

# Aktív hűtés hatásainak vizsgálata 3D nyomtatás esetén

## Investigating the Effects of Active Cooling in 3D Printing

FICZERE P.

Budapest University of Technology and Economics, Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Műegyetem rkp. 3., H-1111 Budapest, Hungary. ficzere.peter@kjk.bme.hu

*Absztrakt. A 3D nyomtatás egyre szélesebb körben alkalmazott gyártási eljárás. A gépek és anyagok fejlődésével egyre több ember számára hozzáférhető ez a technológia, egyre egyszerűsödik az alkalmazása. Mindemellett a technológia sajátosságaiból adódóan igényel gyártástechnológiai ismereteket. Bizonyos esetekben nagy túllógások esetén szükséges a frissen lerakott rétegek mielőbbi megszilárdítása. Ezt aktív hűtéssel lehet megvalósítani, ami viszont hatással lehet a darab anyagtulajdonságaira is. A kutatás a gyártás során alkalmazott aktív hűtés hatásait vizsgálja.*

*Abstract. 3D printing is an increasingly widespread manufacturing process. With the development of machines and materials, the technology is becoming more accessible and easier to use. However, the technology's specificities mean that it requires knowledge of manufacturing technology. In some cases, it is necessary to solidify the freshly deposited layers as soon as possible in the event of large overhangs. This can be achieved by active cooling, which in turn can affect the material properties of the part. This research investigates the effects of active cooling during production.*

*Kulcsszavak: Aktív hűtés, 3D nyomtatás, FDM, PLA, anyagvizsgálat*

*Keywords: Active cooling, 3D printing, FDM, PLA, material properties*

## 1. Bevezetés

A 3D nyomtatás napjainkban egyre több helyen használt gyártási eljárás. Az utóbbi években mind több területen alkalmazzák ezt az eljárást, köszönhetően az egyre nagyobb anyagválasztéknak. A gépek között is egyre élesedő versenyhelyzetnek köszönhetően azok minősége – és ezáltal az azokkal gyártható darabok minősége is – javul. A piaci versenynek köszönhetően a gépek árai és az alapanyagok árai is jelentős mértékben csökkennek [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Ugyanakkor azt is látni kell, hogy a gépekkel és az anyagokkal szemben támasztott elvárások is megnöttek. Az additív gyártástechnológiák közül a gyakorlatban leginkább elterjedt az FDM (Fused Deposition Modelling) eljárás. A gép bekerülési költsége kicsi, valamint üzemeltetése nem támaszt komoly igényeket a felhasználóval szemben. Rengeteg – hőre lágyuló műanyag - alapanyag felhasználható hozzá. Ezek közül a legelterjedtebb a PLA (polilaktikus tejsav), mely olcsó és könnyen nyomtatható, és sok területen felhasználható. Ugyanakkor ennek az anyagnak nagy hátránya a relatíve kis hőtűrő képesség. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az

