



B4/E4/M4/T9

Változat: 5

Kiadva: 2023. szeptember 1.

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

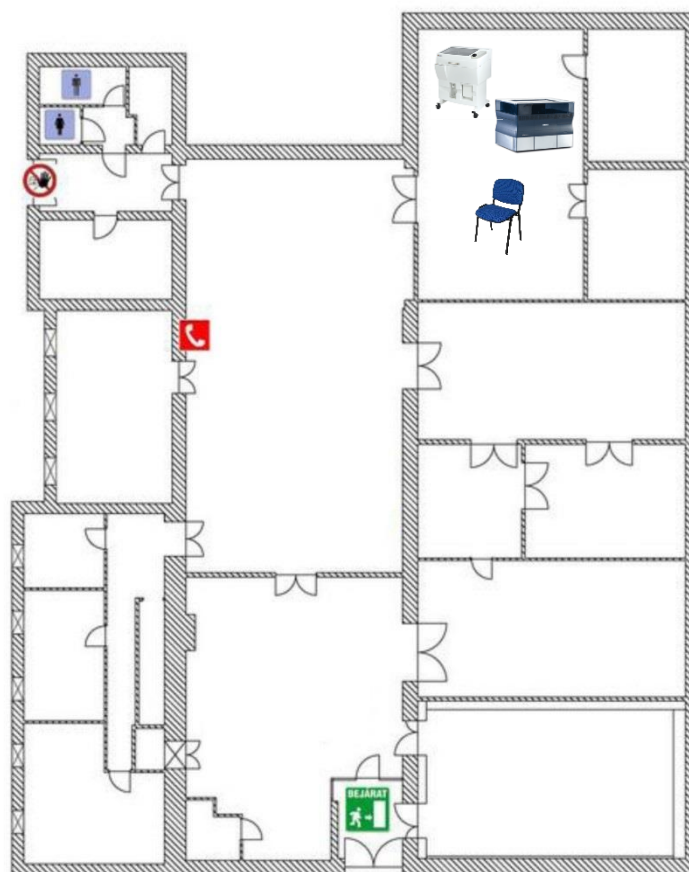
MT épület

3D nyomtatás

POLIMER TERMÉKEK KISSZÉRIÁS GYÁRTÁSA

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

A LABORGYAKORLAT HELYSZÍNE AZ MT ÉPÜLET!



TARTALOMJEGYZÉK

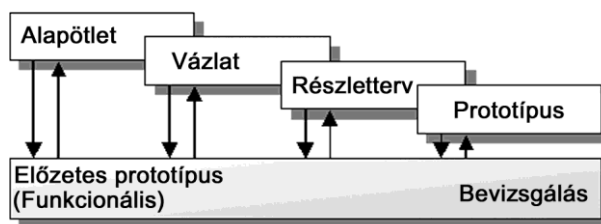
1. A GYAKORLAT CÉLJA	3
2. ELMÉLETI HÁTTÉR	3
2.1. Az STL FÁJL FORMÁTUM	5
2.2. ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK	6
3. A LABORGYAKORLAT SORÁN HASZNÁLT GÉPEK, BERENDEZÉSEK	13
3.1. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB SZAVAK ANGOLUL, NÉMETÜL	15
4. AJÁNLOTT IRODALOM	15
MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV	16

