



B4/E4/M4/T9

Változat: 2.0

Kiadva: 2019. szeptember 11.

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

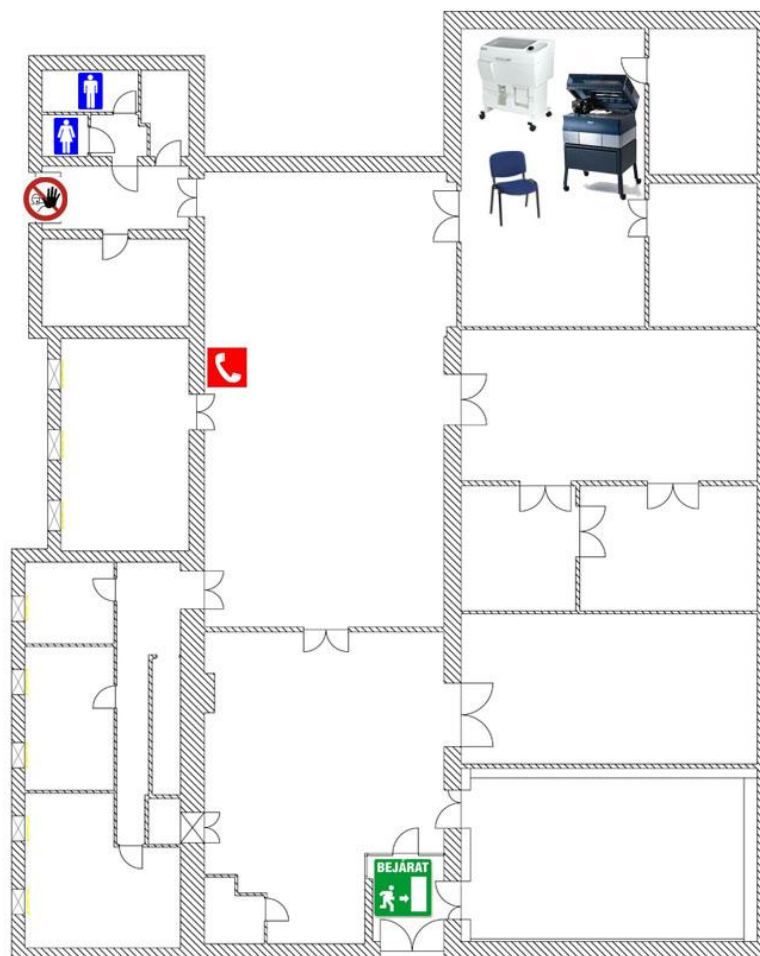
MT épület

3D nyomtatás

AZ ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK ALAPJAI

**A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI HONLAPON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU**

A LABORGYAKORLAT HELYSZÍNE AZ MT ÉPÜLET!



MT
épület

TARTALOMJEGYZÉK

1. A LABORGYAKORLAT CÉLJA	3
2. ELMÉLETI HÁTTÉR	3
2.1. AZ STL FÁJL FORMÁTUM	4
2.2. ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK	6
3. A LABORGYAKORLAT SORÁN HASZNÁLT GÉPEK, BERENDEZÉSEK	12
3.1. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB SZAVAK ANGOLUL, NÉMETÜL	14
4. AJÁNLOTT IRODALOM	14
MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV	15

1. A laborgyakorlat célja

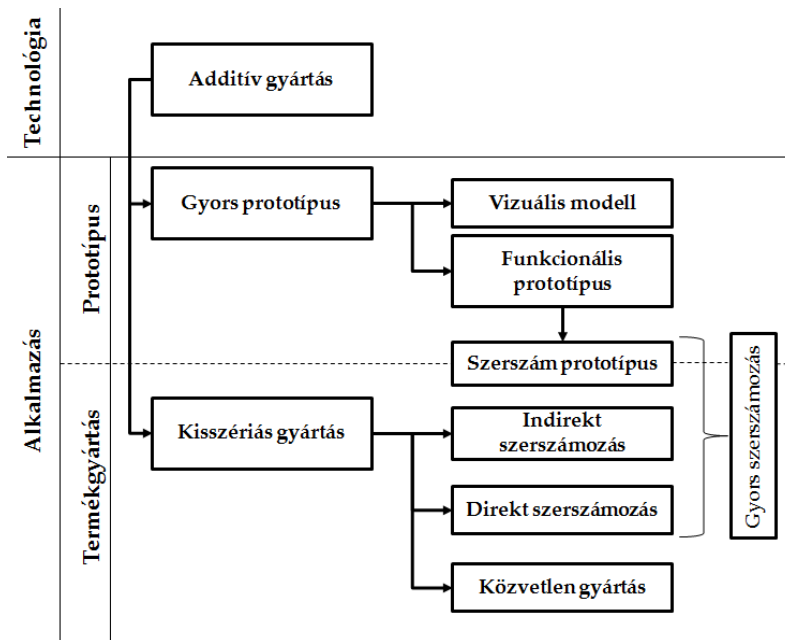
A laborgyakorlat elsődleges célja a hallgatókkal megismertetni az additív gyártórendszereket és a kapcsolódó kisseriás gyártási eljárásokat, különös tekintettel a 3D nyomtató, az FDM, az SLA, valamint az PolyJet berendezésekre és azok működési elvére.