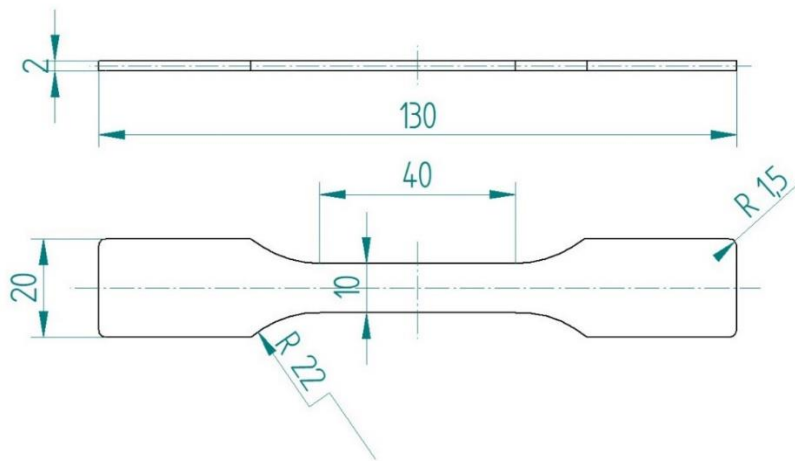
anyag elveszti szilárdságát 45-50°C felett, így olyan környezetben, ahol ezt meghaladó hőmérsékletek kialakulhatnak már nem alkalmazható. Sajnos a PLA ezen tulajdonsága jelentősen lecsökkenti a felhasználási területeinek a számát. Bár létezik több, nagyobb hőtűrő képességgel rendelkező alapanyag (ABS, PEEK) is, azok gyártása - és az alapanyag ára is jelentősen magasabb. Ezen probléma kiküszöbölésére fejlesztették ki az utóbbi években a HT PLA (High Temperature Poly Liquid Acid) nevezetű alapanyagot, mely a gyártói adatok alapján hőkezelés után akár 100°C-ig is alkalmazható. Ez az anyag könnyen nyomtatható, hőálló és vetemedésre is kevésbé hajlamos, ugyanakkor az előnyös tulajdonságok eléréséhez utólagos hőkezelést igényel. Jelen tanulmányban ennek az anyagnak, valamint a gyártásának vizsgálatával foglalkozom.

## 2. Módszer

Közismert, hogy az FDM eljárás egyik sajátossága, hogy az ilyen módon gyártott alkatrészek viselkedése orthotrop anyagtvénnyel írható le [7], [8]. További nehézség lehet az anyagok viselkedésének meghatározása dinamikus igénybevétel esetén [9].

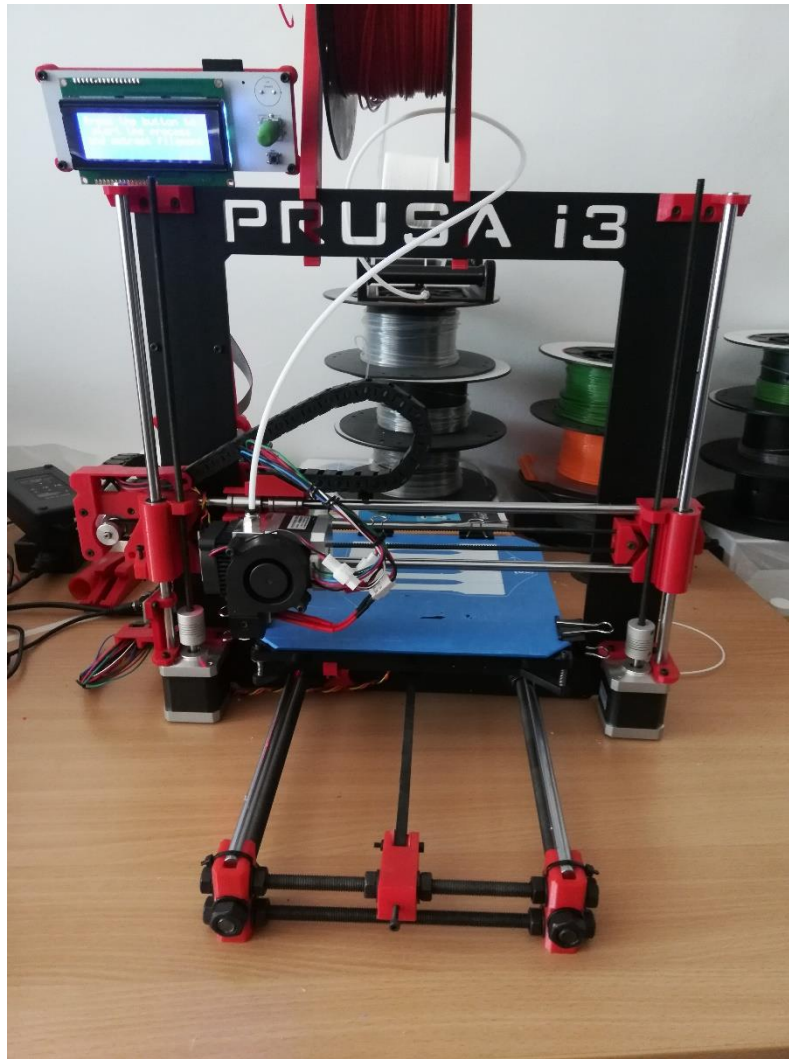
Mindezekén túl vannak olyan esetek, amikor a rétegek fektetése során a túllógások következtében szükségeszerű a lerakott réteg mielőbbi megszilárdítása, akkor az aktív hűtés bekapcsolása elengedhetetlen [11]. Ezzel elérhetjük ugyan, hogy nem esik szét a darab, de fontos annak vizsgálata is, hogy a folyamatos hűtés milyen hatással van az anyag rugalmasságára, szilárdságára, minőségére.

