

NEUMANN JÁNOS EGYETEM

GAMF MŰSZAKI ÉS INFORMATIKAI KAR



OTDK DOLGOZAT

**PLA ALAPÚ NANOKOMPOZIT NYOMTATÓANYAG NYOMTATÁSI
TECHNOLÓGIÁJÁNAK OPTIMALIZÁLÁSA**

BALABÁS GERGELY

NEUMANN JÁNOS EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖK SZAK – MŰANYAGFELDOLGOZÓ SZAKIRÁNY

KONZULENS: ÁDÁM BALÁZS

2022. KECSKEMÉT

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	8
1. ADDITÍV GYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK.....	9
1.1. ADDITÍV GYÁRTÁS LÉPÉSEI	10
1.2. LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)	11
1.3. STEREOLITHOGRAPHY (SLA)	12
1.4. SELECTIVE LASER SINTERING (SLS).....	13
1.4.1. <i>Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i>	14
1.5. THREE DIMENSIONAL PRINTING (3DP).....	15
1.5.1. <i>Inkjet Printing</i>	15
1.5.2. <i>Jetted Photopolymer</i>	16
1.6. ELJÁRÁSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA (ÖSSZEFOGLALÁS)	17
2. FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)	18
2.1. FDM BERENDEZÉS FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE	19
2.1.1. <i>Extrúderfej működése</i>	19
2.2. CRAFTBOT PLUS BERENDEZÉS BEMUTATÁSA	21
2.2.1. <i>Craftbot Plus műszaki paraméterei</i>	21
2.3. FDM TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREI	21
2.3.1. <i>Szál átmérő</i>	21
2.3.2. <i>Szál anyaga</i>	21
2.3.3. <i>Feldolgozási hőmérséklet</i>	22
2.3.4. <i>Nyomtatási sebesség</i>	22
2.3.5. <i>Szállirány (orientáció)</i>	22
2.3.6. <i>Ágy hőmérséklete</i>	22
2.3.7. <i>Rétegvastagság</i>	22
2.4. HIBALEHETŐSÉGEK AZ FDM ELJÁRÁSNÁL.....	22
2.5. FDM TOVÁBBI ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI.....	22
3. ALAP ÉS TÁRSÍTÓ ANYAGOK	23
3.1. POLITEJSAV (PLA)	23
3.1.1. <i>Tulajdonságok</i>	23
3.1.2. <i>Előállítás</i>	23
3.1.3. <i>Felhasználás</i>	24
3.1.4. <i>Degradáció</i>	25
3.1.5. <i>Újrahasznosítás</i>	25
3.2. SZTIROL-ETILÉN-BUTILÉN-SZTIROL (SEBS)	26
3.3. SZÉN NANOCŐ (CNT)	27
3.3.1. <i>Tulajdonságok</i>	27
3.3.2. <i>Előállítás</i>	28
3.3.3. <i>Felhasználás</i>	28
3.4. PRÓBATESTEK ANYAGA	29
3.4.1. <i>Keverési arány</i>	29
4. SZÁLGYÁRTÁS TECHNOLÓGIÁJA	30
5. NYOMTATÁS TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREI	31
5.1. HŐMÉRSÉKLET	31
6. PRÓBATESTEK VIZSGÁLATA	32
6.1. SZAKÍTÓVIZSGÁLAT	32
6.1.1. <i>Mérés elve</i>	32
6.1.2. <i>Mérési eredmények</i>	32
6.2. ÜTŐVIZSGÁLAT (CHARPY)	36

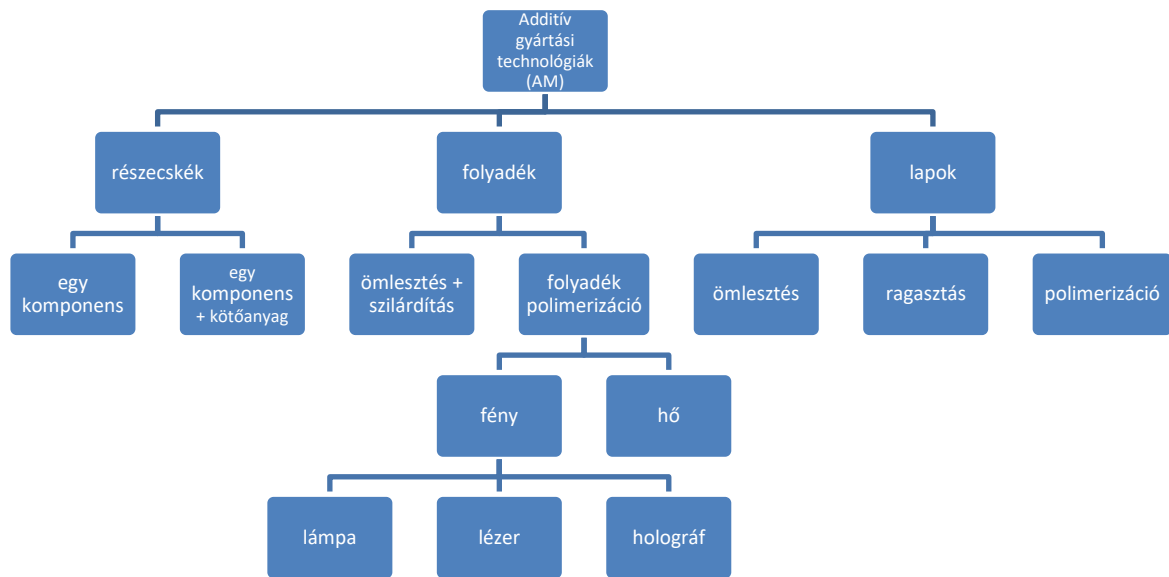
6.2.1.	<i>Mérés elve</i>	36
6.2.2.	<i>Mérési eredmények</i>	37
6.3.	HAJLÍTÓVIZSGÁLAT	39
6.3.1.	<i>Mérés elve</i>	39
6.3.2.	<i>Mérési eredmények</i>	39
ÖSSZEFOGLALÁS		44
ÁBRAJEGYZÉK		46
IRODALOMJEGYZÉK		47

Bevezetés

Additív gyártással (additive manufacturing, AM) olyan termékek is előállíthatók, melyek más technológiákkal nem, vagy csak nagyon gazdaságtalanul. A gyors prototípus gyártás (rapid prototyping, RP) legnagyobb előnye, hogy univerzális berendezéssel, gyártmánytól függetlenül gyárthatunk, a szerszámköltség (tervezés, gyártás, tesztelés) így megspórolható. Napjainkban egyre inkább terjed a 3D nyomtatás, ami már bárki számára elérhető, megfizethető. Kisebb, egyszerűbb geometriájú tárgyakat, akár, használati, akár dísz tárgyakat házilag is elő lehet állítani. Egyre többféle technológia közül lehet választani. A dolgozat az ömledékrétegezés (FDM) technológiai paramétereivel foglalkozik a termékminőség mechanikai szempontjai szerint. Napjainkban egyre inkább előtérbe kerül az anyafejlesztés, kifejezetten 3d nyomtatáshoz. A cégek ma már bíznak a technológiában, bátran alkalmazzák termékek sorozatgyártásában is. Ehhez azonban ismerniük kell az anyag feldolgozhatóságát, és anyagjellemzőit, különösen mechanikai szempontból. Dolgozatomban két, kissé eltérő erősítőanyag tartalmú nanokompozit anyagot vizsgálom meg. Ez a társító anyag többfalú karbon nanocső (MWCNT). Erősítetlen keverék vizsgálata nem tárgya a dolgozatnak, hanem csupán a két, már meglévő nyomtatóanyag. Nyomtatási (feldolgozási) paraméterek közül a nyomtatási hőmérsékletet vizsgálom, és ennek hatását a termék mechanikai tulajdonságaira.

1. Additív gyártási eljárások

Az itt tárgyalt módszerek anyag hozzáadásával, rétegenként, előgyártmány nélkül, egy digitális 3D modell segítségével állítják elő a kész terméket. Ez lehetőséget biztosít a forgács, és gyakorlatilag hulladékoktól mentes gyártásra, terméktől függő, külön szerszám nélkül, így rendkívül gazdaságos más eljárásokhoz képest. Továbbá olyan alkatrészek is gyárthatók, amik másképp, például öntéssel nem. A módszerek a hobbi dísz tárgyak készítésétől az orvosi implantátumokon át a hajóiparig sok helyen alkalmazhatóak. Az alábbi ábra az alapanyag szerinti felosztást mutatja be. [1]

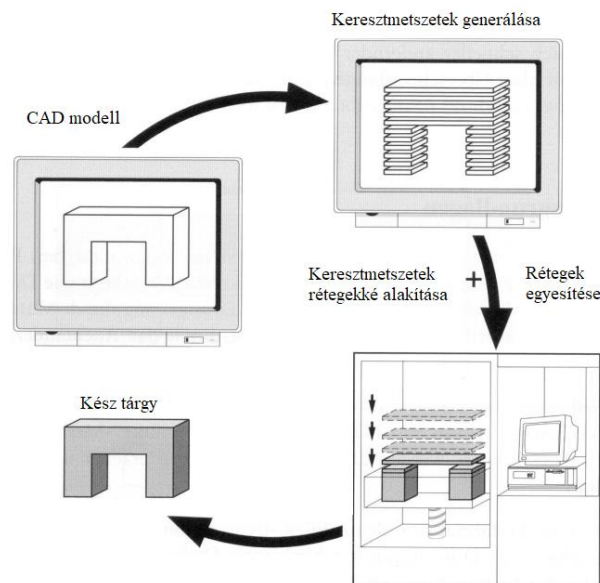


1. ábra AM eljárások csoportosítása [1]

Saját szerkesztés BME leírás nyomán.

1.1. Additív gyártás lépései

Technológiától függetlenül az eljárás az alábbi lépésekből áll: 1. 3D modell szerkesztése, 2. Szeletelés (.stl, .3ds fájlformátum) 3. Nyomtatás 4. Kész tárgy utókezelése, ha szükséges. Ezt mutatja be a 2. számú ábra. [1, 2] fordítás: saját munka.



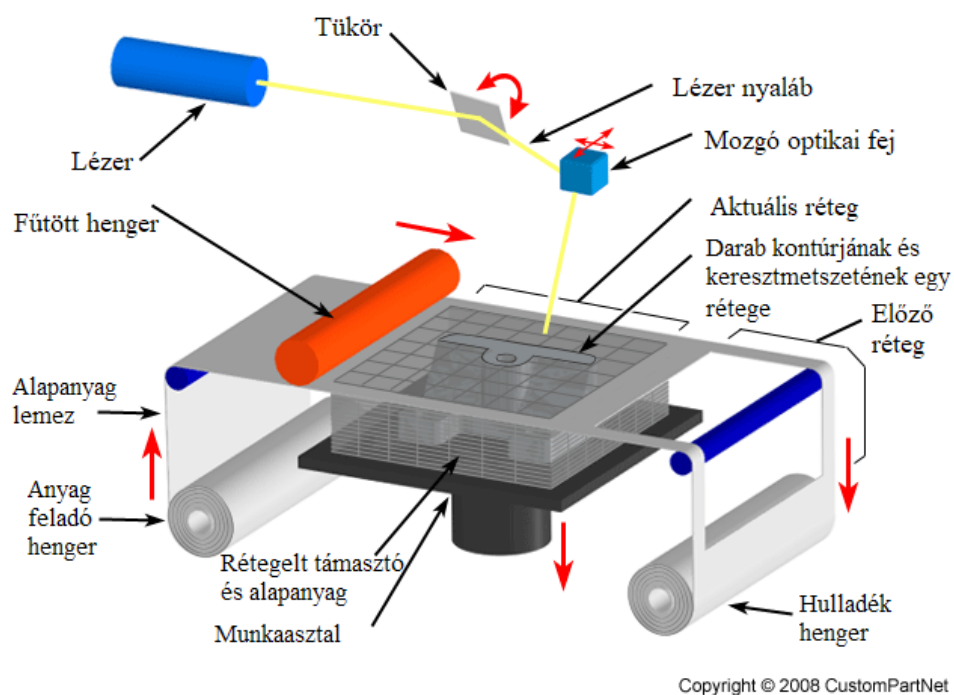
2. ábra AM eljárások lépései

A dolgozatban az alábbi eljárásokat mutatom be:

- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Stereolithography (SLA)
- Selective Laser Sintering (SLS)
 - Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Three Dimensional Printing (3DP)
 - Inkjet Printing
 - Jetted Photopolymer
- Fused Deposition Modeling (FDM)