2. Elméleti háttér

Napjaink egyre gyorsuló világában a tervezési és gyártási folyamatoknak is együtt kell haladni a korrallal. Ennek köszönhetően gyártmányfejlesztés hagyományos módját, amelyben az egyes tervezési és gyártási folyamatok egymást követték, átvette az egyidejű, úgynevezett szimultán tervezés. Igen nagy szerepe van a tervezési folyamatban a gyorsaságnak, amelyet a gyors tervezés közbeni ellenőrzésekkel érhetünk el. Ezeknek az ellenőrzéseknek az alapját a prototípusok jelentik, amelyeken elvégezhetjük a kívánt vizsgálatokat.

A 3D-s számítógépes tervezés ma már elengedhetetlen a korszerű polimer alkatrésztervezésben. A számítógéppel tervezett test láttatására gyakran alkalmazzák a különböző számítógépes térbeli megjelenítéseket, amelyeknek ma már igen széles választéka áll rendelkezésünkre. Ez a megjelenítési forma lehetővé teszi a virtuális térben létező test szemléltetését, geometriai és mechanikai vizsgálatát is, azonban egy kézzel fogható modell (prototípus) gyakran elengedhetetlen a terv teljes átlátására.

A 80-as évek második felétől kezdődően állnak a mérnökök rendelkezésére olyan prototípuskészítési technológiák (ún. additív gyártástechnológiák), amelyek lehetővé teszik, hogy a CAD rendszerekkel tervezett 3D-s modellek közvetlenül, valós fizikai modellé váljanak. Az additív gyártástechnológiák alkalmazásának két fő célja lehet, az egyik a gyors prototípusgyártás (RPT), a másik pedig a kisseriás termékgyártás (1. ábra). **Gyors prototípusgyártás** tekintetében két esetet különböztethetünk meg. Az első, amikor a termék megjelenését, külsejét szeretnénk megvizsgálni (**vizuális modell**), valós 3D-s formában szeretnénk kézbe venni. Erre a forma (design) kialakítása közben van nagy szükség, amikor még nem a funkció teljesülését vizsgáljuk. Ebben az esetben tehát nem az a cél, hogy a mintánk funkcionálisan egy az egyben megegyezzen a jövőbeli termékünkkel, hanem csak az, hogy geometriailag pontosan utánozza azt.



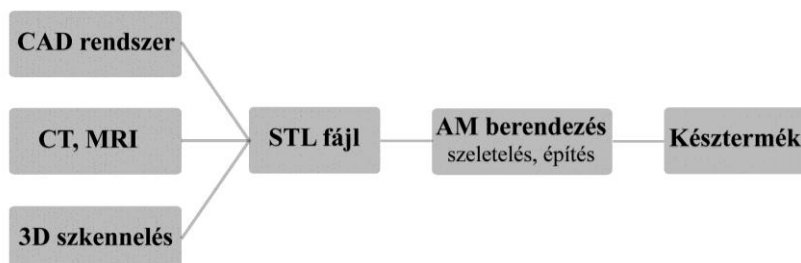
1. ábra: Az additív gyártástechnológiák alkalmazási területei

A második eset, amikor a modell éppen a funkció vizsgálatának céljából készül (**funkcionális modell**). Ebben az esetben jóval nagyobbak a modellel szemben támasztott követelmények, hiszen itt nem csak a „látszat” számít, hanem a szilárdság, merevség és egyéb fizikai jellemzők, valamint a geometriai méretpontosságoknak is nagyobb a jelentősége. Számos esetben követelmény lehet az is, hogy a prototípus még anyagában is megegyezzen a tervezett termék jövőbeli anyagával. A **kisszériás termékgyártás** tekintetében három esetet érdemes elkülöníteni. Eszerint a kívánt termékek előállíthatóak **közvetlen gyártással**, ahol a berendezések a végső terméket hozzák létre. Gyakran alkalmazzák azonban az additív technológiákat szerszámok létrehozására is. Itt további két csoportot különböztethetünk meg. **Direkt szerszámozás** esetén közvetlenül szerszámot (pl: fröccsöntő szerszámot), míg **indirekt szerszámozás** esetén a termékkel megegyező geometriájú ösmintát (mestermintát) hozzuk létre ily módon, és a szerszámot ennek segítségével állítjuk elő (pl: gravitációs öntés esetén).