Ezek alapján mind fekvő-, mind pedig álló helyzetben nyomtatott szabványos rövid próbatesteket készítettem aktív hűtéssel és anélkül egyaránt. A szakítópróbatess kialakítását és méreteit mutatja az 1. ábra.



1. ábra: Rövid szakítópróbatess méretei

A darabok egy Prusa i3 „Hephestos” FDM technológiás 3D nyomtatóval készültek a BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszékén. A nyomtató a 2. ábrán látható.



2. ábra: A felhasznált Prusa i3 „Hephestos” 3D nyomtató

A gyártási paraméterek:

- Alapanyag: HT-PLA
- Nyomtatási hőmérséklet: 205°C
- Nyomtatási sebesség 40 mm/min
- Kitöltés 100%,  $\pm 45^\circ$

A szakítást 5 mm/min sebességgel végeztem.

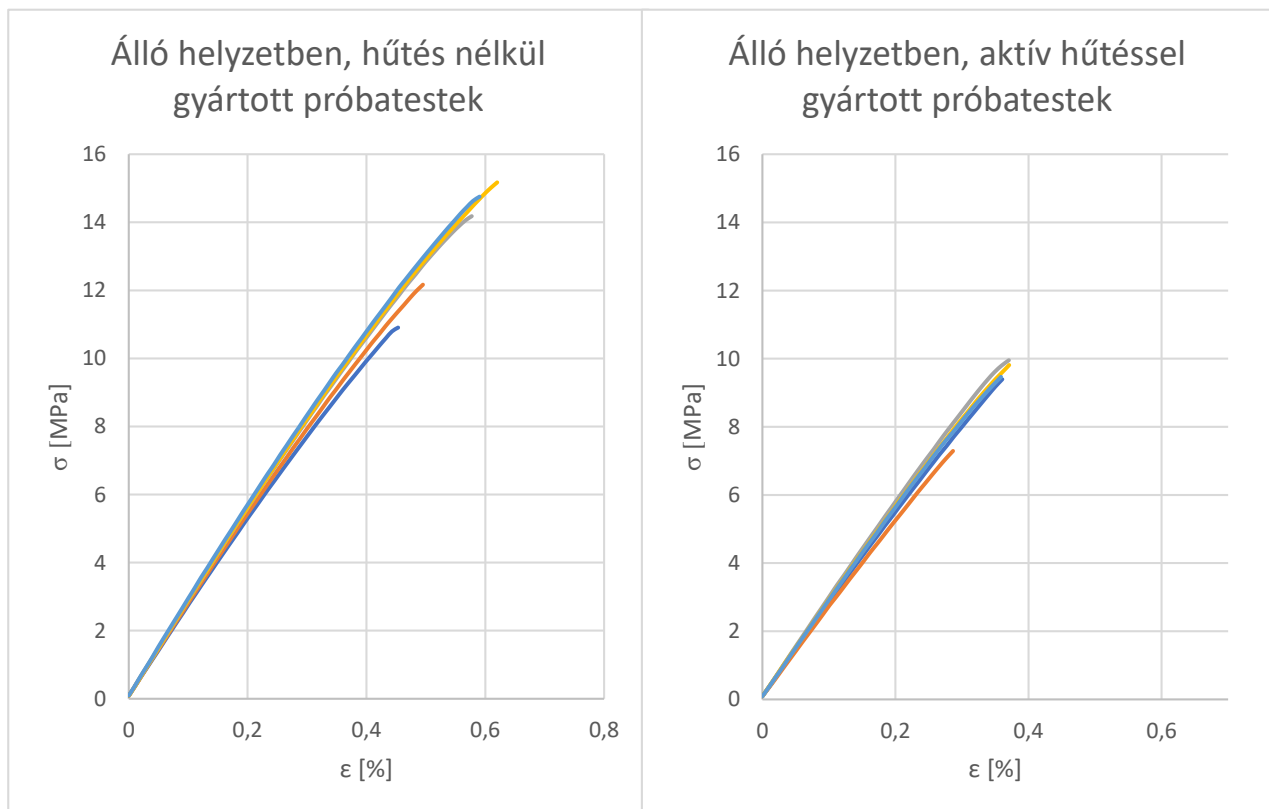
Mivel a szakítás eredményei azt mutatták, hogy az aktív hűtés hatására az anyag szilárdsága csökken, így annak okait is igyekeztem feltárni. Az egyik lehetséges ok, hogy a túl gyors visszahűlés okán a lerakott rétegeknek nincs kellő idejük terülni és ezáltal az összeolvadás mértéke csökken. Ez a gyakorlatban azt eredményezi, hogy a rétegek közti kapcsolat gyengébb lesz, ami hasonló hatással van az anyagtulajdonságokra, mint az alacsonyabb hőmérsékleteken történő nyomtatás [12].