1. A gyakorlat célja

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

2. Elméleti háttér

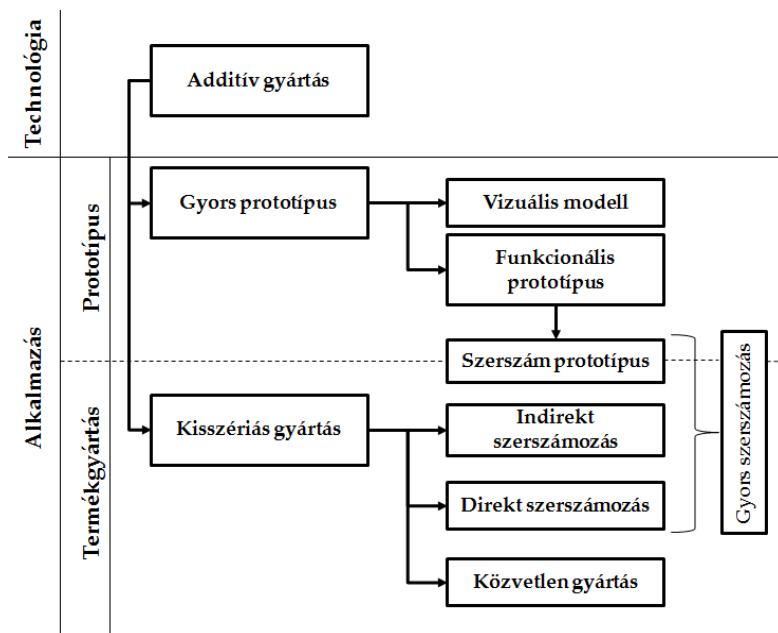
Napjaink egyre gyorsuló világában a tervezési és gyártási folyamatoknak is együtt kell haladnia a korrall. Ennek köszönhetően a gyártmányfejlesztés hagyományos módját, amelyben az egyes tervezési és gyártási folyamatok egymást követték, átvette az egyidejű, úgynevezett **SZIMULTÁN TERVEZÉS**. Igen nagy szerepe van a tervezési folyamatban a gyorsaságnak, amelyet a tervezés közbeni gyors ellenőrzésekkel érhetünk el (1. ábra). Ezek alapját a prototípusok jelentik, amelyekkel elvégezhetjük a kívánt vizsgálatokat.



1. ábra. Szimultán tervezés

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 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.

Az additív gyártástechnológiák (AM, Additive Manufacturing) segítségével a tetszőleges CAD rendszer felhasználásával megtervezett 3D-s modell közvetlenül valós fizikai modellé, sőt akár terméké alakítható. Az AM technológiák alkalmazásának két fő célja van: az egyik a **GYORS PROTOTÍPUSGYÁRTÁS (RPT)**, a másik pedig a **KISSZÉRIÁS TERMÉKGYÁRTÁS** (2. ábra).



2. ábra: Additív gyártástechnológiák alkalmazási területei

GYORS PROTOTÍPUSGYÁRTÁS tekintetében két esetet különböztetünk meg:

- *VIZUÁLIS MODELL*: A termék megjelenését, külsejét bemutató, valós, 3D-s termék vagy test. Elősegíti a termék formájának, megjelenésének (design) tervezését azáltal, hogy felfedi, láthatóvá teszi az esetleges tervezési hibákat. A vizualizációs modellel szemben támasztott mechanikai követelmények csekélyek.
- *FUNKCIONÁLIS MODELL*: Ebben az esetben jóval nagyobbak a modellel szemben támasztott követelmények: a szilárdság, a merevség és egyéb fizikai jellemzők, valamint a geometriai méretpontosságnak is nagy jelentősége van.

Számos esetben követelmény lehet, hogy a tervezett termék anyagában esetenként gyártástechnológiájában is meg kell egyezzen a későbbi sorozatban gyártandó termékkel, ekkor kerül előtérbe a **KISSZÉRIÁS TERMÉKGYÁRTÁS**, amely tekintetében három esetet különböztetünk meg:

- *KÖZVETLEN TERMÉKGYÁRTÁS* ebben az esetben közvetlenül a készterméket hozzuk létre.
- *DIREKT SZERSZÁMOZÁS* során nem a terméket, hanem közvetlenül magát az alakadó szerszámot (vákuumformázó, fröccsöntő szerszám, stb.) hozzuk létre (nyomatjuk ki).
- *INDIREKT SZERSZÁMOZÁS* esetén a termékkel megegyező geometriájú ősmintát (mestermintát) hozzuk létre, majd ennek segítségével egy külön lépésben készül az alakadó szerszám (pl.: szilikon öntés).