2.1. Az STL fájl formátum

Az additív gyártástechnológiák közös jellemzője, hogy minden esetben szükség van a gyártani kívánt termék virtuális (3D-s) modelljére. 3D-s modell előállítására többféle lehetőség van: készíthetjük modellező szoftverrel, már meglévő tárgyat 3D szkennelhetünk, vagy akár CT, MRI stb. felvételek alapján is (2. ábra) előállíthatjuk. Mivel az additív gyártástechnológiák rétegről-

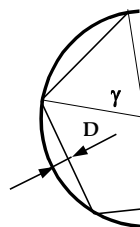
rétegre építik fel a terméket, ezért szükséges a 3D-s modellünk felületének ismerete, majd a modell rétegvastagságnak megfelelő szeletelése. Erre szolgálnak a prototípus berendezések saját programjai, amelyek szabványos bemenete az STL (Standard Tessellation Language).



2. ábra Additív gyártástechnológia (AM) folyamatábrája

Az STL felületleíró adatformátum, amely kapcsolatot teremt a CAD rendszerek és RPT rendszerek között. Az STL fájl háromszögek segítségével írja le a felületet. Minden egyes háromszög esetén definiálja annak csúcsponti koordinátáit – mind a három irányban (x,y,z) – valamint a hozzá tartozó normálvektort. A normálvektor iránya adja meg, hogy a felület melyik felén van a nyomtatandó modell: általánosan a normálvektornak minden esetben a felületből (nyomtatandó testből) kifelé kell mutatnia. Az STL fájl kétféle lehet: bináris formátumú vagy ASCII szöveges formátumú. Mindkét formátum tulajdonképpen egy lista a számítógéppel tervezett testmodell felületét leíró háromszögekről.

Az STL fájlok generálásánál a CAD programok két paraméter figyelembevételével készítik el a modell felületén a háromszögeket (3. ábra). Az egyik a húrhiba, ami a legnagyobb távolság, amely a valóságos kontúr és a generált háromszögek között lehet (D), a másik az a legnagyobb központi szög, amely a kontúrt közelítő élhez húzható (γ).



3. ábra. Az STL fájl értelmezése (D – húrhiba, gamma – legnagyobb központi szög)

Az STL fájl, lévén egy közelítéssel, ezért 100%-ban sosem fogja tudni visszaadni (kivéve a síklapokkal határolt esetekben) a 3D modellt, továbbá egyes CAD rendszerek nem képesek megfelelően generálni az STL fájlt, így előfordulhatnak helyi problémák, hibák a felületi közelítés folyamán. Ilyen hibák lehetnek a hálón keletkező rések, illetve felület hiányok, felülettorzulások, felületek átlapolódása, alul- vagy túlhatározott pont, vonal, illetve felület. Az előbbieken felsorolt

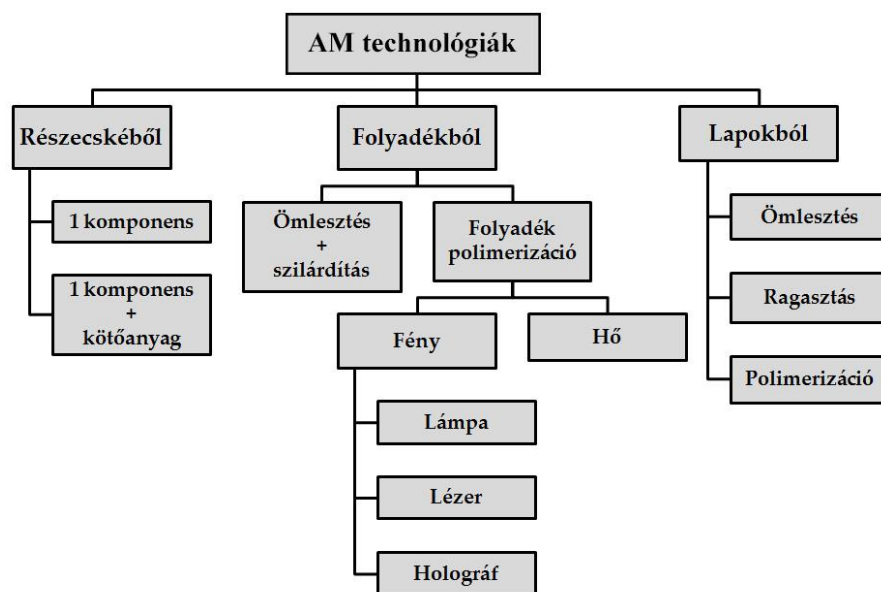
hibáknak a javítása azonban ma már nem jelent gondot, mivel számos célszoftver létezik a feladatra, mint például a Materialise cég Magics RP programja.