Az újabb, ipar 4.0-nak megfelelő fejlesztéseknek köszönhetően lehetőség van a nyomtatás közben a gyártási paraméterek folyamatos nyomon követésére is. Ennek köszönhetően lehetőség volt a fúvóka hőmérsékletének vizsgálatára is.

A hőmérsékleti értékek kiolvasása konzolos kapcsolaton keresztül egy Repetier Host nevű programmal történt. A program egy diagramban ábrázolta a hőmérséklet alakulását az időben, de egy konzol ablakon keresztül adatok kb. 1-1,5 másodpercenként is megjelennek log üzenetként, amiket ki lehet exportálni és onnan alakíthatjuk ki saját igényre a diagramot. A cél hőmérsékleteket manuálisan közvetlen g-kód paranccsal lehet beállítani, ahogy a hűtés mértékét is. Innentől csak a különböző beállítások mellett kellett figyelni a diagramot, hogy túlhűt-e vagy tudja kezelni még a termisztor.

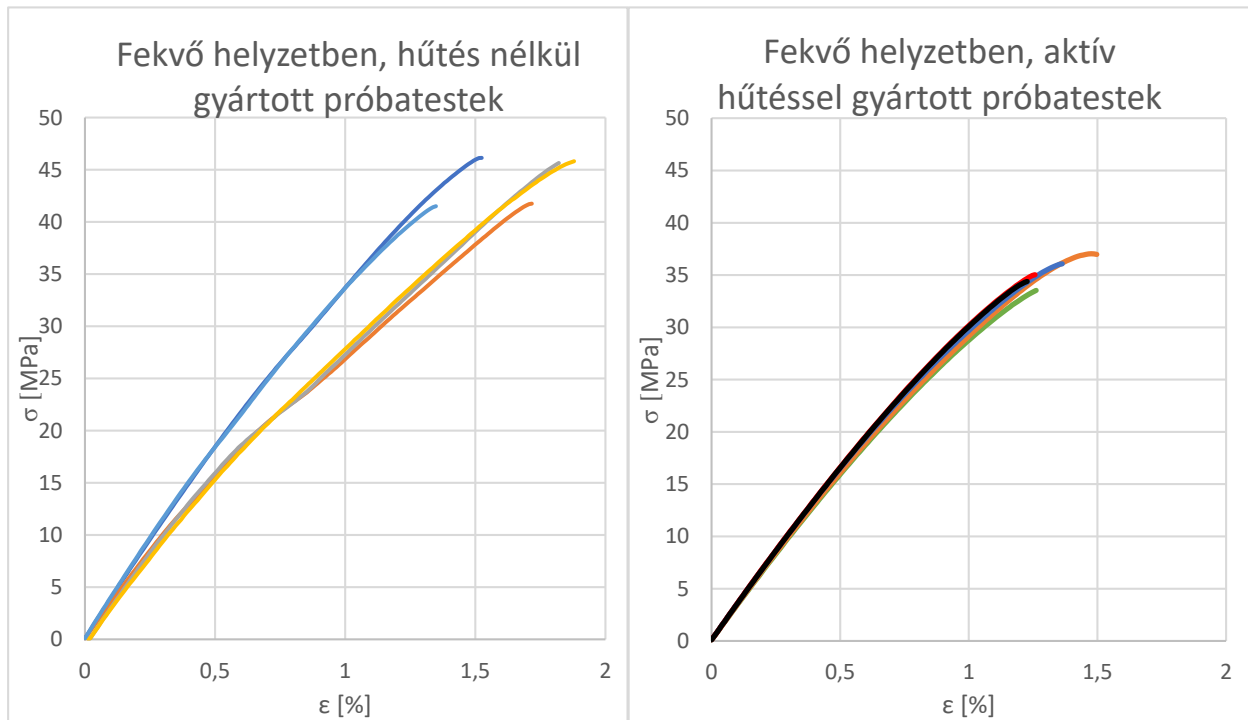
### 3. Eredmények

Az függőlegesen álló helyzetben nyomtatott próbatetek szakítóvizsgálatainak eredményeit mutatja a 3. ábra.



3. ábra: Álló helyzetben hűtés nélkül és aktív hűtéssel nyomtatott próbatetek szakítóvizsgálatainak eredményei

A fekvő helyzetben nyomtatott próbatetek szakítódiagramjait mutatja a 4. ábra.



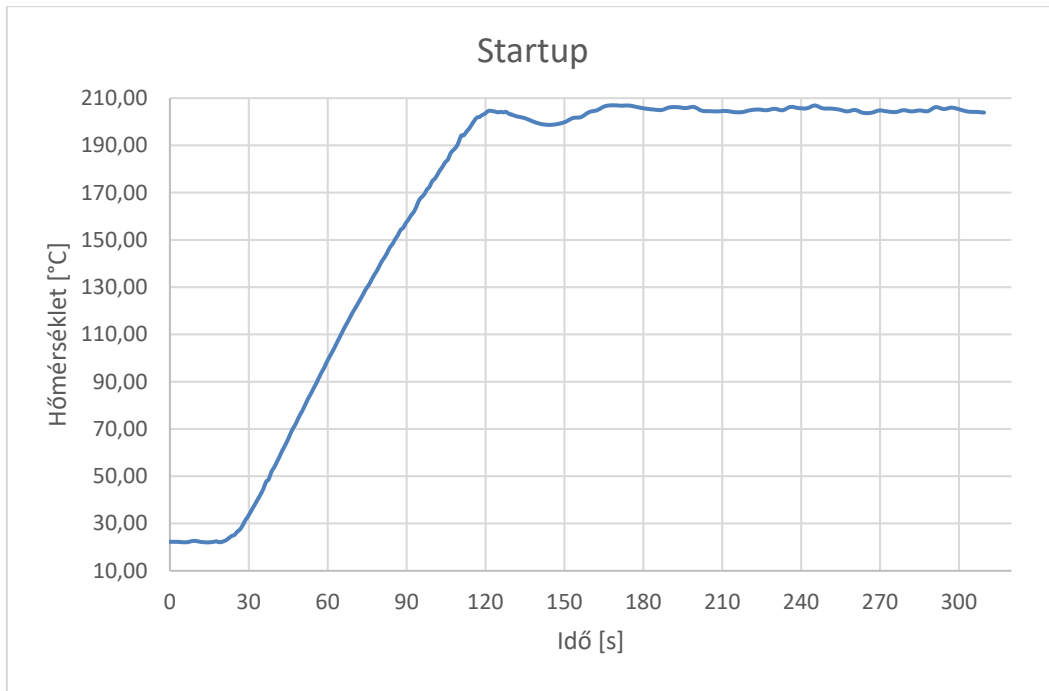
4. ábra: Fekvő helyzetben hűtés nélkül és aktív hűtéssel nyomtatott próbatetek szakítóvizsgálatainak eredményei

