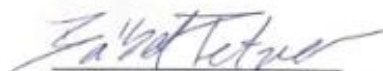
Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. 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 MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: 2024. év 11. hó 02. nap


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Bábel Péter Bence (hallgató Neptun azonosítója: D9GHFV) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: Gödöllő, 2024 év november hó 04. nap


belső konzulens