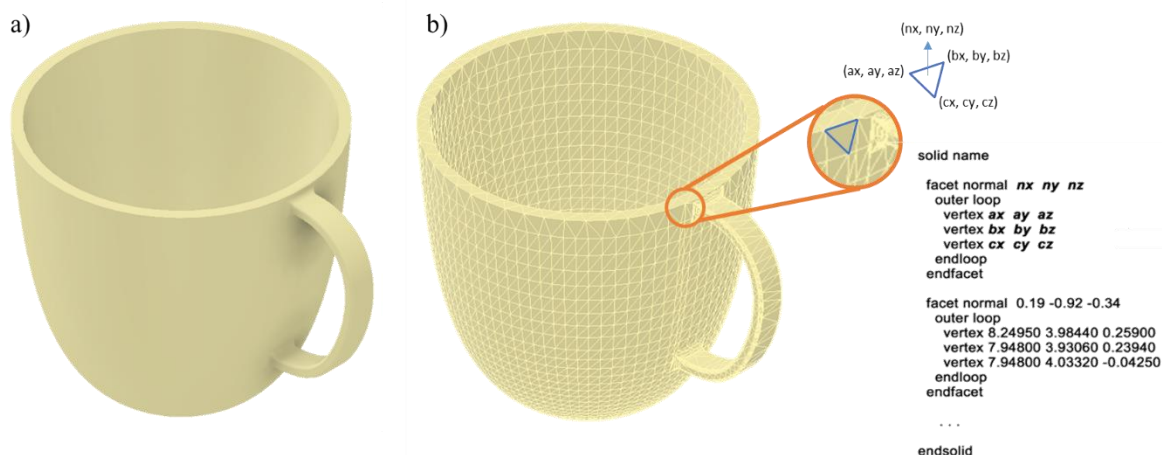
2.1. Az STL fájl formátum

Az additív gyártástechnológiák közös jellemzője, hogy minden esetben szükség van a gyártani kívánt termék **virtuális (3D-s) modelljére**. 3D-s modell előállítására többféle lehetőségünk van:

- készíthetjük modellező szoftverrel (tetszőleges CAD programok),
- már meglévő tárgyat 3D szkennelhetünk,
- vagy készíthetjük CT, vagy MRI felvételek alapján is.

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

Az STL fájl felületleíró adatformátum, amely kapcsolatot teremt a 3D-s modell és az additív gyártórendszerek között. Az STL fájl háromszögek segítségével írja le a felületet (3. ábra). Minden egyes háromszög esetén definiálja a csúcsponti koordinátákat az x,y,z irányokban, valamint az összes háromszög-felületelemhez hozzárendel egy-egy, a felületből kifelé mutató normálvektort is. A normálvektor iránya adja meg, hogy a modell felületének melyik részét nyomtatjuk, általánosan a test előállítása („kinyomtatása”) során a gyártóberendezés mindig a normálvektorral ellentétes irányban található térrészbe helyez el anyagot.

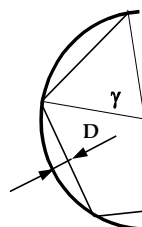


3. ábra A 3D-s modell (a) és a felületet közelítő (leíró) STL formátum (b)

Az STL fájlok generálásánál a CAD programok két paraméter figyelembevételével készítik el a modell felületén a háromszögeket (4. ábra). Az egyik a húrhiba, ami a legnagyobb távolság,

amely a valós kontúr és a generált háromszögek között lehet (D), a másik az a legnagyobb központi szög, amely a kontúrt közelítő élhez húzható (gamma).

Az STL fájl, lévén egy közelítési módszer eredménye, ezért 100%-ban sosem fogja tudni visszaadni a 3D modellt kivéve a síklapokkal határolt eseteket (pl. kocka, hasáb, stb.).



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

Sok esetben a CAD rendszerek nem képesek megfelelően generálni az STL fájlt, így előfordulhatnak helyi problémák, hibák a felületi közelítés folyamán. Ilyen hibák lehetnek:

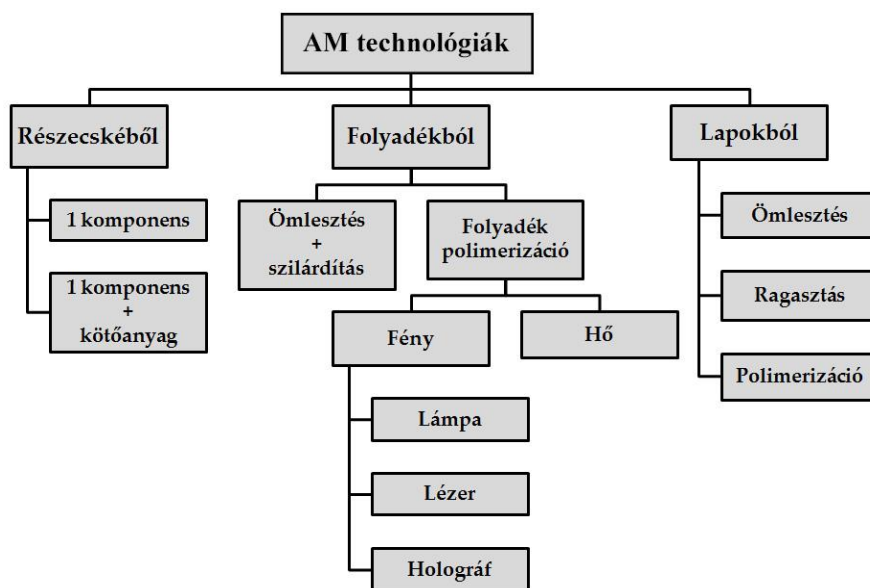
- a hálón keletkező rések,
- felület hiányok, felülettorzulások, felületek átlapolódása,
- alul- vagy túlhatározott pont, vonal, illetve felület.

Ezeknek a hibáknak a javítása azonban ma már nem jelent gondot, mivel számos célszoftver létezik, 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 ábrázolására, 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 – pl. forgácsolás, marás esetén – érik el, addig az **additív gyártástechnológiák** esetén a kívánt alakot **rétegről-rétegre** (layer-by-layer), **anyaghozzáadás** útján hozzák létre. Az **additív gyártástechnológiákat (AM technológiák)** többféle szempont szerint lehet csoportosítani, ezek közül leginkább elfogadott a felhasznált alapanyagok szerinti csoportosításuk (5. ábra).



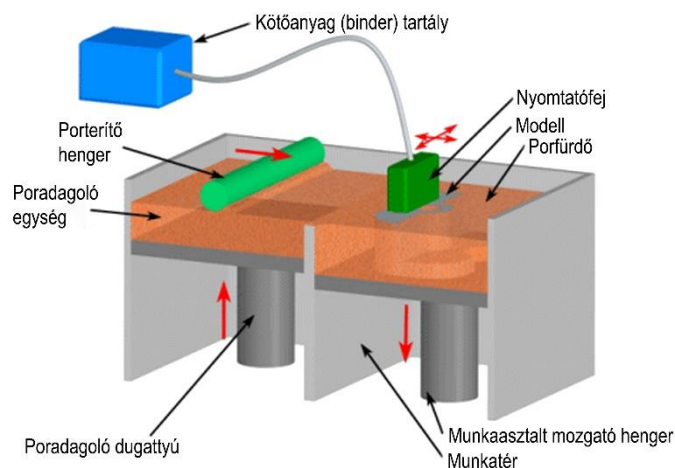
5. ábra RPT technológiák csoportosítása alapanyagok szempontjából

Napjainkban elterjednek mondható a folyadék alapú additív gyártástechnológia, amely tipikusan polimer alapú anyagokat jelent, egyrészt a sugárzás hatására térhálósodó anyagok (fotopolimerek) felhasználásával (SLA – *sztereolitográfia*, PoyJet), másrészt az egyszerűbb termoplasztikus anyagok alkalmazásával (FDM – *ömlédkrétegzés*). Ez utóbbi az anyag megolvasztását, majd újra megszilárdítását jelenti. További technológiák por formátomú 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, vékony lemezekből hozzák létre a prototípust. A legegyszerűbb ezek közül, amikor lapokat (általában: papírlapokat) vágunk megfelelő méretre, majd egyszerűen összeragasztjuk azokat (LOM – *réteges kivágás és felépítés*).

2.2.1. 3D printing technológia [\(videó\)](#)

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 előállítható bármilyen alakú modell, szinte bármilyen anyag (kerámiák, polimerek, fémek vagy akár kompozitok) felhasználásával. A termék gyártása a számítógépen elkészített 3D-s modell szoftveres környezetben történő szeletekre bontásával, valamint a munkatér és az adagolótér portároló egységeiben elhelyezkedő porfürdő elegyengetésével kezdődik. Ezután a tintasugaras nyomtatókhoz hasonló elv szerint működő berendezés felviszi az első réteg kötőanyagot a

munkatérben található porfürdő tetejére. Ezután a munkaasztal egy mozgató mechanika segítségével lesüllyed egy rétegvastagságnak megfelelő mértékben, a porterítő henger pedig a poradagoló egységből egyenletes vastagságban port terít a lehelyezett kötőanyagra. Ezeket a lépéseket addig ismételi a berendezés, amíg a darab teljes kialakítása meg nem történik (5. ábra). A darab a végleges formáját a felesleges (meg nem kötött) por eltávolítása, valamint utókezelés (gyantával, ragasztóanyaggal történő átitatás, hőkezelés) után nyeri el.