1.2. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Rétegelt modell készítés. Az egyik legelterjedtebb eljárás. Egyszerű, olcsó, nagyméretű darabok gyárthatók vele. Rétegek egymásra ragasztásával papírból, műanyagból, vagy vékony fémlemezről dolgozik. A rétegeket a súllyeszthető asztalra terítik. A hengerrel melegítik a ragasztót, és nyomják össze a rétegeket. Utána lézerrel (vagy pengével) körbevágják a kívánt formára. Előnye olcsósága, és hogy nincs szükség támaszanyagra. Legnagyobb hátránya a korlátozott felületi minőség, és a darab vetemedési hajlama. A módszer további hátránya, hogy a rétegeknél anizotróp, mechanikailag kevésbé ellenálló, mint a rétegekre merőlegesen. [2-6]

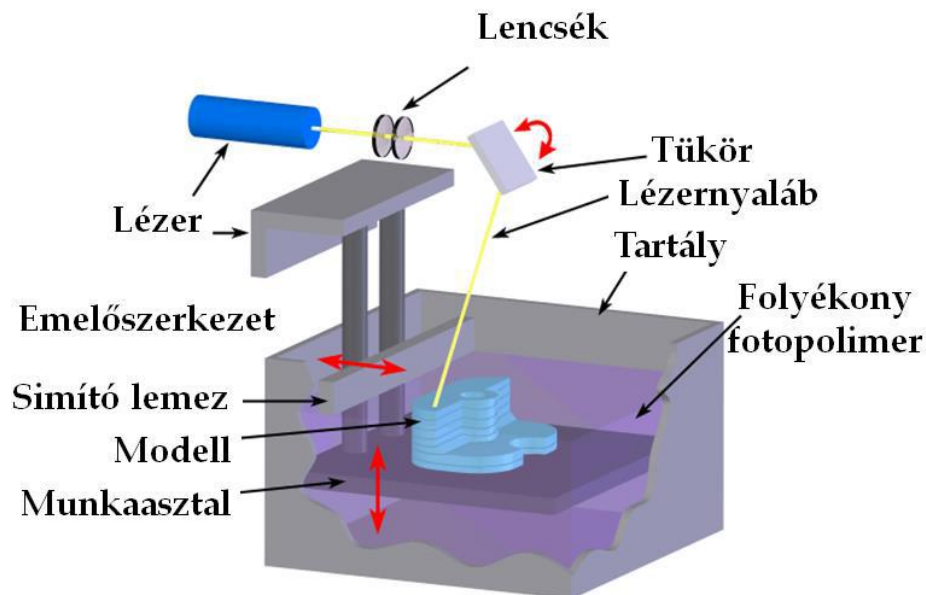


3. ábra LOM eljárás [2]

Fordítás: saját munka.

1.3. Stereolithography (SLA)

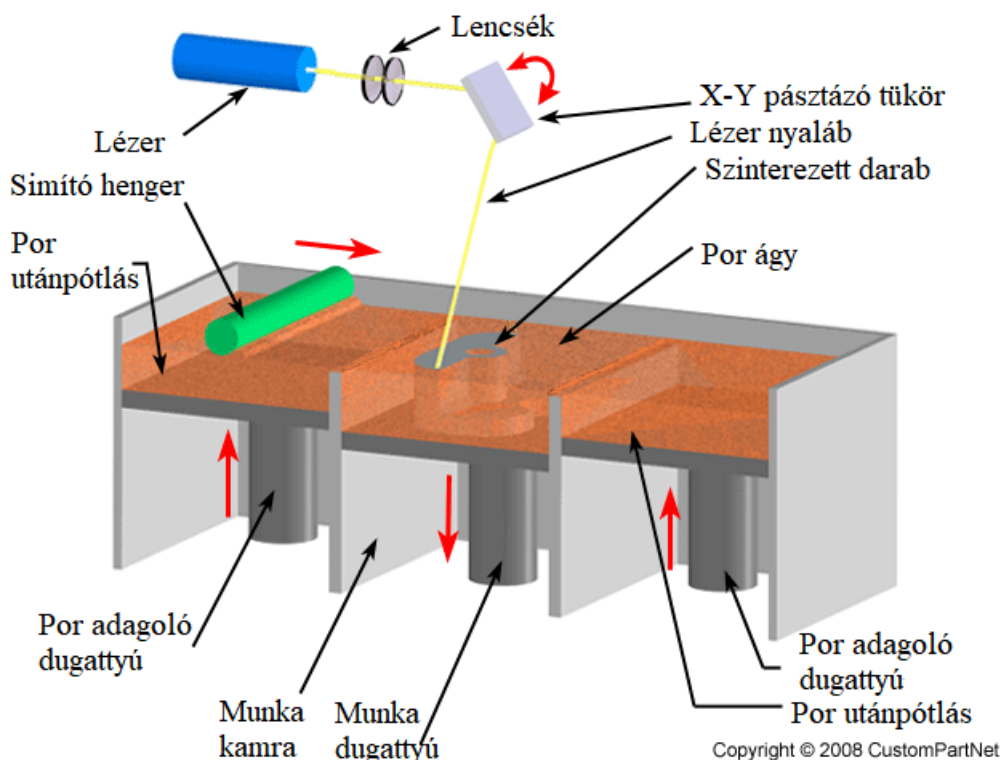
Szttereolitográfia. Folyadékból (gyantából), lézerrel dolgozik. Az alapanyag fotopolimer, gyanta. Nagyon pontos, a fel nem használt anyag újra felhasználható, ezért gazdaságos. Legrégebbi eljárás. A lézernyaláb megvilágítja a folyadék felszínét, az aktuális réteg kontúrjának megfelelően. A fotopolimerizációval megszilárdított (térhálósított) réteg a folyadékba rétegvastagságnyi süllyed, majd a zárt folyadék felszínre kezdődhet a következő réteg levilágítása. A folyamat végén a folyadékból kiemelhető a kész termék. A termék utólagos hőkezelésével érhető el a végleges szilárdság. Előnye, hogy itt nincs szükség támaszanyagra. A maradék folyadék összegyűjtve újra felhasználható a következő termékhez. A termék nem mutat anizotróp tulajdonságokat, viszont megmunkálható, például forgácsolható. Hátránya, hogy csak fotopolimer alapanyagok használhatóak, utólagos hőkezelést és tisztítást igényel, valamint a minimális falvastagság itt kb 0,5 mm. [2-6]



4. ábra SLA eljárás [1]

1.4. Selective Laser Sintering (SLS)

Szelektív lézeres szinterelés. Műanyag (PA, PC, PS)-, homok-, vagy fémporból dolgozik. Az adott keresztmetszetnek megfelelően a lézer pásztázva megolvasztja a port, ami az előző rétegre ráolvad. A munkadarab a réget vastagságnyi a porba belesüllyed, a henger friss porrétet terít a készülő modellre, majd a folyamat kezdődik előről. A fel nem használt port elszívva újra felhasználható, így igen gazdaságos, anyagtakarékos eljárás. Az alapanyagot elő kell melegíteni, és a környezetet temperálni (170-200 °C) szükséges. A kész termék minden helyen és irányban azonos szilárdságú, nincs anizotróp jellege, mentes a hibahelyektől, így nagy szilárdság érhető el. A munkaasztal és a gyártandó darabok méretétől függően egyszerre több termék is előállítható. A módszer hátránya, hogy a darabot a porágyból kell a folyamat végén kivenni, a felesleges por eltávolítása plusz munkát igényel, ami elszívás mellett végezhető. A kész terméket csak a portól kell megtisztítani, más utómunkát pl hőkezelést már nem igényel. Hátránya még, hogy inert közeget, például nitrogént igényel bizonyos esetekben. Pontossága a szemcsék átmérőjétől függ. [2-6]

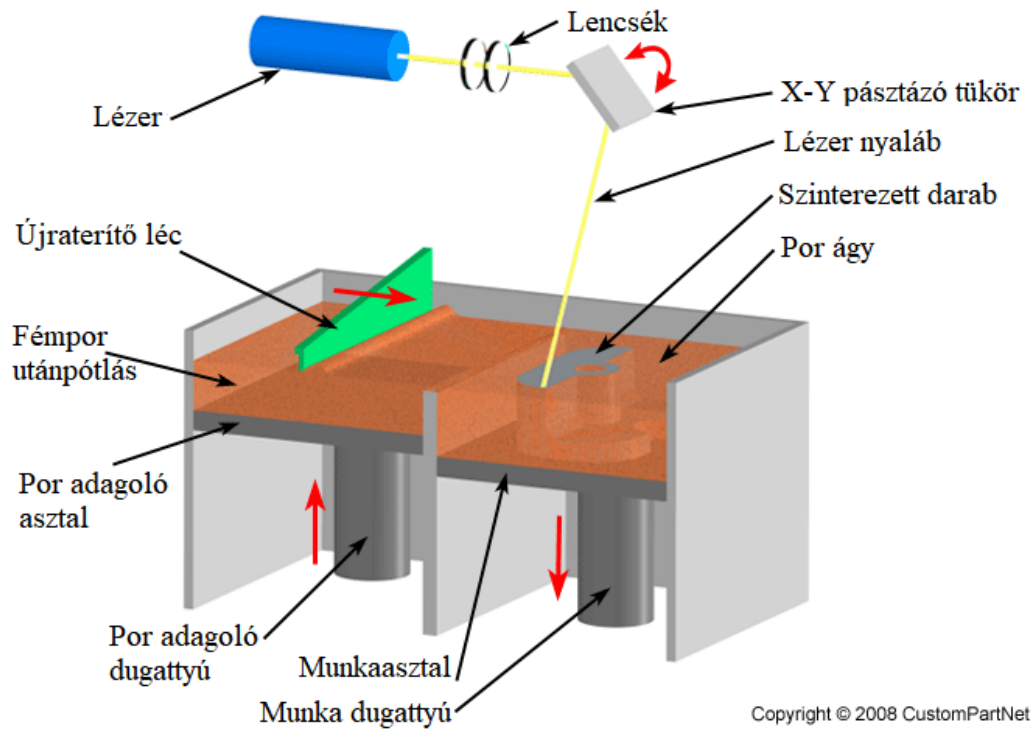


5. ábra SLS eljárás [2]

Fordítás: saját munka.

1.4.1. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Kifejezetten fémekhez kifejlesztett eljárás, működése azonos az előbbi SLS-sel.. Szinter fémporból dolgozik, ami hasonló, mint a porkohászatnál alkalmazott. Kisebb gépalkatrészek, gépelemek gyárthatók segítségével. [2-6]



6. ábra DMLS eljárás [2]

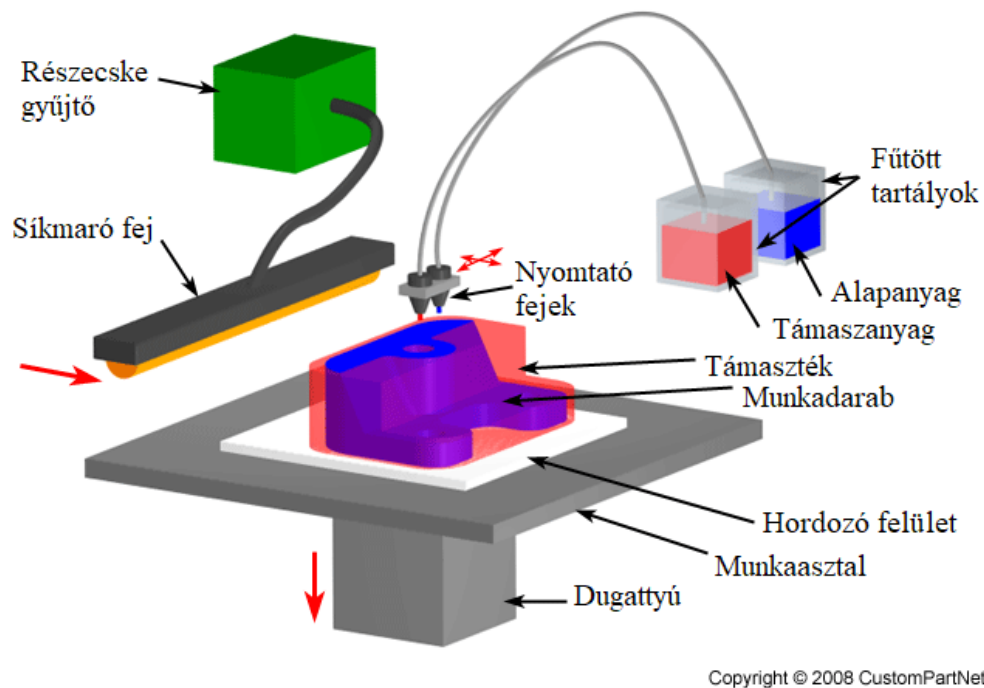
Fordítás: Saját munka.