A mérési eredményeket számszerűen is mutatja az 1. táblázat.

1. táblázat A szakítóvizsgálatok számszerűsített eredményei

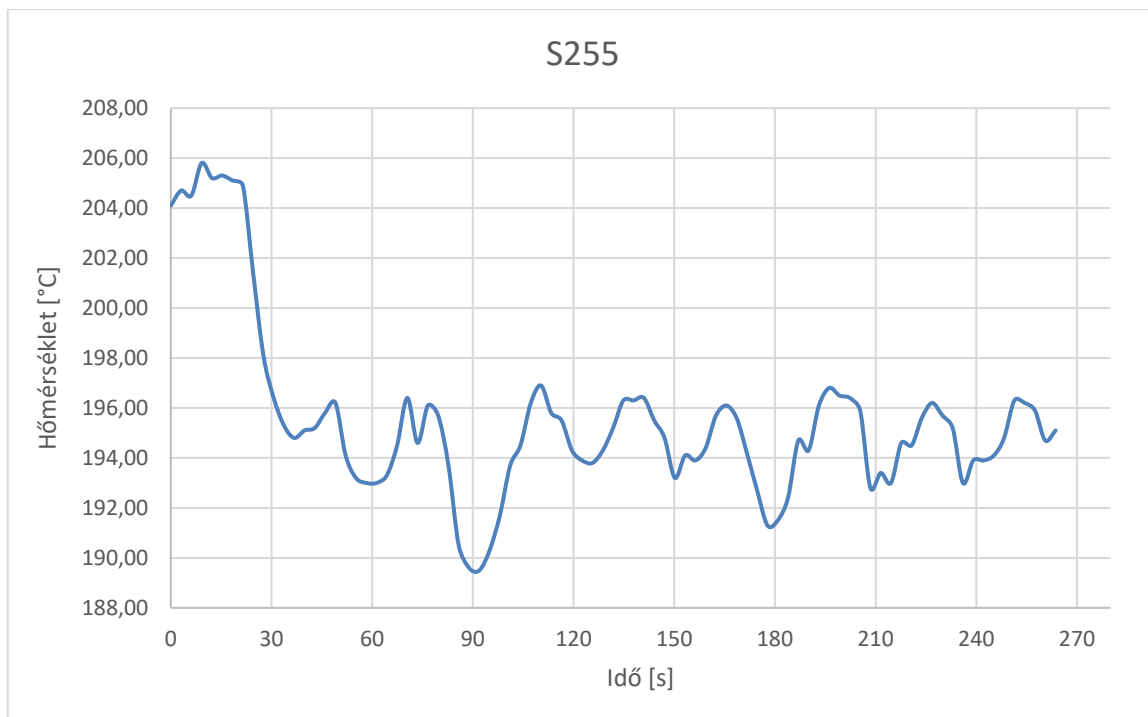
		R <sub>m</sub>	D (R <sub>m</sub> )	E	D (E)
		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
Álló	Aktív hűtéssel	9,18	1,08	1113,69	41,59
	Aktív hűtés nélkül	13,44	1,82	1105,73	31,78
Fekvő	Aktív hűtéssel	35,21	1,38	1378,19	23,02
	Aktív hűtés nélkül	44,23	2,37	1466,29	95,89

A fűvóka hőmérsékletének ellenőrzését online formában is megtettem. Az 5. ábrán a felfűtés folyamata látható a célértékként definiált 205°C-os hőmérsékletre. A hőmérséklet elérése után jól megfigyelhető a hőntartás folyamata is.



