

# ADDITÍV GYÁRTÁSSAL KÉSZÜLT DARABOK POROZITÁS VIZSGÁLATÁNAK ÉRDEKESSÉGEI

## INTERESTING ASPECTS OF POROSITY TESTING OF ADDITIVE MANUFACTURED PARTS

Dr. Herczeg Szabolcs<sup>0009-0008-5279-0012</sup> <sup>1\*</sup>, Fendrik Ármin<sup>0000-0001-6510-444X</sup> <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gépjárműtechnológia Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> MouldTech Systems Kft., Zalaegerszeg, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2024.3.ENG.005>

### Kulcsszavak:

Porozitás  
Porozimetria  
DMLM  
Ti64

### Keywords:

Porosity  
Porosimetry  
DMLM  
Ti64

### Cikktörténet:

Beérkezett 2024. január 22  
Átdolgozva 2024. április 10.  
Elfogadva 2024. április 27.

### Összefoglalás

Az additív gyártás során a végső termékeknél a porozitás olyan tulajdonság, amely jelentős hatással van a munkadarab végső szilárdságára és meghatározza annak minőségét. Legyen szó kutatásról vagy egyszerű additív gyártási folyamatokról fontos minőségi jelzőszám a munkadarabokban lévő porozitás.

A cikk részletezi, hogy milyen kihívásokkal szembesültünk mi, és milyen nehézségeket tapasztalhat más is egy ilyen látszólag "egyszerű" jelzőszám meghatározása vagy értelmezése során.

### Abstract

In additive manufacturing, porosity in final products is a property that has a significant impact on the final strength of the workpiece and determines its quality. As a result, it is a requirement, and also a quality indicator number, to specify the obtained porosity of the workpieces.

This article addresses the challenges we encountered, and the difficulties others may face in determining or interpreting such a seemingly "simple" index in the realm of additive manufacturing.

## 1. Bevezetés

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Gépjárműtechnológia Tanszékén (GJT) már több, mint két évtizede foglalkozunk az additív gyártásmódok vizsgálatával, azon belül már akkor is külön figyelmet szentelve a fémpont alapanyagként használó technológiákra, mint pl.: a közvetlen lézersugaras fémpor olvasztás (Direct Metal Laser Melting - DMLM).

Az indulás óta, a DMLM technológiával együtt fejlődve, sok érdekességet lehetett tapasztalni a technológiával kapcsolatban és rengeteg kérdés vetődött fel, amelyek egy részét elkezdtük megválaszolni. Jelen cikkben egyet választottunk ki ezekből.

A DMLM technológiával kezdetekben mindenki csak kísérletezett. Ahogy a technológia fejlődött alkalmas lett szemléltető modellek gyártására, majd darabok kis szériás gyártására és most már egyre jobban lehet funkcionális (= üzemszerűen beépíthető) alkatrészek gyártására is használni [1, 2]. Ezt a fejlődést a mechanikai tulajdonságok folyamatos fejlesztése, és az ebből eredő anyagtulajdonság fejlődése tette lehetővé.

Additív gyártás esetén a végső daraboknál a porozitás az egyik olyan tulajdonság, amely nagyban befolyásolja a munkadarab végső szilárdsági tulajdonságát és a meghatározza annak

\* Kapcsolattartó szerző.

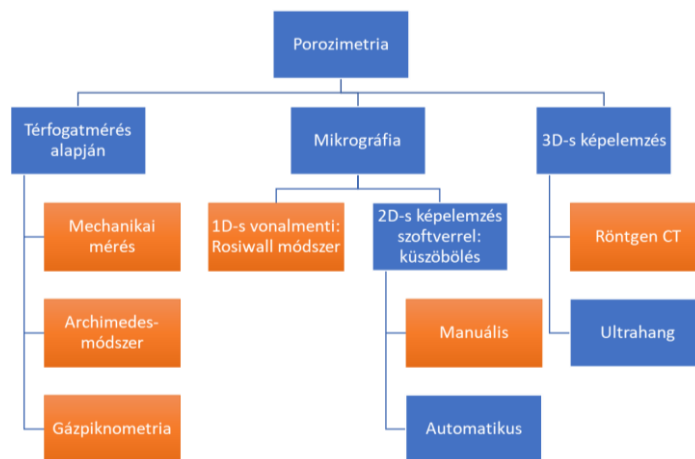
E-mail cím: [herczeg.szabolcs@kjk.bme.hu](mailto:herczeg.szabolcs@kjk.bme.hu)

minőségét is. Az anyag porózusságának hatását és azok keletkezését más szerzők [3, 4] már nagyon jól összefoglalták. Egy kutatásnál, de akár egy egyszerű gyártánál is, követelmény és egy minőségi jelzőszám is, hogy megadjuk a munkadarabok kapott porozitását.