1.5. Three Dimensional Printing (3DP)

3D-s nyomtatás. Az eljárást Massachusetts-i műszaki egyetemem, (Massachusetts Institute of Technology, MIT) az Egyesült Államokban fejlesztették ki, a költséges lézeres eljárások olcsóbb, mégis sokoldalú alternatívájaként. A módszernek több alváltozata is ismert.

1.5.1. Inkjet Printing

Az eljárás hasonló, mint a hagyományos tintasugaras nyomtatás, ám itt nem tintát, hanem ragasztóanyagot fecskendeznek a rétegekre, és ez, mint kötőanyag, szemcséket fog össze újabb réteggé. Az eljárás tehát porból dolgozik, amely megegyezik az SLS módszerrel használttal. A mozgásviszonyok is nagyon hasonlóak a korábban látottakhoz. A nyomtató fejek X-Y irányokban, a munkasíkban mozognak. Amikor egy réteg elkészült, az asztal egy réteg vastagságnyi (Z irányban) süllyed, és kezdődik az újabb réteg készítése. Gyors, egyszerű eljárás. A darabokat utólag tisztítani szükséges. Hátránya még, hogy üregek, belső felületek nehezen hozzáférhetőek, a felületi minőség, pontosság korlátozott. [2-6]

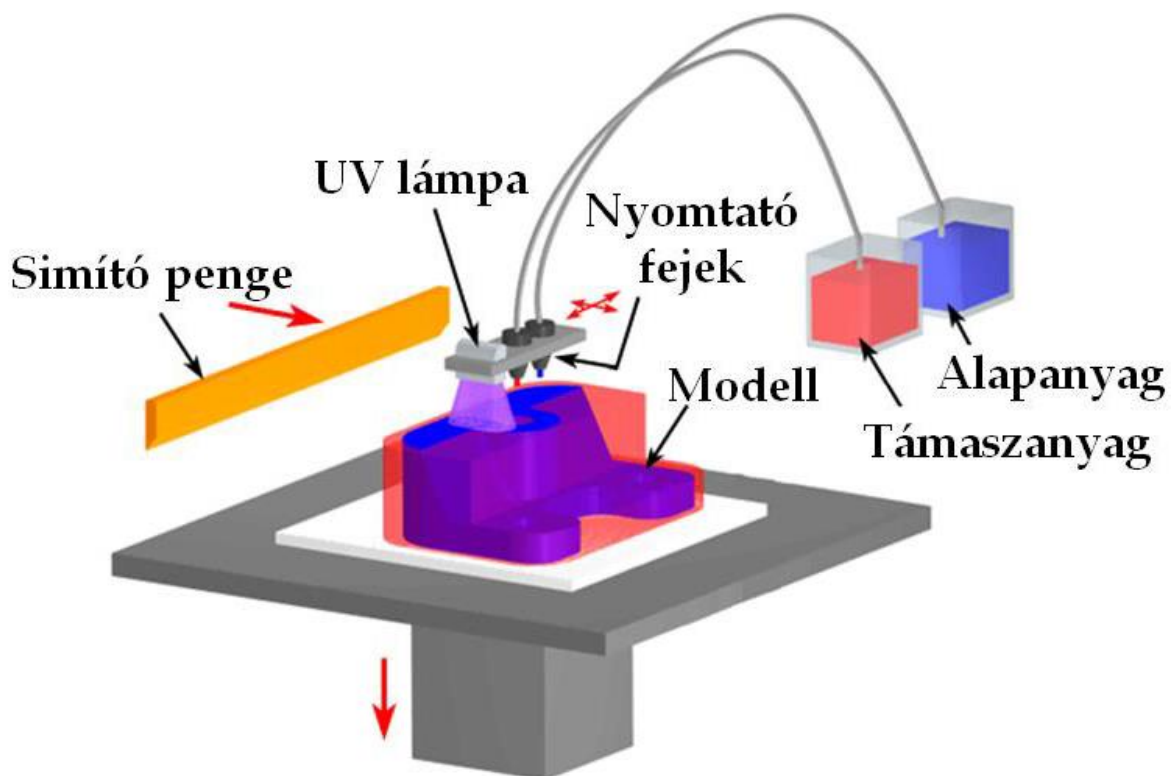


7. ábra InkJet Printing [2]

Fordítás: saját munka

1.5.2. *Jetted Photopolymer*

Ebben az eljárásban egyesítették az előbb megismert módszerek közül az SLA és a InkJet Printing előnyeit. Nem porból, hanem az SLA-nál használt műgyantából, mint a kész termék alapanyagából állítja elő a geometriát. A többi megoldásnál már megismert mozgásvizonyok mellett a gyantát UV fénnel világítja meg, ami együtt mozog a nyomtatófejjel. Amint egy réteg a helyére került, a penge lesimítja azt, az UV fény hatására pedig a fotopolimer térhálósodik, felveszi a végleges szilárdságát. A módszer támasztó anyagot is használ, ám ezt az utómunkálatoknál vízzel könnyen el lehet távolítani. Kis rétegvastagsággal, és így nagy pontossággal dolgozni képes eljárás. Előnyei, hogy jó felületi minőség, kis réteg és falvastagság érhető el vele. Hátránya, hogy csak fotopolimerrel használható, a berendezés viszonylag drága, és korlátozott a termékek szilárdsága. [1-6]



8. ábra *Jetted Photopolymer* [1]

1.6. Eljárások összehasonlítása (összefoglalás)

1. táblázat eljárások összehasonlítása

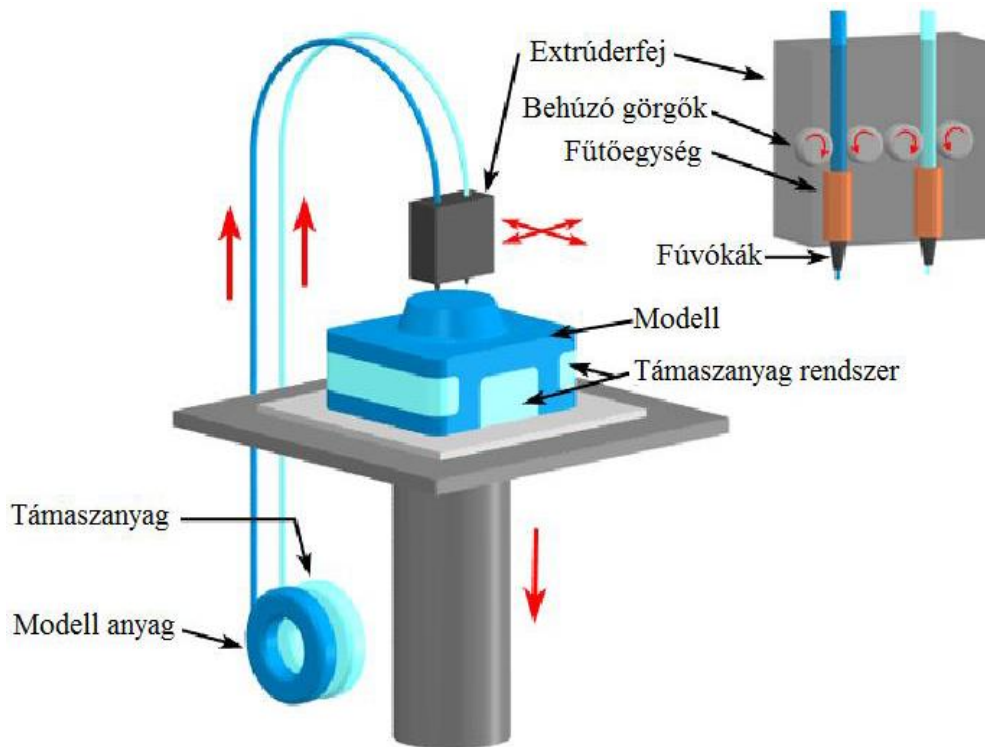
Eljárás	LOM	SLA	SLS	Ink	Jetted Photo-polymer	FDM
alapanyag	papír, fólia	fotopolimer	fém, kerámia	műanyag	fotopolimer	műanyag, viasz
alapanyag állaga	szilárd lap	folyadék, gyanta	por	por	folyadék, gyanta	szilárd huzal
energiaforrás	fűtőszál	lézer	lézer		UV lámpa	fűtőszál
pontosság	közepes	nagy	nagy	kicsi	nagy	közepes
felületi minőség	gyenge	jó	jó	gyenge	jó	közepes
utómunka	szükséges	hőkezelés	nem szükséges	szükséges	szükséges	nem szükséges

2. Fused Deposition Modeling (FDM)

Huzal leolvasztásos modellezés, Szabadalmi oltalom miatt FFF (Fused Filament Fabrication) néven is elterjedt. Magyarul mint ömledékrétegezés, szálolvasztás is ismert. Lényegében egy 3D-s extrúzió. Hőre lágyuló polimerből (polimer keverékből), vagy például viaszból dolgozó eljárás. A berendezés fő része egy X-Y síkban mozgatható mini extrúder, amiben az alapanyag megolvad, majd a fejből kilépve adott helyen megszilárdul. A fűvókát X-Y tengelyek mentén a kívánt geometria szerint mozgatják, az asztalt Z tengely mentén süllyeszti, így az ömledéket egymásra rétegezve kialakul a munkadarab végleges formája. Napjainkban eléggé elterjedt, olcsó. A dolgozat ezen eljárásra épül, a próbatesteket ezzel gyártjuk le. A dolgozatban leginkább mint műanyagfeldolgozási eljárást tárgyalom, de az orvostechnikától az élelmiszeriparig sok helyen használják még, ez azonban meghaladja a dolgozat kereteit. Előnye, hogy nem igényel utókezelést, és hogy az egyik legolcsóbb alapanyagból gyárthatunk, akár hulladék újrafeldolgozásával is. Olcsó, egyszerű, kis méretű berendezést igényel. Nem keletkeznek gázok, vagy sugárzás, mivel nem lézertípussal dolgozik. Hátránya, hogy kevésbé pontos, és a felületi minőség sem a legjobb. Bordák, vagy keskeny résen előállítása problémás vele. [2-7]

2.1. FDM berendezés felépítése, működése

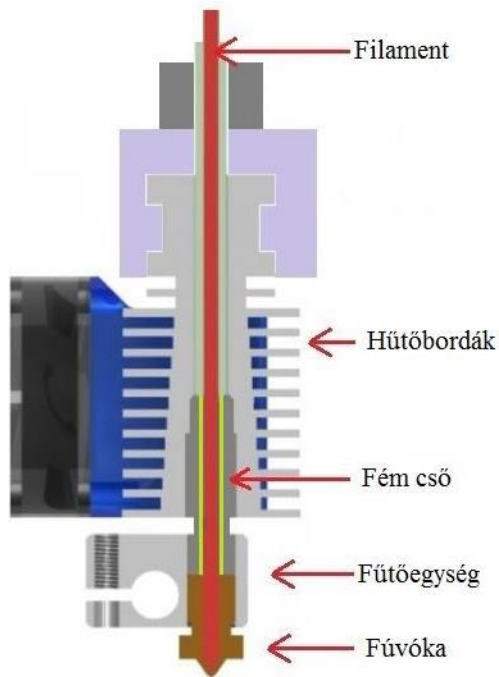
A vízszintes tárgyasztal függőleges (Z) irányban mozgatható. Ennek felülete a kívánt hőmérsékletre, mint technológia paraméter temperálható. Erre készül el a termék. Az asztal felett az extrúderfej függ, mely oldal irányban (X és Y) mozog. Az extrúderfej mozgása adja a nyomtatási sebességet. Amikor egy réteg elkészült, az asztal egy réteg vastagságnyi lecsúsz, és kezdődhet a következő réteg nyomtatása. A berendezést a 9. ábrán láthatjuk. [1-7]



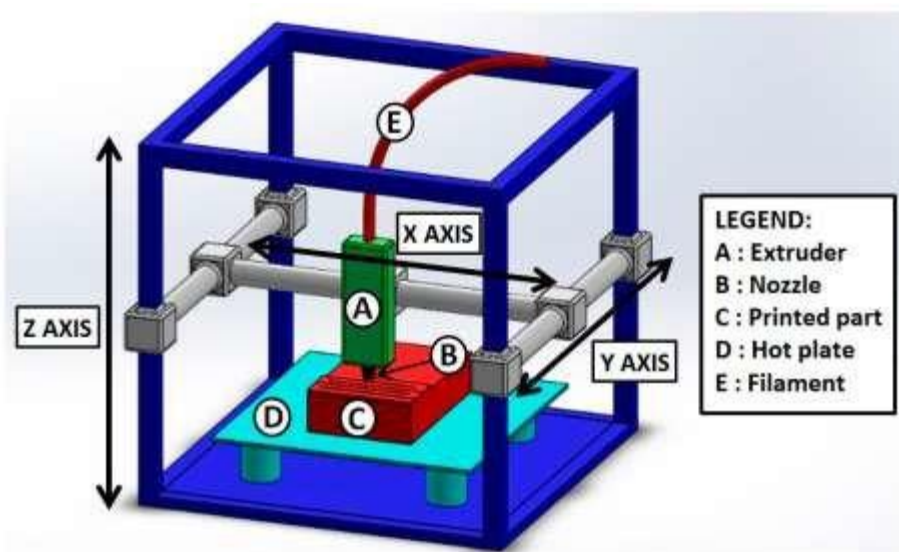
9. ábra FDM eljárás vázlata [1]

2.1.1. Extrúderfej működése

Az extrúderfej görgők segítségével húzza be a szobahőmérsékletű filamentet. Innen a hűtőbordával körbevett acél csövön keresztül a fűtőegységbe jut, ahol megömlik. A fűtőegység hőmérséklete a legfontosabb technológiai paraméter. Az ömladék a fúvókán át a tárgyasztalra jut, ahol néhány tized másodperc alatt megszilárdul.