5. ábra: Felfűtés folyamata és beállítás 205°C célhőmérsékletre, valamint hőntartás

A 6. ábrán az aktív hűtés bekapcsolásának hatása látható. Ebben az esetben a ventilátort 100%-os teljesítményen működtetjük (S255).



6. ábra: Aktív hűtés bekapcsolásának hatása a fúvóka hőmérsékletére (100%)

A 7. ábrán 60%-os teljesítménnyel üzemelő aktív hűtésnek a fúvóka hőmérsékletére gyakorolt hatása látható.



7. ábra: Aktív hűtés bekapcsolásának hatása a fúvóka hőmérsékletére (60%)

## 4. Vizsgálat

Az 1. és a 2. ábrán látható diagramokat megvizsgálva kijelenthetjük, hogy a görbék meredeksége hűtéssel és hűtés nélkül is közel azonosnak tekinthető, azaz a Young féle rugalmassági modulusra nincs érdemi hatása a hűtésnek.

Ugyanakkor az is jól látható az 3. és 4. ábrán, hogy a hűtés hatására a daraboknak a szakítószilárdsága jelentős mértékben csökkent. Ez számszerűleg azt jelenti, hogy az aktív hűtéssel gyártott próbatestek szakítószilárdsága fekvő elrendezés esetén kb. 20%-kal-, míg álló elrendezés esetén kb. 30%-kal csökkent. Kijelenthető tehát, hogy az aktív hűtéssel gyártott darabok teherviselő képessége jelentős mértékben kisebb.

Érdeemes megvizsgálni a fúvóka hőmérsékleteket is. Az 5. ábrán látható, hogy mennyi a felfűtés ideje. Ez általában hozzáadódik a gyártásszimuláció során – a szerszám pályák és gyártási paraméterek alapján - számított gyártási időszükségletéhez. Az is jól látható, hogy a célértékként beállított hőmérséklet elérése és egy rövid túlfűtés után a hőmérsékletet szépen tartja a nyomtatófej.

A 4. ábrán látható az aktív hűtés bekapcsolásának hatása a nyomtatófejre. Megfigyelhető, hogy maximális teljesítményre (100%) állítva a hűtést a nyomtatófej is drasztikus mértékben el kezd lehűlni. Ennek oka, hogy a hűtés közvetlenül a frissen lerakott rétegre irányul, ami nagyon közel van a nyomtató fejéhez. Azt is megfigyelhetjük, hogy a gép megpróbál korrigálni, de nem tudja megfelelő mértékben - az eredeti célként beállított 205°C hőmérsékletre - visszafűteni a fejet. Ezáltal a valós nyomtatási hőmérséklet valahol 195°C környékén alakul, ami pl. a PLA anyag esetében a nyomtathatóság also határának közelébe esik. Ez pedig korábbi vizsgálatok [12] alapján a lefektetett szálak rosszabb terülését, ezáltal kisebb mértékű összeolvadását és gyengébb szilárdságot eredményez.

Az 5. ábrán azt az esetet láthatjuk, amikor a hűtés 60%-os teljesítményen üzemel. Megfigyelhető, hogy a ventilátor beindításakor itt is azonnal lehűti a fejet, de a gép ebben az esetben már képes korrigálni és kompenzálni a hűtés hatását.

## 5. Összegzés

Összegzésképpen megállapíthatjuk, hogy vannak olyan esetek, amikor bizonyos túllógások megvalósíthatók támaszanyagok nélkül is, aminek előnye, hogy jelentős mértékű gyártási időt és anyagot tudunk megspórolni. Ehhez aktív hűtésre – gyors hűlésre, szilárdulásra – van szükség. Ugyanakkor az aktív hűtés az a nyomtatott darabok szilárdságára is hatással van, gyengíti az így gyártott alkatrészek terhelhetőségét. A gép paramétereinek monitorozásával azt is láthatjuk, hogy az aktív hűtés során nem csak a legfelső réteg-, hanem a nyomtatófej is lehűl. Ez azt eredményezi, hogy az alapanyag már meg sem tud olvadni a megfelelő mértékben, így az összeolvadás mértéke is csökken.