Az STL fájlok előnyei között érdemes megemlíteni, hogy ez az egyik legegyszerűbb módja a 3D CAD modellek ábrázolásának, a legtöbb RPT berendezés bemenete ezt a formátumot részesíti előnyben, valamint ezzel az eljárással a legkönnyebb a geometriai alakokat adatfájlba transzformálni. Hátrányai közé sorolható, hogy a fájl mérete esetenként nagyobb lehet, mint maga a CAD fájl, ami a leírás módjából adódik.

2.2. Additív gyártástechnológiák

Amíg a legtöbb gyártástechnológia lebontó jellegű, azaz a kívánt geometria előállítását az alapanyag eltávolításával – forgácsolás, marás – érik el, addig az additív gyártástechnológiák esetén a kívánt alakot rétegről-rétegre (layer-by-layer) anyaghozzáadás (addition) útján hozzák létre.

Az additív gyártástechnológiákat (AM technológiák) többféle szempont szerint lehet csoportosítani, leginkább elfogadott a felhasznált alapanyagok szerinti csoportosításuk (4. ábra).



4. ábra RPT technológiák csoportosítása az alapanyagok szempontjából

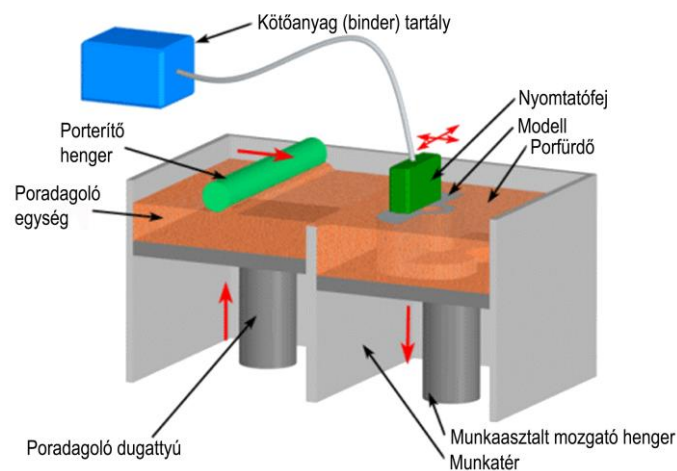
Napjainkban elterjednek mondható a folyadék alapú additív gyártástechnológia, amely tipikusan polimer alapú anyagokat jelent, egyrészt a sugárzás hatására térhálósodó anyagok (fotopolimerek) felhasználásával (SLA - sztereolitográfia), másrészt az egyszerűbb termoplasztikus anyagok alkalmazásával (FDM - ömledékrétegzés). Ez utóbbi az anyag megolvasztását, majd újra megszilárdítását jelenti. További technológiák por alakú alapanyagból építik fel a modellt, az

egymás melletti részecskék összeolvasztásával (SLS – szelektív lézer-szinterezés), esetleg valamilyen ragasztóanyaggal való egyesítéssel (3D printing). Léteznek ezen kívül olyan technológiák, amelyek rétegezéssel, lapokból hozzák létre a prototípust. A legegyszerűbb ezek közül, amikor lapokat (általában: papírlapokat) vágunk megfelelő méretre, majd összeragasztjuk azokat (LOM – réteges kivágás és felépítés).

2.2.1. 3D printing technológia

A 3D Printing eljárást az MIT (Massachusetts Institute of Technology) kutatói fejlesztették ki, főleg prototípusok előállítására, valamint valós termékek rugalmas gyártására, az utóbbi időben azonban direkt szerszámkészítésre és precíziós öntőformák előállítására is alkalmazzák. Ezzel a technológiával bármilyen alakú modell előállítható, szinte bármilyen poranyag felhasználásával. Ezek az anyagok lehetnek kerámiák, polimerek, fémek, vagy akár kompozitok is.

A legtöbb technológiához hasonlóan itt is rétegenként alakítják ki a modellt, a számítógépen elkészített 3D-s modell szeletekre bontásával. A rétegek építése az előzőleg elkészült modellrétegekre történő porfelvitellel kezdődik (5. ábra).