10. ábra Extrúderfej [1]



A: Extrúder B: Fűvóka C: Nyomtatott (gyártott) munkadarab

D:Fűtött munkaasztal E:Filament

11. ábra FDM berendezés felépítése [8]

A 11. ábra egy FDM berendezés általános felépítését mutatja be. Jól láthatóak az X és Y vízszintes-, és a Z függőleges transzlációs tengelyek.

2.2. Craftbot Plus berendezés bemutatása

A dolgozathoz a magyar Craftunique cég Craftbot Plus berendezését használtam könnyű hozzáférhetősége, és elérhető ára miatt, valamint a Tanszéken ez volt rendszeresítve. A szerkezet egy extrúderrel rendelkezik, így egyszerre csak egyféle anyagot tud nyomtatni. Külön támasztékot igénylő, vagy két színű, két anyagú terméket nem tud előállítani, felső-középkategóriásnak számít.

2.2.1. *Craftbot Plus műszaki paraméterei*

Alkalmazott technológia: Fused Filament Fabrication (FFF) / FDM

Munkatér mérete: 25x20x20 cm (magasság × szélesség × hosszúság)

Réteg felbontás:

- 100 mikron (ultra fokozat)
- 200 mikron (magas fokozat)
- 300 mikron (közepes fokozat)

Pozicionálási pontosság: X és Y irányban 4 mikron, Z irányban 2 mikron.

Filament névleges átmérője: 1,75 mm

Fúvóka átmérője: 0,4 mm

Nyomtatási sebesség tartomány: 50-200 mm/s (fokozatmentesen állítható)

Működési hőmérséklet: 15-32 °C

Fúvóka hőmérséklet tartománya: 180-260 °C

Munkaasztal hőmérséklet tartománya: 50-110 °C

Működési feszültség: 100-240 V AC @ 50-60 Hz

Maximális villamos teljesítmény 360 W

Berendezés tömege: 17 kg. [9]

2.3. FDM technológiai paraméterei

2.3.1. *Szál átmérő*

1,75 és 2,85 mm a két szabványos átmérő, amely forgalomban van, vagy gyártható.

2.3.2. *Szál anyaga*

Hőre lágyuló alapanyagok feldolgozhatóak, megfelelő folyási index esetén.

2.3.3. Feldolgozási hőmérséklet

A feldolgozási hőmérséklet az anyagtól függ. Alacsony hőmérsékletnél nem olvad össze kellően, magas hőmérséklet esetén viszont degradálódhat, vagy viszkozitás csökkenés léphet fel. A degradáció elkerülése szempontjából előnyös a rövid tartózkodási idő.

2.3.4. Nyomtatási sebesség

A szálak összeforrását befolyásolja, valamint a termék gépidejét, és így a gyártási idő ráfordítást. Optimumot kell találni a termék minősége, és a gyártási kapacitás között.

2.3.5. Szálirány (orientáció)

Az orientáció döntően befolyásolja a termék mechanikai szilárdságát, és meghatározza annak anizotróp tulajdonságát is.

2.3.6. Ágy hőmérséklete

Az ágy (tárgyasztal) az a felület, amire a munkadarab elkészül. Hőmérséklete a tapadás miatt fontos. Ha hideg, a darab nem tapad meg. Ha forró, az anyag nem szilárdul meg.

2.3.7. Rétegvastagság

Nagyobb rétegvastagsággal növelhető a termelékenység, azonban durvább szerkezetet kapunk. Itt is optimumra van szükség e két követelmény között.

2.4. Hibalehetőségek az FDM eljárásnál

Magas feldolgozási hőmérséklet: Alapanyag degradálódik.

Alacsony feldolgozási hőmérséklet: Nem forrnak kellőképp össze a rétegek.

Nedves alapanyag: Durva felület.

Nyomtatási sebesség: Nem forr kellőképp össze a réteg.

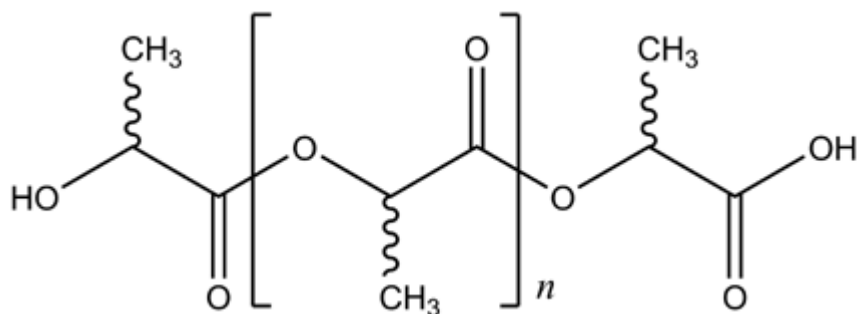
2.5. FDM további alkalmazási lehetőségei

A technológiát a műanyag/kompozit ipar mellett az élelmiszeriparban, gépiparban, egészségügyben is alkalmazzák. Kisebb gépalkatrészekről a fog implantátumig rendkívül széles az alkalmazási lehetőségek skálája.

3. Alap és társító anyagok

3.1. Politejsav (PLA)

A politejsav (Polylactic acid, PLA) biológiai úton lebomló, hőre lágyuló műanyag, melyet magas keményítőtartalmú növényekből kivont dextrózból állítanak elő. Elsősorban gabonafélékből (kukorica, rizs, búza), tejsavas erjesztéssel és polikondenzációval, vagy pedig a dilaktid polimerizációjával (gyűrűfelnyitás útján). [10]



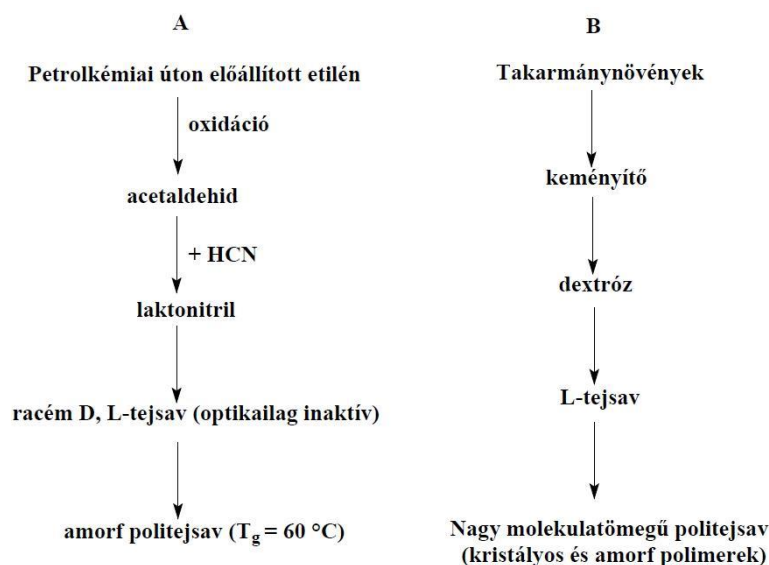
12. ábra Politejsav molekula [10]

3.1.1. Tulajdonságok

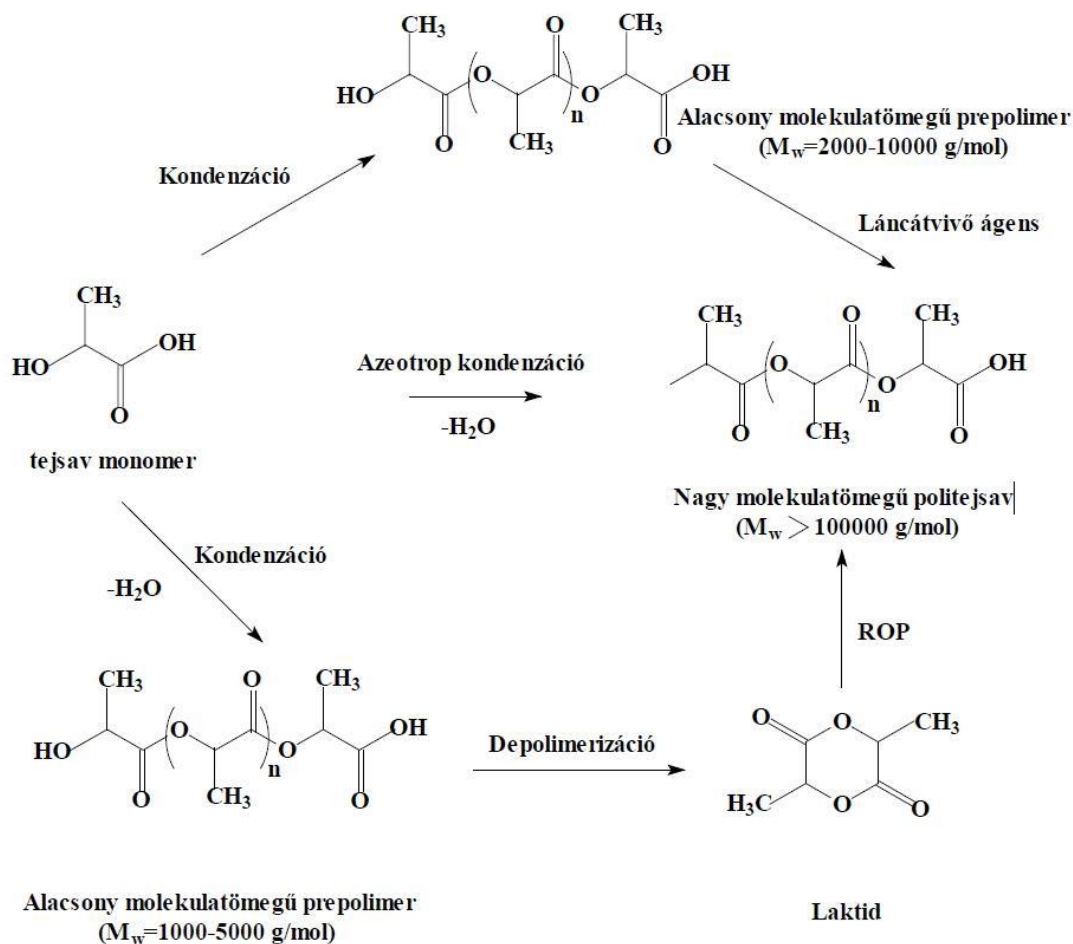
A PLA kristályos szerkezetű, rideg polimer, ezért gyakran lágyítószert adagolnak hozzá. Esetünkben SEBS polimer hozzáadásával javítjuk ezt a kedvezőtlen tulajdonságát. Küllemre önmagában áttetsző, fényesen csillogó. Mechanikai tulajdonságai: húzószilárdsága 60-65 MPa, szakadási nyúlás 3-5% Sűrűsége 1,25 g/cm³. [11]

3.1.2. Előállítás

Kétféle módon állítható elő. Petrolkémiai úton (A) vagy fermentációval (B). Ezen eljárásokat a 13. ábra mutatja be. A PLA-t nagy tömegben állítják elő az iparban.



13. ábra PLA előállítás két módszere [10]



14. ábra PLA előállítás lépései [10]

Az 14. ábrán a tejsav monomer polimerizációját láthatjuk.