6. ábra 3D Printing működési elve

Előnyei:

- az eljárás gyors, egyszerű, olcsó és megbízható,
- a terméket por veszi körül, így alátámasztást nem igényel,
- a gyártásban részt vevő, de fel nem használt por korlátlanul újra felhasználható,
- gyorsan lehet vele előállítani kerámia öntőformákat precíziós öntéshez közvetlenül,
- színes termékeket is tudunk a technológia segítségével gyártani.

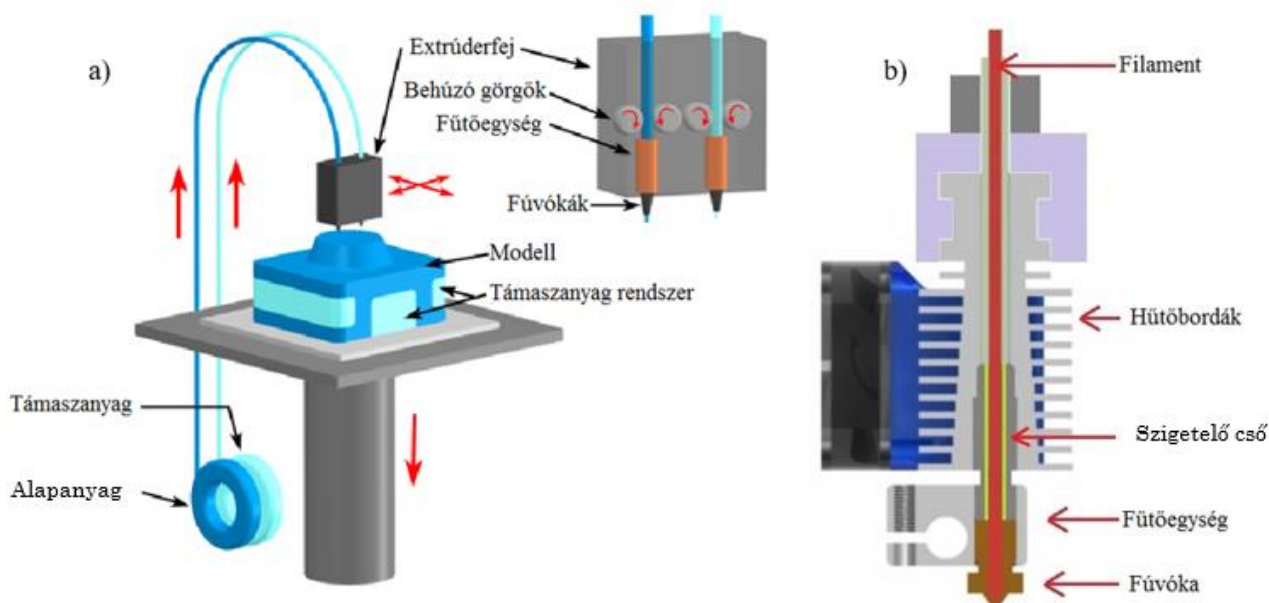
Hátrányai:

- utólagos kezelés (infiltrálás, utótérhálósítás, stb.) szükséges,
- pontossága és mechanikai tulajdonságai korlátozottak,
- a belső felületekhez nem lehet hozzáférni.

2.2.2. FDM – Ömledékrétegezés ([videó](#))

Az FDM technológiát a Stratasys cég szabadalmaztatta. Működési elve, hogy a berendezés a **szál formátumú, hőre lágyuló polimert (filamentet) vezet be az extruderfejbe (7/a ábra), ott megömleszti, majd egy szűk fúvókán a modelltérbe sajtolja azt, 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 a még szilárd filament mintegy dugattyúként kitolja a maga előtt már ömledék állapotban lévő anyagot. Ennek a kettős funkciónak a biztosítását szolgálja a megfelelően kialakított extruderfej, amelyet esetenként nyomtatófejnek is neveznek (7/b ábra).