5. ábra 3D Printing működési elve

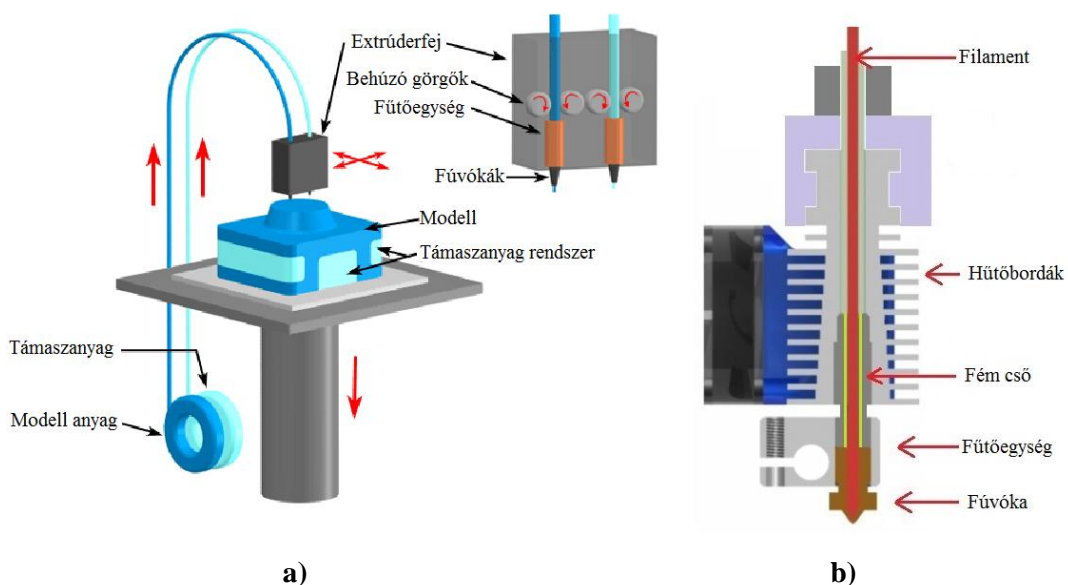
A tintasugaras nyomtatókhoz hasonlóan működő berendezés az adott rétegben, ahol a modell elhelyezkedik, kötőanyagot helyez el, így kialakítva az adott réteg geometriáját. Ezután a munkasztal egy mozgató mechanika segítségével lesüllyed egy rétegnyi, ezzel helyet adva a következő réteg számára felviendő por számára. Egy terítőhenger ezután egyenletes rétegvastagságot alakít ki a porból. Ezeket a lépéseket addig ismétli a berendezés, amíg a darab

teljes kialakítása meg nem történik. A darab a végleges formáját a felesleges (meg nem kötött) por eltávolítása, valamint utókezelés (gyantával történő átitatás, hőkezelés) után nyeri el.

Az eljárás gyors, egyszerű, olcsó és megbízható. Mivel a terméket por veszi körül, így alátámasztást nem igényel, gyártást követően pedig abból ismét lehet nyomtatni. Hatalmas előnye, hogy igen gyorsan lehet vele előállítani kerámia öntőformákat precíziós öntéshez. Hátrány viszont, hogy utólagos kezelés szükséges, pontossága és mechanikai tulajdonságai korlátozottak és a belső felületekhez nem lehet hozzáférni. ([Megértést segítő videó](#))

2.2.2. FDM - ömledékrétegzés

Az FDM technológiát a Stratasys cég szabadalmaztatta. Működési elve, hogy a berendezés a szál formátumú hőre lágyuló polimert (filamentet) bevezeti az extruderfejbe (6. ábra), ott megolvasztja azt, majd egy szűk fűvókán sajtolja keresztül a modellterbe, ahol összeheged az előző réteggel és megszilárdul. A technológia szempontjából kritikus kérdés a megfelelő átmérőjű filament alkalmazása, mert egyrészt ez biztosítja a szükséges alapanyag utánpótlást, másrészt pedig mintegy dugattyúként kitolja a maga előtt a már ömledék állapotban lévő anyagot. Ennek a kettős funkciónak a biztosítását szolgálja a megfelelően kialakított extruderfej (6. ábra).



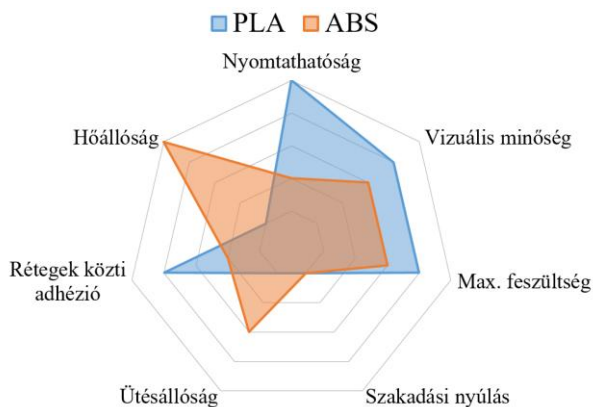
6. ábra FDM gyártástechnológia

a) működési elv; b) az extruderfej felépítése

Jól látható, hogy a szál csak a fűvóka környezetében olvad meg, így a fölötte lévő hűtött filament, mint egy dugattyú, át tudja tolni maga előtt a fűvókán a megolvadt anyagot. A fej x-y síkban történő mozgása során építi fel a modellt egy réteget. Fontos tényező az anyag megfelelő tapadása

(adhéziója) mind az asztalhoz (első réteg esetén), mind pedig az előzőleg legyártott réteghez. A megfelelő adhéziót a feldolgozásra kerülő alapanyag szempontjából megfelelő hőmérséklet és nyomás megválasztásával lehet létrehozni. A hőt az ömledék biztosítja, míg a nyomást a megfelelő előtolással hozza létre a berendezés. A porfürdő hiányában szükség lehet támaszanyagra (6. ábra), amelyet többnyire a modell saját anyagából hozza létre a gép, de van lehetőség ettől eltérő támaszanyag rendszerrel dolgozni, amihez mindenféleképpen két nyomtató fejre (két fejes gépre) van szükség.