3.1.3. Felhasználás

Széleskörű feldolgozhatóság jellemzi: a 3d nyomtatás mellett (szálhúzás) alkalmas fóliafűvásra, hőformázásra, fröccsfűvásra is. Folyási indextől függően egyes típusai fröccsönthetőek is. A PLA 80°C -on hegeszthető. [11]

Eldobható használati tárgyak, poharak, csomagolóanyagok, tehát olcsó tömegműanyagok képezik az egyik fő felhasználási területét. Az élelmiszeripar és az orvostechika, gyógyszeripar remek aromazáró tulajdonságát is kihasználja. A másik nagy terület a használati tárgyak, dísz tárgyak 3D nyomtatással való előállítása. A PLA az ABS mellett a legnagyobb volumenben felhasznált alapanyag, mivel számos előnye van. Tetszőlegesen színezhető, fényes, sima felületű késztermékek gyárthatók belőle. Ha a technológia alkalmas rá, éles sarkú tárgyak is nyomathatók. Azon kívül nagyobb nyomtatási sebességre is képes. [10-12]

3.1.4. Degradáció

Három bomlási folyamatban vehet részt.

- Hidrolízis
- Hő hatására való bomlás
- Fotodegradáció (UV fény)

Biológiailag lebomlik, komposztálható. Ez a folyamat szobahőmérsékleten igen lassú, ezért ipari megoldással gyorsítva végzik. A kérdéses polimer megfelelő feltételek megléte esetén képes mérgező melléktermékek és maradék nélkül, biológiailag lebomlani. Ezek a következők: Adott polimert lebontani képes baktériumok jelenléte, legalább 70 °C környezeti hőmérséklet, magas, minimum 70%-os párateltség. [11]

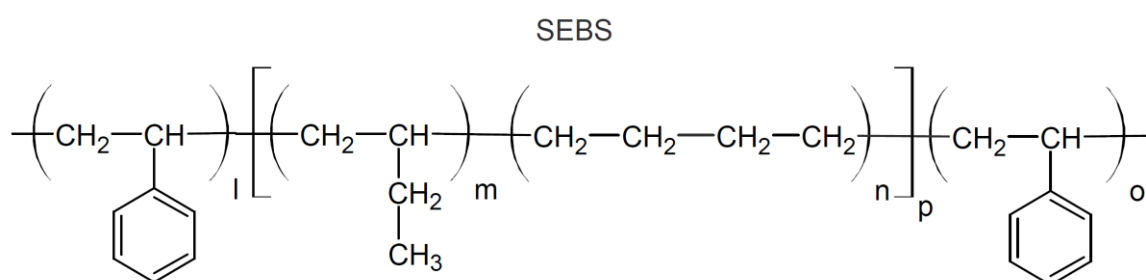
3.1.5. Újrahasznosítás

Az újrahasznosításra a következő módokon van lehetőség:

- Újrafeldolgozás kémiai úton. Monomerére bontással.
- Komposztálják.
- Elégetik
- Hulladéklerakóban deponálják.

3.2. Sztírol-etilén-butilén-sztírol (SEBS)

Termoplasztikus elasztomer. A PLA ridegségét kompenzálendő keverjük bele a nanokompozitba. A sztírol-etilén-butilén-sztírol, más néven SEBS, egy hőre lágyuló elasztomer (TPE), amely úgy viselkedik, mint a gumi, anélkül, hogy vulkanizálna. A SEBS nagyon rugalmas, kiváló hő- és UV-állósággal rendelkezik, és könnyen feldolgozható. Sztírol-butadién-sztírol kopolimer (SBS) részleges és szelektív hidrogénezésével állítják elő, ami javítja a hőstabilitást, az időjárással és az olajjal szembeni ellenállást, és a SEBS-t gőzzel sterilizálhatóvá teszi. A hidrogénezés azonban rontja a mechanikai tulajdonságokat és növeli a polimer költségét.



15. ábra SEBS molekula [13]

A SEBS elasztomereket gyakran keverik más polimerekkel a teljesítményük javítása érdekében. Gyakran olajat és töltőanyagokat adnak hozzá a költségek csökkentése és/vagy a tulajdonságok további módosítása érdekében. Ütésállóság növelésére használják műszaki hőre lágyuló műanyagokhoz, valamint átlátszó polipropilén (PP) szívósságának növelésére. Fontos alkalmazásai közé tartoznak az ömledékes nyomásérzékeny ragasztók, játékok, cipőtálpak és TPE-adalékolt bitumen termékek útburkolati és tetőfedő anyagként. [13, 14]

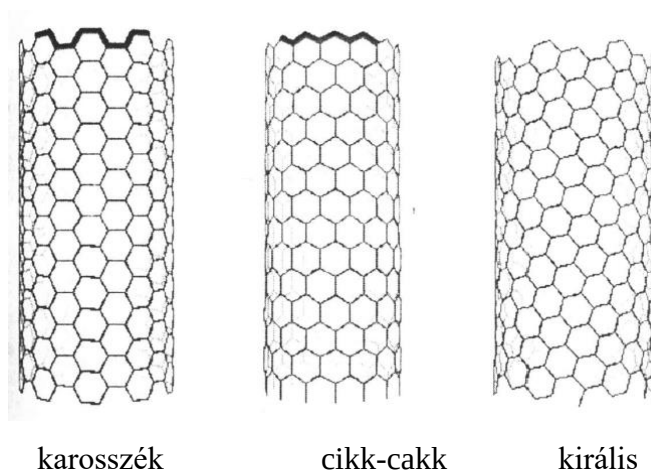
3.3. Szén nanocső (CNT)

A szén nanocsővek a karbon egyik allotróp módosulatából, fullerénéből épülnek fel. A szénatomok hexagonális elrendezésűek. Ezek olyan kvázi egydimenziós (hosszuk sokszorosa átmérőjüknek) megjelenései a karbon makromolekuláknak, melynek nagy tudományos, és technikai érdeklődésre tartanak számot az 1990-es évektől napjainkig. Különleges mechanikai, kémiai, hőtani, és villamos tulajdonságokkal bírnak. A dolgozat a mechanikai tulajdonságukat kutatja nanokompozit erősítőanyagként történő felhasználásuk esetén. Szerkezetük alapján lehetnek:

- Egyfalú (SingleWall CNT)
- Többfalú (MultiWall CNT)

Az általam vizsgált esetben MWCNT-t alkalmaztam erősítőanyagként. Három alaptípusa ismeretes, melyek az 16. ábrán láthatóak:

- karosszék
- cikk-cakk
- királis



16. ábra CNT alap típusok [15]

3.3.1. Tulajdonságok

Mechanikai tulajdonságai közül kiemelkedő szakítószilárdsággal rendelkeznek, ebből a szempontból a legerősebb szál készíthető belőle. Rugalmassági modulusa is kiemelkedően magas értékű. Kiváló villamos vezető, társító anyagként az egyébként szigetelő anyagok is vezetővé tehetők vele. Villamos szempontból átmenetet képez a fémes vezetők, és a félvezetők között. Típustól függően fémes vezetőként, vagy félvezetőként is viselkedhetnek. A mikroelektronikai iparban nagyon nagy jövő áll előtte, mivel mikroprocesszorokban az

eddig ismert félvezetőket kiválthatja a jövőben, mivel néhány nanométeres, atomi méretű tranzisztor készíthető belőle. Kiváló hővezető.

3.3.2. Előállítás

- Magashőmérsékletű eljárások
 - Ívkisülés
 - Lézeres elpárologtatás
- Szénhidrigének katalikus bontása (CVD)

3.3.3. Felhasználás

Nanokompozitokban már kis tömegszázalékban is nagymértékben képesek javítani annak mechanikai, vagy más tulajdonságát. [15]

3.4. Próbatetek anyaga

A vizsgált próbatetek PLA-SEBS-MWCNT keverék nanokompozitból készültek. Erősítetlen, CNT-t nem tartalmazó anyagféleségek vizsgálata nem tárgya a dolgozatnak. A PLA mint mátrix, a SEBS mint a mátrix lágyítószer, az MWCNT pedig mint erősítő anyagok vannak jelen. A keverés eloszlató keverés volt.

3.4.1. Keverési arány

Az egyes komponensek az alábbi arányban találhatók meg a keverékben:

- Politejsav (PLA) **98,94 m/m%, illetve 98,9 m/m%**
NatureWorks Ingeo Biopolymer 7032D
- Többfalú szén nanocső (MWCNT) **0,06; illetve 0,1 m/m%**
A 10% NC7000 többfalú karbon nanocsőt tartalmazó Nanocyl Plasticyl SEBS1001, SEBS alapú mesterkeverékből.
- Sztírol-etilén-butilén-sztírol (SEBS) **1 m/m%**
A MEGOL DP2758/6/47 UVR és a Nanocyl Plasticyl SEBS1001 mesterkeverék SEBS tartalma közösen alkotja.

Kétféle teverési aránnyal dolgoztam, az első esetben 0,06 tömegszázalékos MWCNT aránnyal, a második esetben pedig 0,1 m/m% volt a nanocső aránya. A nagyobb erősítő anyag tartalomtól azonos nyomtatási hőmérséklet mellett jobb mechanikai tulajdonságok várhatók.

4. Szálgyártás technológiája

A filament előállítása (szálhúzása) a tanszéken található Brabender plastograph extrúderrel történt. A keverést IDMX független meghajtású mixerrel végezték. Az alapanyagot az extrúzió előtt ki kellett szárítani 60 ° C-on, ez körülbelül négy órát vett igénybe. A kiszáritott granulátum keverék a Brabender etető extrúder adagolójába került, ez végezte a megömlesztést, ez után került át az anyag a mixerbe, ahol a szén nanocső el tudott keveredni. A mixerből jött ki a szál, és az így legyártott extrudátum egy görgőkkel ellátott vizes kádban átvezetve lett lehűtve. Majd hűtés után az átalakított (kiszerezelt vágófejű) granulálón (Collin Teach-Line CSG171T) futott keresztül. Ezt követően a csévélő gép a potméterén beállított sebességgel húzta át a filament szálát. Filament átmérőjének szabályozása miatt fontos a húzási sebesség, mivel ezen méretnek 1,7-1,8 mm közé kell esnie, hogy a nyomtató azt képes legyen feldolgozni. A vastagságot folyamatosan ellenőrizni szükséges, tolómérő segítségével. Végezetül pedig a készterméket az ehhez készített műanyag dobra feltekercselték.

5. Nyomtatás technológiai paraméterei

Kutatásom során a hőmérséklet hatását vizsgáltam az adott keverék mechanikai tulajdonságaira. A vizsgálatok első körében csak a hőmérsékletet változtattam. Majd ahol valamely tulajdonság kedvező maximuma mutatkozott, ott a sebesség változtatásával a későbbiekben megvizsgálható, hogy ez még javítható-e, vagy éppen ellenkezőleg, más nyomtatási sebesség károsan befolyásolja a termék szilárdságát adott hőmérséklet és összetétel esetén. A nyomtatási sebesség 30 mm/szekundum volt. Az orientáció minden esetben hosszirányú volt, mivel ez ad felvilágosítást magára az anyag jellemzőire. Más, például kereszt irányban csak az összehegedést lehetne vizsgálni.

5.1. Hőmérséklet

Hőmérsékletet 210, 220, 230, 240 °C. Ahol egy valószínűsíthető maximum miatt szükséges volt, ott egy 5 °C-os lépcsőt is kipróbáltam (225 °C).

6. Próbatetek vizsgálata

A mechanikai vizsgálathoz, az ütővizsgálatot kivéve az INSTRON 3366 univerzális anyagvizsgáló berendezést használtam. A következő méréseket hajtottam végre:

- Szakítóvizsgálat
- Charpy ütővizsgálat
- Hajlítóvizsgálat

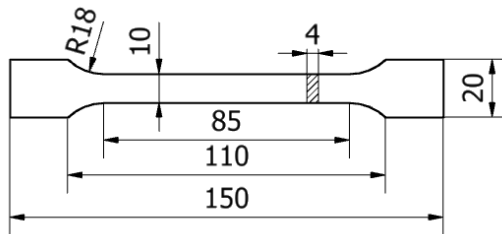
6.1. Szakítóvizsgálat

6.1.1. Mérés elve

A vizsgálat célja a nanokompozit húzó igénybevétellel szembeni ellenállásának vizsgálata. A próbatestet két szakítófej közé befogják, az egyiket rögzítik adott helyzetben, a másikkal pedig egyenletes sebességgel húzzák a mintát. Közben mérik a húzóerőt, az elmozdulást, és az időt. Az adatokat elmozdulás-erő diagramon ábrázolva kapjuk a szakító diagramot. Ebből feszültség, illetve nyúlás értékek számíthatóak, amik anyagi jellemzők. [17]

6.1.2. Mérési eredmények

Elsőre a szabvány piskóta alakú próbatestet vizsgáltam, ami a 17. ábrán látható.