7. ábra FDM gyártástechnológia: a) működési elv; b) az extruderfej felépítése

Jól látható, hogy a szál csak a fűvóka környezetében olvad meg, így a fölötté 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 rétegét. Fontos tényező az anyag megfelelő 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 az előtolással hozza létre a berendezés.

A gyártás során előfordulhat, hogy szükség van a modell bizonyos részein megtámasztásra, annak érdekében, hogy az megfelelően gyártható legyen (8. ábra). Az FDM rendszerű gépek esetén, a megtámasztást (támaszrendszert) legyárthatjuk a termék anyagával egyező anyagból (otthoni nyomtatók), de van lehetőségünk másodlagos, az alapanyagtól eltérő anyagból létrehozni, ebben az esetben viszont szükség van egy második nyomtatófejre (ipari nyomtatók).



8. ábra Modell gyártás közbeni megtámasztása

A munkatér (építési tér) kialakítása szempontjából megkülönböztetünk fűthető, illetve nem fűthető munkatérű gépeket. A fűtött munkatérrel rendelkező berendezések sokkal többféle – akár műszaki – alapanyag feldolgozására alkalmasak, amíg a fűtetlen terű gépek többnyire kis zsugorodású anyagokat tudnak feldolgozni.

Előnyei:

- jó ár-érték arány, ami miatt ma Magyarországon ez az egyik legelterjedtebb technológia,
- csendes működés,
- sokféle feldolgozható alapanyag (PLA, ABS, PC, PMMA, PEEK, stb.)
- egyszerű használat.

Hátrányai:

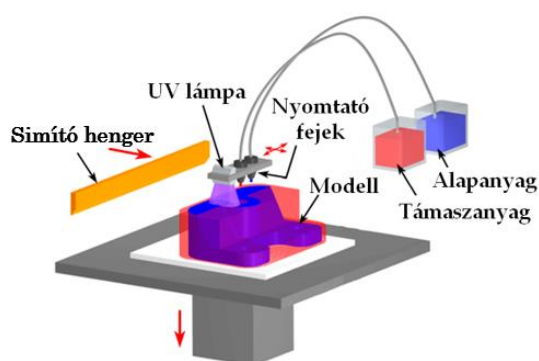
- szerény pontosság (XY irányban 100-300 mikron, Z irányban 100-150 mikron)
- nem túl jó felületi minőség
- utólagos megmunkálás szükséges (támaszanyag eltávolítás, felületkezelés)

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**, azaz a monomereket és oligomereket tartalmazó **gyanták térhálósodnak**. **Fotopolimerek esetében a térhálót eredményező, jellemzően polimerizációs láncreakció sugárzás hatására indul meg**, és a másodperc tört része alatt végbe is megy. Leggyakrabban UV sugárzást alkalmaznak, amelynek forrása lehet lézer (SLA), vagy lámpa (PolyJet, DLP).

A PolyJet ([videó](#)) eljárást az Objet Geometries cég fejlesztette ki a 2000-es évek elején. A tintasugaras nyomtatófejből kinyomtatott műgyanta rendszert **UV sugárzással polimerizálják**,

amelynek forrása egy 250 W-os halogén izzó (9. ábra). A polimerizációs láncreakció szabad gyökös, a gyantában lényegében csak a besugárzás alatt alakulnak ki kötések, térhálós polimert hozva létre. Az FDM technológiánál már ismertetett okból kifolyólag itt is szükség lehet a modell bizonyos részeinek a megtámasztására, amelyet **az alapanyagtól eltérő támaszanyag alkalmazásával old meg a berendezés. A támaszanyagot a gyártást követően egyszerű mosással távolítanak el.** A további fejlesztések eredményeként, ma már akár több különböző mechanikai és fizikai tulajdonságú anyag is nyomtatható egy munkadarabon (munkacikluson) belül a felhasznált alapanyagok kombinálásával (Connex).