Nagy előnye a jó ár-érték arány, ami miatt ma Magyarországon az egyik legelterjedtebb technológia. Az ömledékrétegzéses eljárás hátránya a szerény pontosság, hiszen a legprecízebb gépek is 100 µm-es építési rétegvastagsággal rendelkeznek. Az x-y síkbeli pontossága ennél ugyan jobb, de ezt az alkalmazott fűvóka átmérője határozza meg. A munkatér (építési tér) kialakítása szempontjából megkülönböztetünk fűthető, illetve nem fűthető munkatérű gépeket. A fűtött munkatérrel rendelkező berendezések sokkal több alapanyag – akár műszaki – feldolgozására alkalmasak, míg fűtetlen terű gépek többnyire kis zsugorodású anyagokat tudnak feldolgozni. Ezek alapján az FDM technológia szempontjából fontos és leginkább elterjedt alapanyagok a politejsav (PLA) és az ABS. Az anyagok egymáshoz viszonyított, nyomtatással kapcsolatos tulajdonságait a 7. ábra foglalja össze.



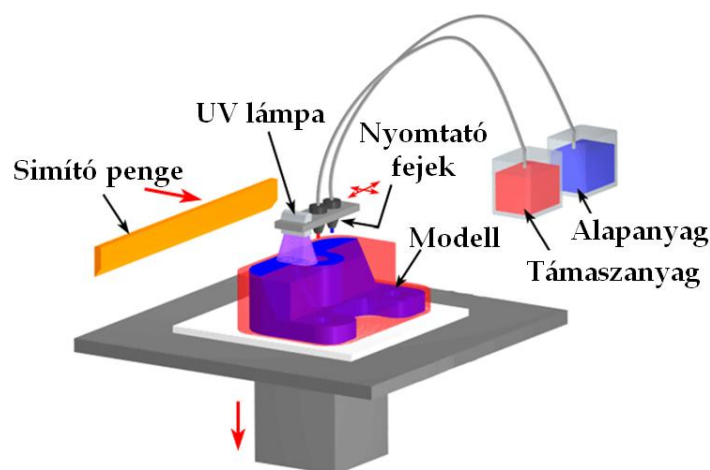
7. ábra PLA és ABS tulajdonságai

A PLA tehát ideális nyomtató alapanyag, ha vizualizációs célra akarjuk a modellt használni, hiszen könnyen kezeli a berendezés. Funkcionális feladatokra a jobb ütésállósággal és hőállósággal rendelkező ABS-t célszerű használni. Látszik továbbá a diagramon, hogy egyik anyagnak sem nagy a szakadási nyúlása és az ütésállósága. ([Megértést segítő videó.](#))

2.2.3. Fotopolimer alapú gyártástechnológiák

A fotopolimer alapú technológiák közé tartozik többek között a **PolyJet**, a **sztereolitográfia (SLA)** és a **digitális képfeldolgozás (DLP)**. A modellépítés során kémiai folyamat játszódik le, amely során a monomereket és oligomereket tartalmazó gyanták kitérhálósodnak. Fotopolimerek esetében a térhálót eredményező, jellemzően polimerizációs láncreakció sugárzás hatására iniciálódik, és gyorsan végbemegy. A sugárzás lehet elektromágneses, gamma-, valamint elektron sugárzás. Leggyakrabban UV sugárzást alkalmaznak, amely forrása lehet lézer (SLA), vagy lámpa (PolyJet, DLP). A polimerizációs-térhálósodási mechanizmuson belül megkülönböztetünk szabadgyökös (akrilát rendszerek), kationos (epoxi és vinilészter-alapú rendszerek) és anionos (mikrolitográfiánál használt speciális polimer) rendszereket.

A PolyJet eljárást az Objet Geometries cég fejlesztette ki. A tintasugaras nyomtatófejből kinyomtatott műgyanta rendszert UV fényforrással polimerizálják (8. ábra).