17. ábra Piskóta alakú szakító próbatest

Saját munka. (Autodesk Inventor)



18. ábra Rendellenesen tönkrement próbatest a leszakadt fejjel

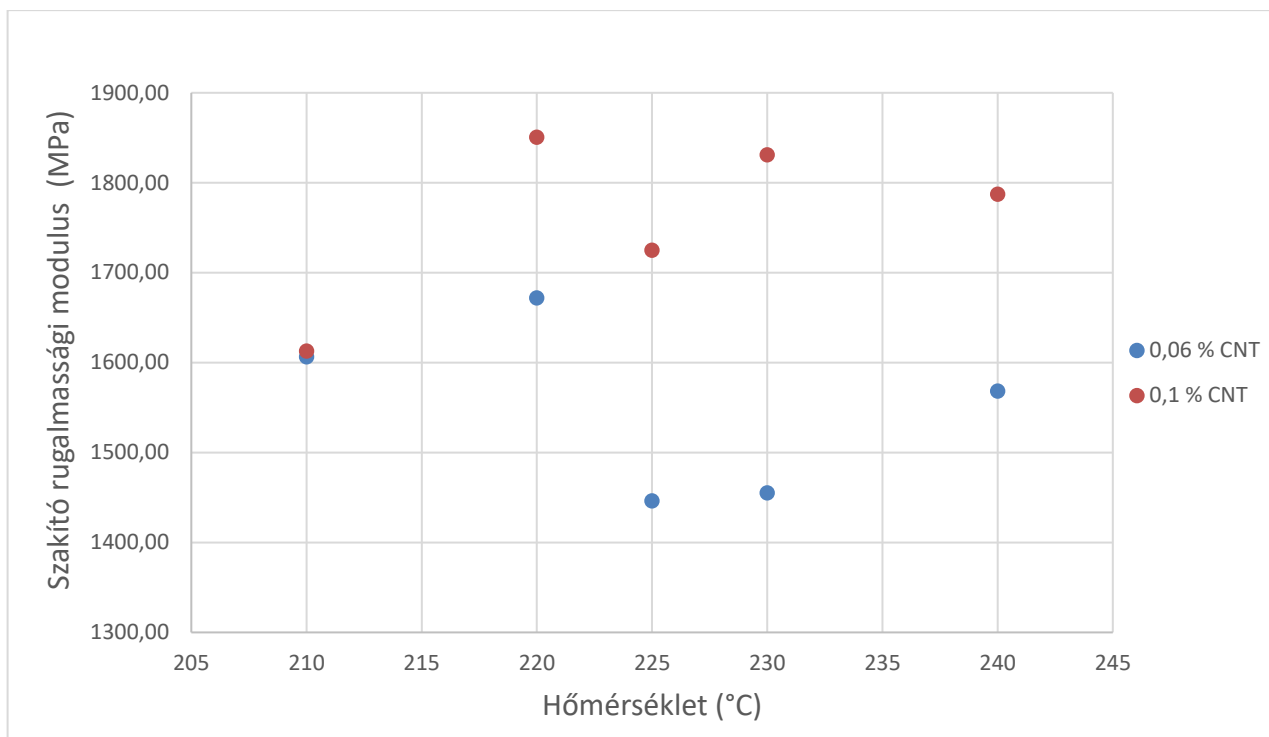
Ez azonban a szakításkor rendellenesen viselkedett, a befogásnál a fej rész leszakadt, így az eredmények értékelhetetlenek lettek, ezt a 18 ábra mutatja.

A vizsgálatot új modell alapján készült, „fej nélküli” szakító próbatestekkel megismételtem. Ez már sikerrel zárult, a minták közepén, vagy a befogásnál, de egyenletesen szakadtak el, a teljes keresztmetszetet terhelve. Az alábbi anyagi jellemzőket határoztam meg:

- Szakadás pillanatában mért feszültség (MPa)
- Szakító rugalmassági modulus (MPa)
- Maximális feszültséghez tartozó nyúlás (%)

2. táblázat Szakító rugalmassági modulus és hőmérséklet kapcsolata

CNT %	T (°C)	Young modulus húzásra (MPa)	szórás (MPa)
0,06	210	1606,50	322,44
0,06	220	1672,00	69,11
0,06	225	1446,25	133,16
0,06	230	1455,00	91,87
0,06	240	1568,25	71,12
0,1	210	1612,75	113,44
0,1	220	1850,50	108,96
0,1	225	1724,75	139,71
0,1	230	1831,00	72,65
0,1	240	1787,25	50,83

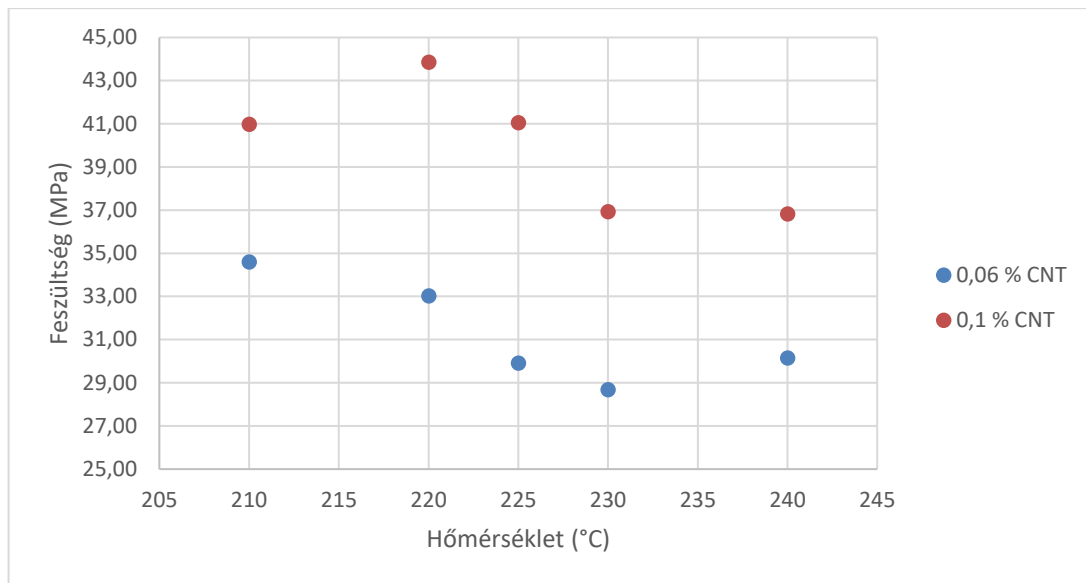


19. ábra Szakító rugalmassági modulus és hőmérséklet kapcsolata

A legalacsonyabb vizsgált hőmérsékleten, 210 °C-on minimális a különbség, azonban magasabb hőmérsékleten a nagyobb CNT tartalom nagyobb rugalmassági moduluszt eredményez. Mind a két esetben 220 °C-on láthatunk egy látszólagos maximumot. Hőmérséklet szempontjából a túl alacsony és a túl magas is károsan befolyásolhatja a termék vagy próbatest minőségét.

3. táblázat Szakadás pillanatában mért feszültség és hőmérséklet kapcsolata

CNT %	T (°C)	Rm (MPa)	szórás (MPa)
0,06	210	34,60	4,91
0,06	220	33,03	0,58
0,06	225	29,90	1,23
0,06	230	28,68	1,32
0,06	240	30,15	1,16
0,1	210	40,98	0,41
0,1	220	43,85	0,46
0,1	225	41,05	1,11
0,1	230	36,93	0,63
0,1	240	36,83	0,76

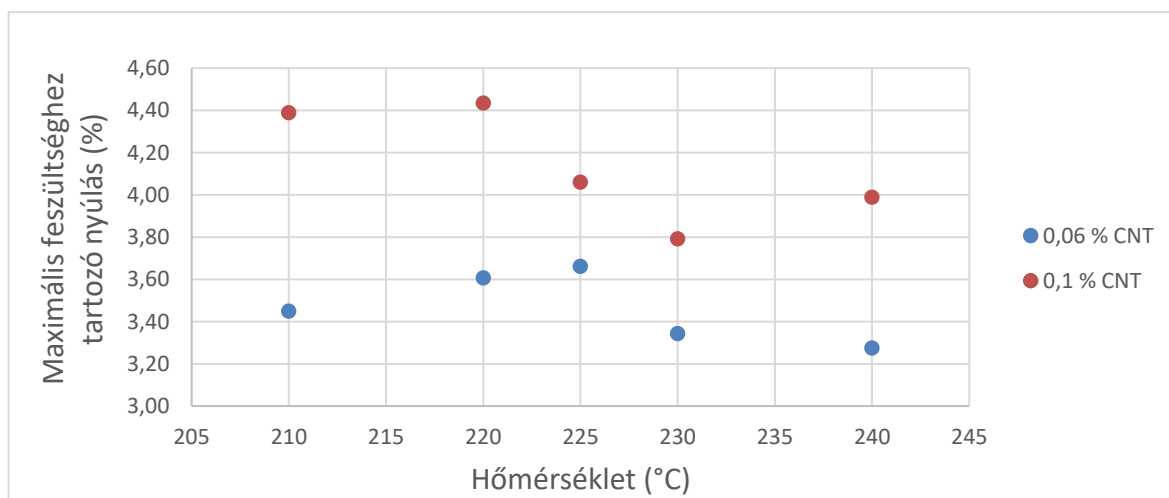


20. ábra Szakadás pillanatában mért feszültség és hőmérséklet kapcsolata

A hőmérséklet növelésével a szilárdság mindkét mintánál csökken, a két lefutás nagyon hasonló. Különbség a csökkenés kezdetében, illetve a maximum értékében van. 0,06 % erősítő anyag tartalomnál a maximum 210 °C-on, 0,1 % nanocső tartalomnál 220 °C-on található. Nagyobb CNT tartalom azonos hőmérsékleten nagyobb szilárdságot eredményez. A csökkenés oka a magas hőmérsékleten bekövetkező viszkozitás változás lehet, jobban megfolynak a szálak, így elvékonyodhatnak, csökkentve a hasznos összehegedő felületet.

4. táblázat Maximális feszültséghez tartozó nyúlás és hőmérséklet kapcsolata

CNT %	T (°C)	Maximális feszültséghez tartozó nyúlás (%)	szórás (%)
0,06	210	3,45	0,67
0,06	220	3,61	0,15
0,06	225	3,66	0,31
0,06	230	3,34	0,46
0,06	240	3,28	0,20
0,1	210	4,39	0,08
0,1	220	4,44	0,37
0,1	225	4,06	0,17
0,1	230	3,79	0,23
0,1	240	3,99	0,09



21. ábra Maximális feszültséghez tartozó nyúlás és hőmérséklet kapcsolata

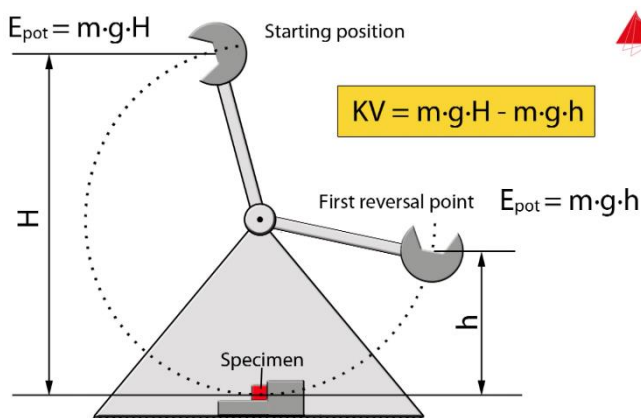
Magasabb nanoanyag tartalom kicsivel nagyobb nyúlást eredményez minden hőmérsékleten. Globális maximum 0,1 % CNT tartalomnál 220 °C-on, 0,06 %-nál 225 °C-on mérhető. A maximumig enyhe emelkedés, majd csökkenés látható.

6.2. Ütővizsgálat (Charpy)

6.2.1. Mérés elve

A mérés lényege, hogy egy adott méretű próbatestet rögzítünk, és ismert tömegű, és így ismert mozgási energiájú kalapáccsal megütünk. Az ütés után a kalapács tovább lendül, ennek magasságát mérve meghatározható a maradó mozgási energia. Ezt kivonva a kezdő pozícióhoz tartozó helyzeti energiából kapjuk az ütőmunkát. (Korrektcióként figyelembe

vesszük a súrlódást a csapágyazásnál.) [17] A méréshez Ceast Impactor II. berendezést használtam.