Célszerű további vizsgálatokat végezni és optimalni a hűtés mértékét, valamint esetleg áramlástani szimulációk eredményei alapján a hűtőközeg irányát módosítani.

## Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Seregi Bálint Leonnak a nyomtatófej különböző paraméterek során mért hőmérsékleti adataiért.

## Hivatkozások

- [1] Ficzer, P., Borbás, L., Török, Á., Economical investigation of rapid prototyping. *International Journal For Traffic And Transport Engineering* 3 : 3 pp. 344-350. , 7 p. (2013), DOI: 10.7708/ijtte.2013.3(3).09
- [2] Ilyés, K., Kovács, N.K., Balogh, A., Borbás, E., Farkas, B., Casian, T., Marosi, Gy., Tomuță, I., Nagy, Zs.K., The applicability of pharmaceutical polymeric blends for the fused deposition modelling (FDM) 3D technique: Material considerations–printability–process modulation, with consecutive effects on in vitro release, stability and degradation, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, Volume 129, 2019, Pages 110-123, ISSN 0928-0987, <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.12.019>.
- [3] Ficzer, P., Effect of 3D printing direction on manufacturing costs of automotive parts, *International Journal For Traffic And Transport Engineering* 11 : 1 pp. 94-101. , 8 p. (2021), DOI: 10.7708/ijtte.2021.11(1).05
- [4] Kmetz, B., Takács, Á., Designing a filament recycling extruder, *Design of Machines And Structures*, 11: 2 pp. 46-52. , 7 p. (2021), DOI: 10.32972/dms.2021.006
- [5] Ficzer, P., The Impact of the Positioning of Parts on the Variable Production Costs in the Case of Additive Manufacturing”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. (2022) <https://doi.org/10.3311/PPtr.15827>



- [6] Ádám, B., Weltsch, Z., Thermal and Mechanical Assessment of PLA-SEBS and PLA-SEBS-CNT Biopolymer Blends for 3D Printing, *Applied Sciences-Basel* 11 : 13 p. 6218 (2021), <https://doi.org/10.3390/app11136218>
- [7] Ficzer, P., Orthotrop anyagmodell alkalmazása additív gyártástechnológiával előállított alkatrész méretezése során [Usage of orthotrop material law for additive manufacturing in part design], *GÉP* 67 : 5-6 pp. 78-81., 4 p. (2016)
- [8] Ficzer, P., Experimental Dynamical Analysis and Numerical Simulation of the Material Properties of Parts Made by Fused Deposition Modelling Technologies, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 48(3), pp. 221–225. (2020) <https://doi.org/10.3311/PPtr.13947>
- [9] Ficzer, P., Székely, P., Alakoptimált futóműalkatrész járműdinamikai vizsgálata macskaköves út esetén [Vehicle dynamic study of shape optimized suspension part in case of cobblestone road], *GÉP* 67 : 5-6 pp. 74-77., 4 p. (2016)
- [10] Alkentar, R., Huri, D., Mankovits, T. (2022). Numerical Investigation of 3D Lattice Infill Pattern Cellular Structure for Orthopedic Implant Design. In: Rackov, M., Mitrović, R., Čavić, M. (eds) Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering. KOD 2021. *Mechanisms and Machine Science*, vol 109. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-88465-9\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-88465-9_45)
- [11] <https://imgur.com/a/dZa9Y> (Letöltve: 2022. 03. 01.)
- [12] Ficzer, P., Lukacs, N.L., Borbas, L., The Investigation of Interlaminar Failures Caused by Production Parameters in Case of Additive Manufactured Polymers, *POLYMERS* 13 : 4 p. 556 (2021), <https://doi.org/10.3390/polym13040556>