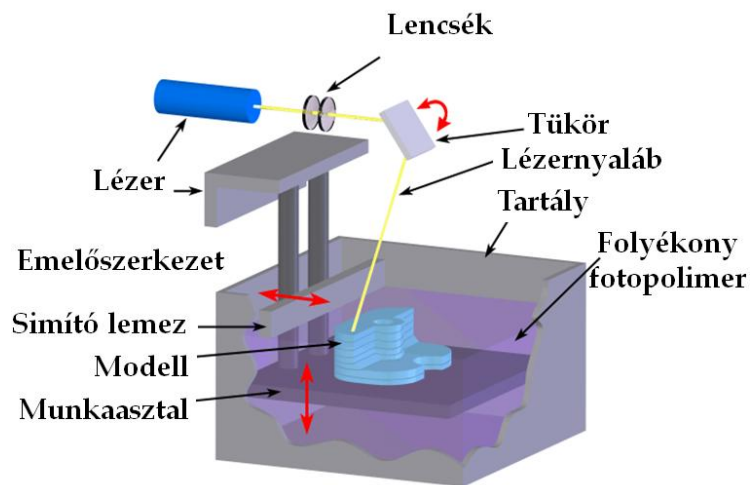


8. ábra: PolyJet eljárás elve

Ez a technológia a polimerizációs láncreakció szabadgyökös változatát alkalmazza, a gyantában lényegében csak a besugárzás alatt alakulnak ki kötések, térhálós polimert hozva létre. Mivel a nyomtatás térben történik, és nincs körülötte megtámasztó porfűrdő, ezért külön támaszanyag alkalmazására van szükség. Nagy előny viszont, hogy a támaszanyag vízzel oldható, így könnyebb és egyszerűbb eltávolítani, mint a többi technológia esetén. További előny, hogy az UV fényforrásnak köszönhetően olcsóbb és gyorsabb, mint a hagyományos fotopolimer-alapú AM technológiák. A berendezés pontosságát jól jellemzi a 16-30 μm -es építési rétegvastagság, a legvékonyabb függőlegesen elkészíthető falvastagsága 0,6 mm, a teljes modell pontossága pedig $\pm 0,05$ mm.

A további fejlesztések eredményeként született berendezés segítségével (Connex), ma már akár több különböző mechanikai és fizikai tulajdonságú anyag is nyomtatható egy munkadarabon (munkacikluson) belül a felhasznált alapanyagok kombinálásával. Itt jól használható ki a fotopolimer rendszerben rendelkezésre álló több különböző monomer és oligomer keverék adta szabadság. ([Megértést segítő videó.](#))

Az első AM eljárás a sztereolitográfia (SLA) volt, amelyet 1987-ben mutattak be (9. ábra).



9. ábra SLA eljárás elve

A fotopolimer alapanyagot lézer segítségével térhálósítja ki. A hatásmechanizmus ebben az esetben is szabadgyökös polimerizáció. Az alapanyag egy tartályban helyezkedik el, amelyben a munkaasztal található. Az első rétegnél a munkaasztal csak egy rétegvastagsággal helyezkedik el a folyadékszint alatt. A lézer befutja a modell adott keresztmetszetét, így térhálósítva a réteget. Alámetszések esetén a támasztásról tervezéskor gondoskodni kell. Ez az egyik legpontosabb eljárás, hiszen az építési rétegvastagsága $25\ \mu\text{m}$, a teljes modell pontossága $\pm 0,045\ \text{mm}$, illetve ezzel lehet a legjobb felületi minőségű modellt előállítani. Fontos megjegyezni, hogy a PolyJet technológiával szembeni hátránya az, hogy itt szükség van minimális gyantamennyiségre a nyomtatáshoz akkor is, ha az nem kerül felhasználásra. Továbbá itt egyszerre csak egy anyagból lehet felépíteni az egész modellt, így nem lehet egy darabon belül különböző tulajdonságú anyagokat alkalmazni, de a gyantát egyszerűbben lehet tölteni erősítőanyagokkal. ([Megértést segítő videó.](#))

3. A laborgyakorlat során használt gépek, berendezések

Z310 3D PRINTER (10. ÁBRA)

modelltér mérete: 203x254x203 mm
 rétegvastagság: 0,089 – 0,203 mm
 építési sebesség: ~ 25 mm/óra
 nyomtatófejek száma: 1 db (HP)



10. ábra Z310 3D Printer

ALARIS 30 TÍPUSÚ ADDITÍV GYÁRTÓBERENDEZÉS (11. ÁBRA)

modelltér mérete: 300x200x150 mm
 rétegvastagság: 0,028 mm
 építési sebesség: ~6 mm/óra
 nyomtatófejek száma: 2 db



11. ábra Alaris 30 típusú AM berendezés

CRAFT BOT PLUS FDM ALAPÚ ADDITÍV GYÁRTÓBERENDEZÉS (12. ÁBRA)

modelltér mérete: 250x200x200 mm
 rétegvastagság: 0,100 – 0,300 mm
 építési sebesség: 50-200 mm/s
 nyomtatósál átmérő: 1,75 mm