22. ábra Ütővizsgálat vázlatja [18]

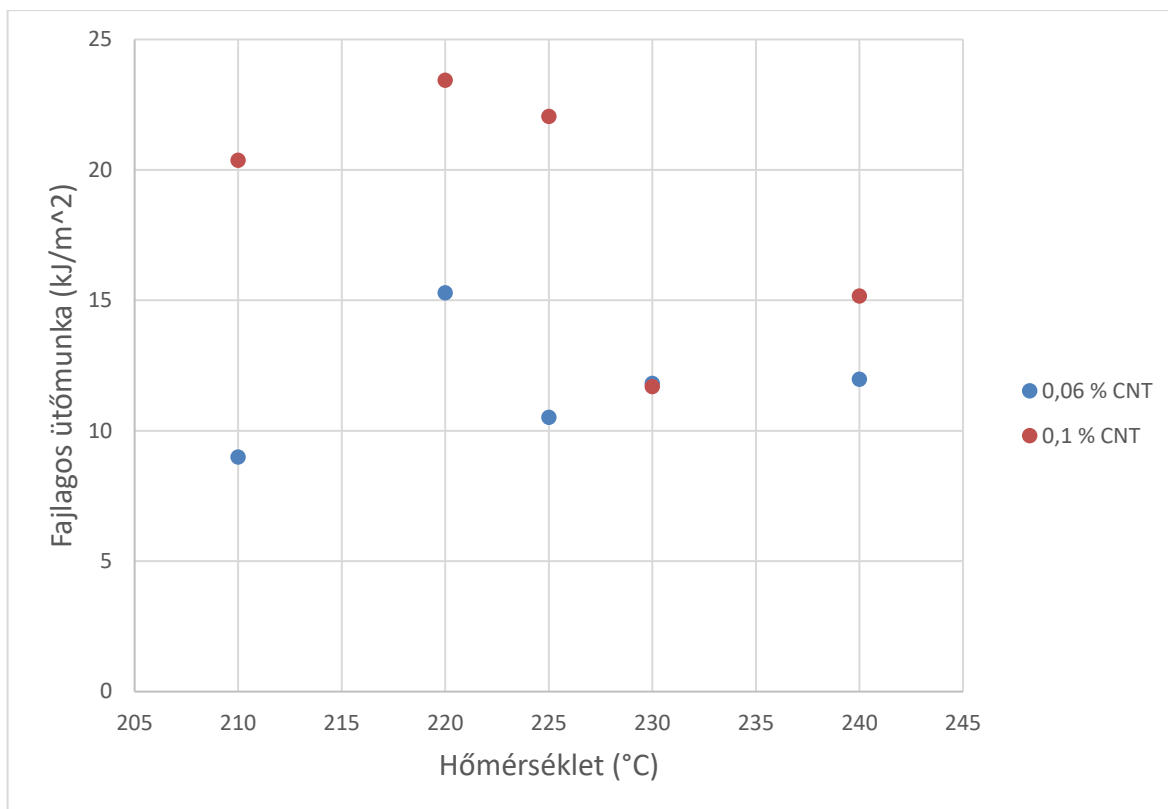
$KV = m \cdot g \cdot H - m \cdot g \cdot h$. H : kalapács indulási magassága, h = kalapács azon helyzete, ahol az első lendülés után jutott, és ahonnan már visszafelé lendül. $h < H$.

6.2.2. Mérési eredmények

A Charpy-féle ütővizsgálatot bemetszés nélküli próbatestekkel végeztem. A vizsgálatához az 5 J-os kalapácsot használtam. A mért ütőmunka értékeket az 5. táblázat mutatja.

5. táblázat Ütővizsgálat eredményei

CNT %	T (°C)	Re (kJ/m ²)	szórás (kJ/m ²)
0,06	210	8,99	1,25
0,06	220	15,29	4,60
0,06	225	10,51	1,20
0,06	230	11,81	1,48
0,06	240	11,97	1,37
0,1	210	20,36	5,16
0,1	220	23,43	6,21
0,1	225	22,04	6,80
0,1	230	11,69	4,45
0,1	240	15,17	1,80



23. ábra Nyomtatási hőmérséklet és fajlagos ütőmunka kapcsolata

210 és 225 $^{\circ}\text{C}$ -nál mintegy duplája a fajlagos ütőmunka. 230 $^{\circ}\text{C}$ -nál azonban a méréseim szerint a két érték igen közel kerül egymáshoz. Ütőmunka maximuma mindkét keveréknél 220 $^{\circ}\text{C}$. A túl alacsony hőmérséklet kedvezőtlen a szálak összetapadása szempontjából, míg a túl magas hőmérséklet a viszkozitás csökkenéséhez, a szálak elvékonyodásához vezet, és így mindkét eset rontja a dinamikus hatásokkal szembeni ellenálló képességet.



24. ábra Próbatetek ütővizsgálat után

6.3. Hajlítóvizsgálat

6.3.1. Mérés elve

A vizsgálat célja a darab hajlítással szembeni ellenállásának számszerű vizsgálata. A mérés során a darabot a két végénél adott távolságra alátámasztják, majd középen egyre növekvő erővel nyomják. Közben mérik az erőt, és a deformáció (lehajlás) mértékét. [17]

6.3.2. Mérési eredmények

A hárompontos hajlító vizsgálathoz a Charpy-vizsgálatnál is használt próbatesteket használtam fel. Ezzel a vizsgálattal a következő anyagi jellemzőket határoztam meg:

- Hajlító rugalmassági modulus.
- Maximális hajlító feszültség
- Maximális hajlító feszültséghez tartozó deformáció

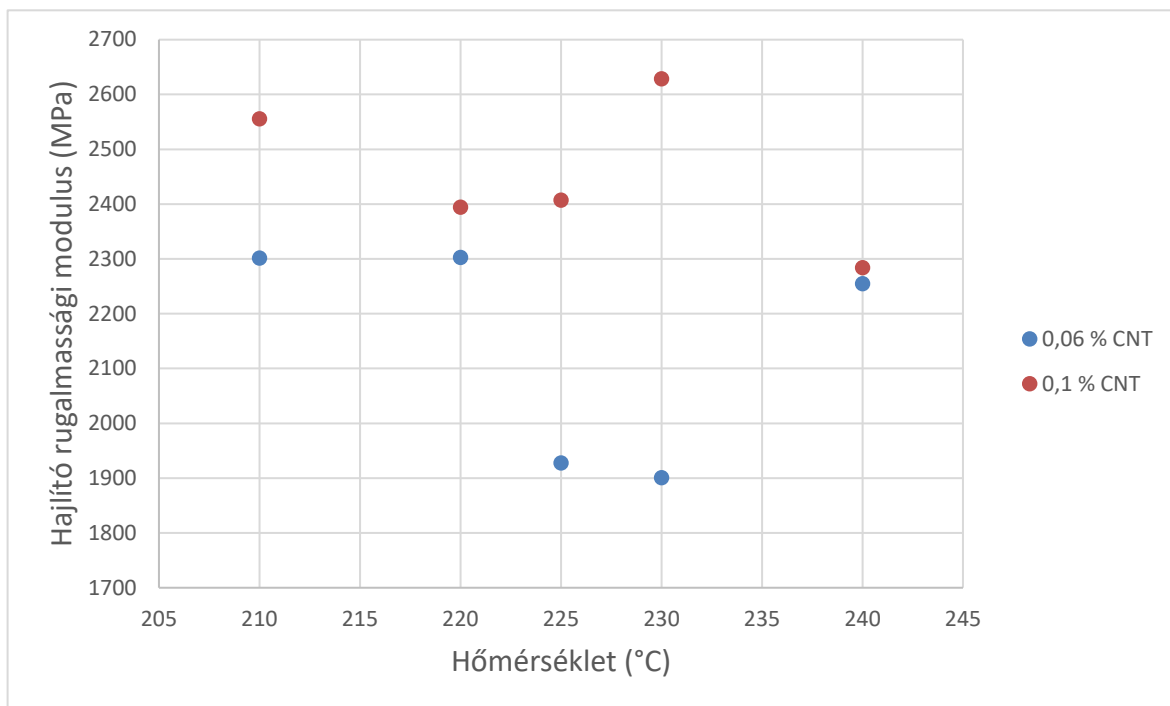


25. ábra Hajlítóvizsgálat közben

6. táblázat Hajlító rugalmassági modulus mért értékei

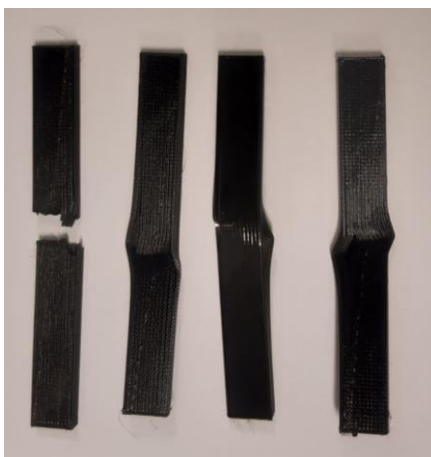
CNT %	T (°C)	Hajlító rugalmassági modulus (MPa)	szórás (MPa)
0,06	210	2302	77,20
0,06	220	2302,75	50,01
0,06	225	1927,67	158,54
0,06	230	1901	143,82
0,06	240	2255	119,65
0,1	210	2555,75	47,49
0,1	220	2394,75	49,88
0,1	225	2407,25	164,11

0,1	230	2628,75	49,09
0,1	240	2284,5	109,89



26. ábra Nyomtatási hőmérséklet és hajlító rugalmassági modulus kapcsolata

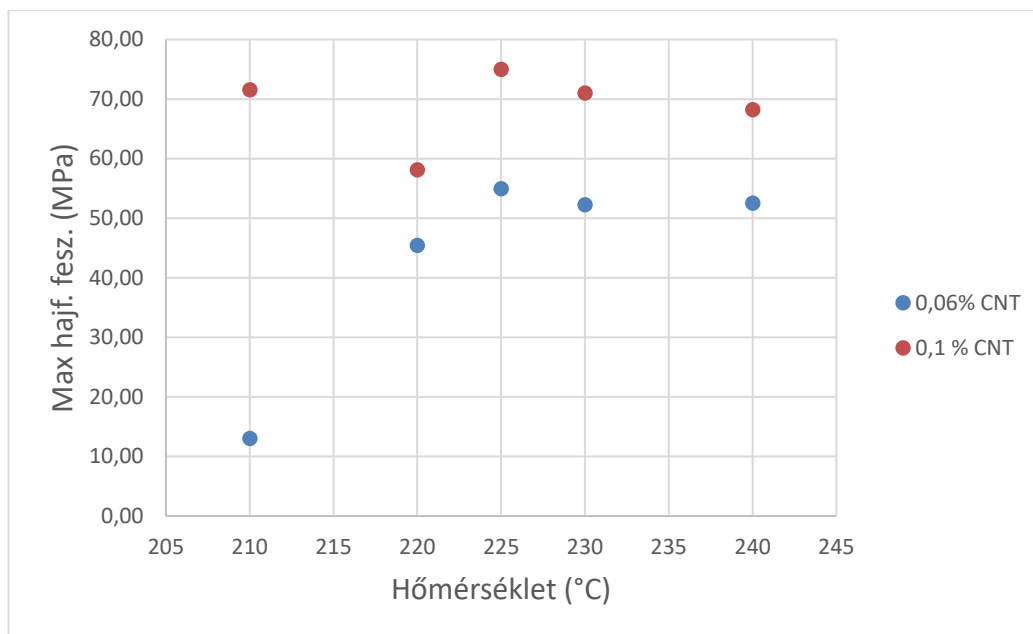
Hajlító rugalmassági modulus minden esetben nagyobb a magasabb CNT tartalom esetén. 0,06 m/m% CNT tartalomnál a hőmérséklet hatására 210 és 220 °C-on nem változik a rugalmassági modulus, később viszont csökken. A 0,1 m/m%-os erősítőanyag tartalmú minta viszont másképp viselkedik. 210 és 220 °C-között látszólag csökken, majd maximuma 230 °C-nál mérhető. Ez után lecsökken a 0,06 m/m%-os mintáénál kissé magasabb szintre. Ha a szórásokat is figyelembe vesszük, akkor elmondható, hogy a 0,1%-os minta rugalmassági modulusa 230 °C-ig gyakorlatilag nem változik, csak utána következik be a csökkenés. Ennek bizonyítására a 235 °C-on nyomtatott mintát is vizsgálni lenne szükséges. Optimumnak tehát 0,06 m/m% CNT tartalomnál a 220, 0,1 m/m% -os keveréknél pedig a 230 °C feldolgozási hőmérséklet tűnik. Ha mindkét anyagból kell gyártani, jó kompromisszum a 240 °C, ahol kis különbség mutatkozik a magasabb erősítő anyag tartalom javára. Itt azonban a termék esztétikailag már feltétlenül felel meg az elvárásoknak, mivel erősen szálát húz a túl alacsony viszkozitás miatt.