9. ábra: PolyJet eljárás elve

Előnyei:

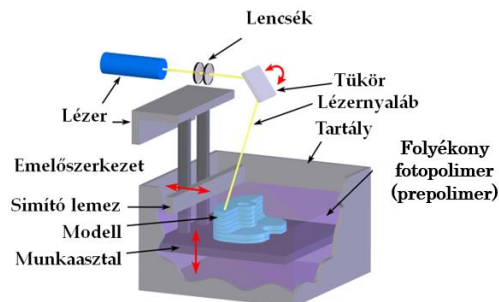
- a támaszanyag vízzel oldható, így könnyebb és egyszerűbb az eltávolítása,
- jó ár-érték aránya miatt a legkedveltebb eljárás a fotopolimer rendszerek közül,
- az AM technológiák közül az egyik legpontosabb, a teljes modell pontossága $\pm 0,05$ mm,
- 16-30 μm -es építési rétegvastagság.
- 0,6 mm-es minimális bordavastagság.

Hátrányai:

- időigényesebb gyártás a nagy pontosság miatt,
- a berendezés, valamint az alapanyag drága.

Az első AM eljárás a sztereolitográfia (SLA) (videó) volt, amelyet 1987-ben mutattak be (10. ábra). A fotopolimer alapanyagot lézer segítségével térhálósítja. A hatásmechanizmus ebben az esetben is szabad gyökös polimerizáció. Az alapanyag egy tartályban helyezkedik el, amelyben a munkaasztal található. Első rétegnél a munkaasztal csak egy rétegvastagsággal helyezkedik el a folyadékszint alatt. A lézer befutja a modell adott keresztmetszetét, így térhálósítja a réteget. Ezt követően a munkaasztal egy rétegvastagságnak megfelelő süllyedésével és a kialakult felszínnek a simító lemezzel történő elegyengetését követően a következő réteg kialakítása

megtörténik és kezdődhet az újabb keresztmetszet elkészítése a lézer segítségével. A folyamat a termék elkészültéig ismétlődik.



10. ábra SLA eljárás elve

Előnyei:

- a teljes modell pontossága $\pm 0,045$ mm,
- kiváló felületi minőség jellemzi a termékeket,
- a gyanta tartalmazhat akár töltő-erősítőanyagokat is,
- a térhálósíthatlan gyanta újrahasznosítható.

Hátrányai:

- támasz alkalmazása szükséges
- drága alapanyag és berendezés.
- költséges üzemeltetés
- szükség van utótérhálósításra.

A segédletben szereplő, a tananyag megértését segítő videók QR-kódja:

3D printing



FDM



Poly Jet



SLA



3. A laborgyakorlat során használt gépek, berendezések

Z310 3D PRINTER (11. ÁBRA)	
modelltér mérete: 203x254x203 mm rétegvastagság: 0,089 – 0,203 mm építési sebesség: ~ 25 mm/óra nyomtatófejek száma: 1 db (HP)	 11. ábra Z310 3D Printer
ALARIS 30 TÍPUSÚ ADDITÍV GYÁRTÓBERENDEZÉS (12. ÁBRA)	
modelltér mérete: 300x200x150 mm rétegvastagság: 0,028 mm építési sebesség: ~6 mm/óra nyomtatófejek száma: 2 db	 12. ábra Alaris 30 típusú AM berendezés
CRAFT BOT PLUS FDM ALAPÚ ADDITÍV GYÁRTÓBERENDEZÉS (13. ÁBRA)	
modelltér mérete: 250x200x200 mm rétegvastagság: 0,100 – 0,300 mm építési sebesség: 50-200 mm/s nyomtatószál átmérő: 1,75 mm	 13. ábra Craft Bot Plus AM berendezés

FORM2 TÍPUSÚ ADDITÍV GYÁRTÓBERENDEZÉS (14. ÁBRA)

modelltér mérete: 145x145x175 mm

rétegvastagság: 0,025/0,050/0,1 mm

építési sebesség: ~6 mm/óra



14. ábra FormLabs Form2 típusú AM berendezés

ZWICK Z005 TÍPUSÚ SZÁMÍTÓGÉP VEZÉRLÉSŰ UNIVERZÁLIS SZAKÍTÓGÉP (15. ÁBRA)