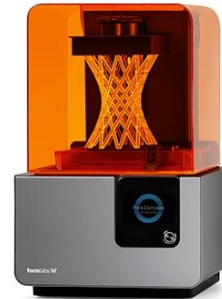
12. ábra Craft Bot Plus AM berendezés

FORM2 TÍPUSÚ ADDITÍV GYÁRTÓBERENDEZÉS (13. ÁBRA)

a modelltér mérete: 145x145x175 mm

rétegvastagság: 0,025/0,050/0,100 mm

építési sebesség: ~6 mm/óra



13. ábra FromLabs Form2 típusú AM berendezés

ZWICK Z005 TÍPUSÚ SZÁMÍTÓGÉP VEZÉRLÉSŰ UNIVERZÁLIS SZAKÍTÓGÉP (14. ÁBRA)

a gép méréshatára: 5 kN

vizsgálati sebesség tartomány:
0,0005 – 3000 mm/min.



14. ábra Zwick Z005 típusú univerzális szakítógép

3.1. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul, németül

Magyar	Angol	Német
Additív gyártástechnológia	Additive Manufacturing	*
Gyors prototípusgyártás	Rapid Prototyping (RPT)	Schnelle Prototypentwicklung
Gyors szerszámkészítés	Rapid Tooling (RT)	*
STL	Standard Tessellation Language	*
3D nyomtatás	3D printing	*
Sztereolitográfia	Stereolithography	Stereolithographie
Szelektív lézer szinterezés	Selective Laser-sintering	Selektiv-Laser Sintern
Ömledékrétegzés	Fused Deposition Modelling	*
Réteges kivágás és felépítés	Laminated Object Manufacturing	*
Számítógéppel segített tervezés	Computer Aided Design	*

* Az angol kifejezés a használatos

4. Ajánlott irodalom

1. Dunai A., Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft, Budapest, 2003
2. A. Gebhardt: Understanding Additive Manufacturing, Hanser Publishers, Munich, 2011
3. I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies, Springer, New York, 2010
4. Kovács J. G.: Gyors prototípus eljárások II. Gyakorlati megvalósítások, Műanyag és Gumi, 39, 2002, 103-107
5. <http://www.custompartnet.com>
6. <https://www.3dhubs.com>

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV



Név:

Pontszám:

Neptun kód:

Dátum:

Ellenőrizte:

Gyakorlatvezető:

1. Feladat

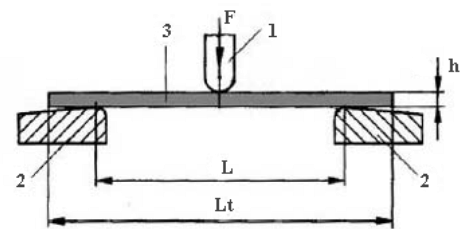
- Termékgyártás PolyJet, FDM valamint 3D printing technológiákkal.
- FDM gyártástechnológiával készült különböző térkitöltésű és fröccsöntött próbatestek hárompontos hajlító vizsgálata.

2. Alapadatok

Hőmérséklet:[°C]

Relatív légnedvesség: [%]

Alátámasztási távolság [mm]



Hárompontos hajlítás elvi vázlata
1: nyomófej; 2: alátámasztás; 3: próbatest;
h: próbatest vastagsága [mm]; L: az alátámasztási távolság [mm]
Lt: próbatest hossza [mm]

No	Gyártás- technológia	Térkitöltés [%]	Próbatest adatai				
			h [mm]	b [mm]	l [mm]	m [g]	ρ [g/cm ³]
1	FDM	5					
2	FDM	25					
3	FDM	50					
4	FDM	75					
5	FDM	100					
6	Fröccsöntött	100					

3. Mért és számított eredmények

A σ_{bh} hajlító szilárdság [MPa], vagyis a töréskor elérhető maximális hajlító feszültség meghatározásához a szabvány alapján az (1) összefüggést használhatjuk:

$$\sigma_{bh} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (1)$$

ahol: ahol F a töréshez tartozó erő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest vastagsága [mm].

Az E_h hajlító rugalmassági modulus [MPa] meghatározását a szabvány alapján a (2) összefüggéssel határozzuk meg:

$$E_h = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f} \quad (2)$$

ahol L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest vastagsága [mm], $\Delta F/\Delta f$ az erő-lehajlás görbe meredeksége [N/mm].

No	Mért és számított eredmények				
	ΔF [N]	Δf [mm]	E_h [MPa]	σ_{bh} vagy σ_h [MPa]	E/ρ [MPa cm ³ /g]
1					
2					
3					
4					
5					
6					