27. ábra Hajlított próbatestek

7. táblázat Maximális hajlító feszültség eredményei

CNT %	T (°C)	Maximális hajlító feszültség (MPa)	szórás (MPa)
0,06	210	13,02	1,62
0,06	220	45,45	5,06
0,06	225	54,92	3,91
0,06	230	52,24	3,23
0,06	240	52,53	3,19
0,1	210	71,52	5,84
0,1	220	46,08	7,04
0,1	225	74,99	5,17
0,1	230	71,02	1,13
0,1	240	68,20	1,79



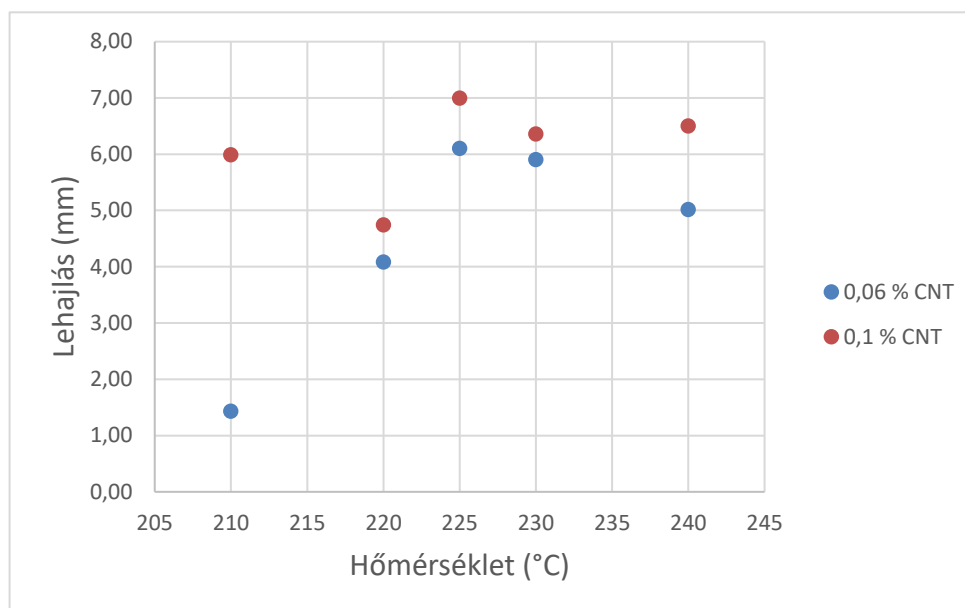
28. ábra Nyomtatási hőmérséklet és hajlító feszültség kapcsolata

Maximális hajlító feszültség minden esetben nagyobb a magasabb CNT tartalom esetén. 220 °C-nál csak kis különbség mérhető. Maximum mindkét keveréknél 225 °C-nál, utána kis mértékben csökken, később stagnál. 0,1%-nál úgy tűnik, hogy minden érték kb. 70 MPa körül helyezkedik el, vagyis a nyomtatási hőmérséklet változására nem reagál. 0,06%-nál 225°C-ig növekszik és csak utána áll be kb. 50-60 MPa közé. A 0,06%-os minták jól mutatják a hőmérséklet növelés, és így a jobb összehegedés hatását, viszont a nagyobb CNT tartalom képes ezt áthidalni és kompenzálni. Nagyobb erősítő anyag tartalomnál tehát már alacsonyabb hőmérsékleten is nagyobb szilárdság érhető el.

8. táblázat Maximális deformáció mért értékei

CNT %	T (°C)	lehajlás (mm)	szórás (mm)
0,06	210	1,44	0,23
0,06	220	4,09	0,44
0,06	225	6,11	0,08
0,06	230	5,91	0,04
0,06	240	5,02	0,16
0,1	210	5,99	0,76
0,1	220	5,22	0,69
0,1	225	7,00	0,26

0,1	230	6,36	0,15
0,1	240	6,51	0,23



29. ábra Nyomtatási hőmérséklet és maximális deformáció (lehajlás) kapcsolata

Magasabb CNT tartalomhoz nagyobb deformációk, lehajlások tartoznak. Mindkét keverék maximuma 225 °C-on mérhető, és itt viszonylag közel vannak egymáshoz. A 0,06%-os minták jobban csökkennek távolodva a maximumtól, mint a 0,1%-osak, viszont mindkettőnél a magasabb hőmérséklet irányába enyhébb a csökkenés, mint az alacsonyabb hőmérséklet felé. A magasabb hőmérséklet az összehegedés szempontjából még mindig előnyösebb, mint az alacsonyabb hőmérséklet, legalábbis hajlító igénybevétel esetén.

Összefoglalás

Dolgozatomban bemutattam az additív gyártás néhány aspektusát, és a főbb 3d nyomtatási technológiákat, áttekintést adva azok előnyeikről, hátrányaikról, valamint az ömledékrétegezési eljárást részletesen bemutatva. Láthattuk egy nanokompozit szálanyag gyártását, és FDM eljárással gyártott próbatestek mechanikai vizsgálatait.

Megállapítottuk, hogy a szén nanocső minden mechanikai tulajdonságot javít, akár már kis mennyiségi különbséggel is jelentős termék jellemző javulás érhető el. Optimális feldolgozási hőmérséklet az erősítőanyagtól, és attól függ, mely termék jellemzők fontosak. Ha az esztétikai szempontok előbbre valók, mint a mechanikaiak, úgy érdemes alacsonyabb hőmérsékleten gyártani, mivel a magasabb hőmérséklet alacsonyabb viszkozitást és ezért szálasodást, a termékről lelógó vékony szálakat eredményezett. Mechanikai szempontból lehetőség van optimalizálni ütőmunkára, szakító szilárdságra, hajlító szilárdságra is. Ezeknek az optimumai közel estek egymáshoz, volt, amikor meg is egyeztek. A termék konkrét kialakítása, és igénybevételei mellett szempont még az alapanyag ára, hozzáférhetősége. Napjainkban kulcskérdés lett az energiahatékonyság. Nem mindegy ugyanis, hogy mennyi energia befektetésével, mekkora villamos teljesítmény felvételével gyártunk. Ezt is nyomtatási hőmérséklet beállításával szabályozhatjuk. Itt is található tehát egy optimum a termék minőség és a gyártási költség között.

A dolgozatban kifejezetten a CNT, mint erősítő anyag szerepét vizsgáltam. Ebből két összetételt próbáltam ki 3d nyomtatóanyagként. Nem volt tehát cél erősítetlen keverék tesztelése.

A dolgozat eredményei még pontosíthatók a 215, és 235 °C-on gyártott darabok vizsgálatával. Újabb feldolgozási paraméter lehet még a nyomtatási sebesség. Azaz vizsgálható, hogy globális maximum esetén egy gyorsabb, illetve lassabb sebességgel lehet-e még további javulást elérni a mechanikai tulajdonságokkal. Valamennyi próbatest 30 mm/sec sebességgel készült. Érdemes lehet kipróbálni ennek felét, illetve dupláját is. Nagyobb sebességnél jelentősen csökkenne a gyártás időszükséglete, ami az iparban egy fontos gyártás gazdaságossági tényező. Amennyiben a mechanikai tulajdonságok nem romlanak, úgy mindenképp érdemes így gyártani. Ha azonban azt találnánk, hogy kisebb sebesség mellett jelentősen javul, nagyobbban pedig romlik a termék minőség, úgy az egyedi gyártásnál lehet haszna ennek az eredménynek.

További vizsgálati lehetőségek a kérdéses anyagokkal például a nyomó-, és a differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) vizsgálatok. Előbbivel szintén mechanikai,

utóbbival eddig nem vizsgált, kémiai, és fizikai, fázisállapotbeli változásokat tudnánk vizsgálni.

Mivel a vizsgálat során az alapanyag összetétele pontosan ismert, és valamennyi próbatest törmelékét összegyűjtöttem, érdekes további vizsgálat tárgya lehet, hogy hogyan befolyásolja az itt megismert tulajdonságokat az újrafeldolgozás.

Ábrajegyzék

1. ábra AM eljárások csoportosítása [1]	9
2. ábra AM eljárások lépései	10
3. ábra LOM eljárás [2]	11
4. ábra SLA eljárás [1]	12
5. ábra SLS eljárás [2]	13
6. ábra DMLS eljárás [2]	14
7. ábra InkJet Printing [2]	15
8. ábra Jetted Photopolymer [1]	16
9. ábra FDM eljárás vázlata [1]	19
10. ábra Extrúderfej [1]	20
11. ábra FDM berendezés felépítése [8]	20
12. ábra Politejsav molekula [10]	23
13. ábra PLA előállítás két módszere [10]	24
14. ábra PLA előállítás lépései [10]	24
15. ábra SEBS molekula [13]	26
16. ábra CNT alap típusok [15]	27
17. ábra Piskóta alakú szakító próbatest	32
18. ábra Rendellenesen törékment próbatest a leszakadt fejjel	32
19. ábra Szakító rugalmassági modulus és hőmérséklet kapcsolata	34
20. ábra Szakadás pillanatában mért feszültség és hőmérséklet kapcsolata	35
21. ábra Maximális feszültséghez tartozó nyúlás és hőmérséklet kapcsolata	36
22. ábra Ütővizsgálat vázlata [18]	37
23. ábra Nyomtatási hőmérséklet és fajlagos ütmunka kapcsolata	38
24. ábra Próbatestek ütővizsgálat után	38
25. ábra Hajlítóvizsgálat közben	39
26. ábra Nyomtatási hőmérséklet és hajlító rugalmassági modulus kapcsolata	40
27. ábra Hajlított próbatestek	41
28. ábra Nyomtatási hőmérséklet és hajlító feszültség kapcsolata	42
29. ábra Nyomtatási hőmérséklet és maximális deformáció (lehajlás) kapcsolata	43

Irodalomjegyzék

- [1] http://www.pt.bme.hu/segedletek/b4_kisszerias_v38.pdf Megtekintve: 2022.10.09.
 - [2] https://www.researchgate.net/publication/350374850_A_Review_paper_on_3D-Printing_Aspects_and_Various_Processes_Used_in_the_3D-Printing Megtekintve: 2022.09.01.
 - [3] Dr. Takács János (szerk.) és mtsai – Gyártásautomatizálás BME, 2012.
<https://dtk.tankonyvtar.hu/handle/123456789/12645> Megtekintve: 2022.09.01.
 - [4] Dr. Kátai László és mtsai - CAD Tankönyv, 15. fejezet: Perifériális technológiák, Gyors prototípus gyártás, 2012 <https://dtk.tankonyvtar.hu/handle/123456789/7943> Megtekintve: 2022.11.02.
 - [5] <http://www.cnc.hu/2012/12/additiv-technologiak-korkep/> Megtekintve: 2022.11.01.
 - [6] <http://www.tferi.hu/3d-nyomtatás> Megtekintve: 2022.11.01.
 - [7] Alkaios Bournias Varotsis: Introduction to FDM Printing,
<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/?action=> Megtekintve: 2022.08.10.
 - [8] https://www.researchgate.net/figure/Typical-FDM-machine-design-with-a-printed-part-on-an-immovable-print-bed-hot-plate_fig4_338712290 Megtekintve: 2022.11.10.
 - [9] https://help.craftbot.com/wp-content/uploads/2022/02/CraftBot_User-Manual_2016-03-21_EN-1.pdf Megtekintve: 2022.11.10.
 - [10] Bodnár Ildikó – Potenciális biodegradális, politejsav bázisú polimerek szintézise és vizsgálata 2002
<http://www.chem.science.unideb.hu/DoktIsk/Ertekezések/KDI026/KDI026full.pdf> Megtekintve: 2022.07.01.
 - [11] Égésigátolt politejsav habok előállítása szuperkritikus szén-dioxiddal segített extrúzióval <http://real.mtak.hu/54118/1/11.pdf> Megtekintve: 2022.07.01.
 - [12] [Overview of materials for Polylactic Acid \(PLA\) Biopolymer \(matweb.com\)](https://matweb.com/Overview-of-materials-for-Polylactic-Acid-(PLA)-Biopolymer) Megtekintve: 2022.02.17.
 - [13] <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/SEBS.html> Megtekintve: 2022.02.17.
 - [14] <https://www.mexpolimeros.com/eng/sebs.html> Megtekintve: 2022.02.17.
 - [15] Kónya Zoltán, Bíró László Péter, Hernádi Klára, B. Nagy János, Kiricsi Imre: Szén nanocsövek előállítása, tulajdonságai és alkalmazási lehetőségei.
 - [16] Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban (Szerk.: Dr. Kalácska Gábor) Gödöllő 2007.
 - [17] <https://dtk.tankonyvtar.hu/handle/123456789/3039> Megtekintve: 2022.11.10.
20. oldal, ütővizsgálat
46. oldal, húzóvizsgálat
54. oldal, hajlítóvizsgálat

- [18] https://z4y6y3m2.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2017/04/Charpy_Impact_Machine_002.png
Megtekintve: 2022.11.10.