a gép méréshatára: 5 kN

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



15. ábra Zwick Z005 típusú univerzális szakítógép

3.1. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul, németül

Magyar	Angol	Német
Additív gyártástechnológia	Additive Manufacturing (AM)	*
Gyors prototípusgyártás	Rapid Prototyping (RPT)	Schnelle Prototypentwicklung
Gyors szerszámkészítés	Rapid Tooling (RT)	*
STL	Standard Tessellation Language	*
3D nyomtatás	3D printing	*
Sztereolitográfia	Stereolithography (SLA)	Stereolithographie
Szelektív lézer szinterezés	Selective Laser-sintering (SLS)	Selektiv-Leaser Sintern
Ömledékrétegzés	Fused Deposition Modelling (FDM)	*
Réteges kivágás és felépítés	Laminated Object Manufacturing (LOM)	*
Számítógéppel segített tervezés	Computer Aided Design (CAD)	*
Direkt szerszámozás	Direct Tooling	*
Indirekt szerszámozás	Indirect Tooling	*
Poliuretán (PUR)	Polyurethane	Polyurethan
Epoxi gyanta	Epoxy resin	Epoxidharze
Szilikon	Silicone	Silikongießmasse

* Az angol kifejezés a használatos

4. Felhasznált 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. Falk Gy., Bartha L., Kovács, J. G.: Rapid Prototyping – Rapid Tooling a gyakorlatban, Műanyag és Gumi, 42, 2005, 84-87
6. Schwarz P.: Ősminta- és szerszámkészítés epoxi és poliuretán alapú műanyagokból, Műanyag és Gumi 41, 2004, 167-170
7. <http://www.custompartnet.com>
8. <https://www.3dhubs.com>

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

Ezt az oldalt
kinyomtatva
hozza
magával!

Név:

Pontszám:

Neptun kód:

Dátum:

Ellenőrizte:

Gyakorlatvezető:

1. Feladat

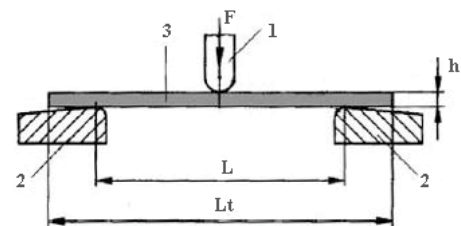
- Termékgyártás PolyJet, FDM valamint 3D printing technológiákkal.
- FDM gyártástechnológiával készült különböző térkitöltésű és fröccsöntött próbatestek hárompontos hajlító vizsgálata.

2. Alapadatok

Hőmérséklet:[°C]

Relatív légnedvesség: [%]

Alátámasztási távolság (L) [mm]



Hárompontos hajlítás elvi vázlata

1: nyomófej; 2: alátámasztás; 3: próbatétel;

h: próbatétel vastagsága [mm]; L az alátámasztási távolság [mm]

Lt próbatétel hossza [mm]

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:

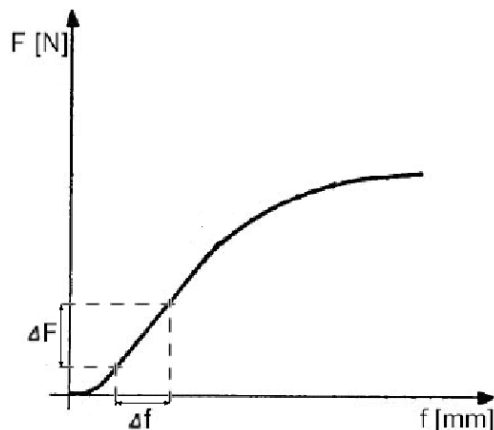
$$\sigma_{bh} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (1)$$

ahol: ahol F a töréshez tartozó erő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatétel szélessége [mm], h a próbatétel 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] (16. ábra).



16. ábra Húrmodulusz meghatározása (erő-lehajlás diagram)

No	Gyártás- technológia	Térkitöltés [%]	Próbatest adatai				
			h [mm]	b [mm]	l [mm]	m [g]	ρ [g/cm ³]
1	FDM	10			80	1,23	
2	FDM	50			80	2,41	
3	FDM	100			80	3,79	
4	Fröccsöntés	100			80	4,06	

No	Mért és számított eredmények						
	F [N]	ΔF [N]		Δf [mm]		σ_{bh} vagy σ_h [MPa]	E_h [GPa]
		F_1 [N]	F_2 [N]	f_1 [mm]	f_2 [mm]		
1	40,39	1,13	4,94	0,095	0,479		
2	70,74	1,60	7,37	0,090	0,456		
3	115,98	2,16	10,77	0,092	0,462		
4	169,28	2,77	13,68	0,086	0,431		