Ez a cikk arról szól, milyen nehézségekbe ütköztünk mi, és fog más is ütközni, egy ilyen „egyszerűnek tűnő” jelzőszám meghatározásánál, vagy éppen annak értelmezésénél.

## 2. A porozitásmérésről általánosságban

Ha a szakirodalmakat megnézzük, akkor egy szilárd test porozitás mérésére 5-10 módszer is adódik egyszerre. Ezek a módszerek vagy közvetlenül visszaadják a porozitást, vagy sűrűséget mérnek, és a tömör anyag elméleti sűrűségéből következtetnek a pórusok százalékos mennyiségére. Az első ábrán összefoglaltuk magunknak, hogy mi milyen módszereket találtunk, és külön megjelöltük, hogy összehasonlító méréseinknél melyek eredményeit vizsgáltuk meg.

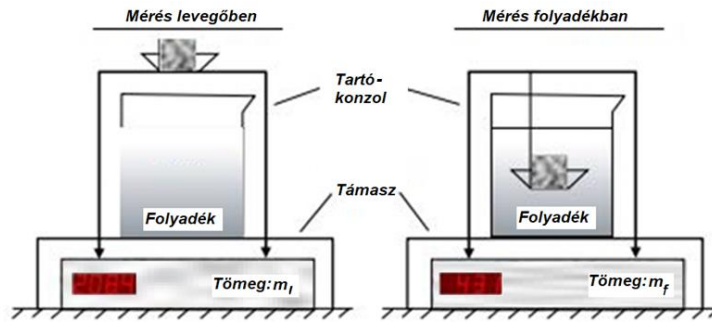


1. ábra. A porozimetriai mérések kategorizálása (a 6 db vizsgált módszerrel)

A „Mechanikai mérések” módszernél első lépésben a minta sűrűségét számítjuk ki és abból számítjuk a porozitást. A sűrűséghez a minta tömegét akár egy nagy pontosságú mérleggel is meg tudjuk mérni. Ha egyszerű geometriai alakzatunk van (gömb, henger, hasáb, ...), akkor a fizikai méreteket viszonylag nagy pontossággal tudjuk mérni (mikrométer, tolómérő, mérőgép), amelyből a térfogat kiszámítható. A módszer hátránya, hogy bonyolult alakzatoknál nehézkes a valós térfogat meghatározása. Illetve a pórusok méretére, eloszlására egyáltalán nem lehet következtetni.

Az „Archimedes-módszer” [3] [5] segítségével szintén csak a vizsgált minta sűrűségét ( $\rho_{\text{minta}}$ ) tudjuk meghatározni, majd ebből tudunk a porozításra következtetni. A mérés során a minták tömegét levegőben ( $m_{\text{levegőben}}$ ), majd folyadékban ( $m_{\text{folyadékban}}$ ) egy mérleggel megmérjük (2. ábra). A két érték ismeretében egy egyszerű kivonással megkaphatjuk a kiszorított folyadék tömegét. A folyadék sűrűségének ( $\rho_{\text{foly}}$ ) felhasználásával megkapjuk a kiszorított folyadék térfogatát, ami egyben a vizsgált minta térfogata is. Ha a minta sűrűségét még pontosabban akarjuk meghatározni, akkor a levegő felhajtó erejét is, annak sűrűségével ( $\rho_{\text{levegő}}$ ) figyelembe kell venni (1. egyenlet).

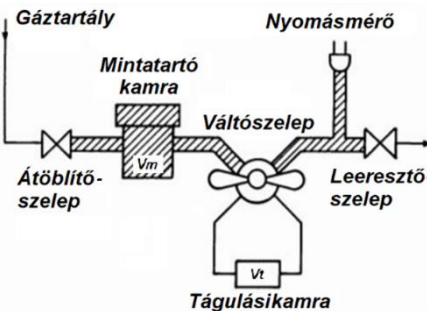
$$\rho_{\text{minta}} = (\rho_{\text{foly}} - \rho_{\text{levegő}}) \cdot \frac{m_{\text{levegőben}}}{m_{\text{levegőben}} - m_{\text{folyadékban}}} + \rho_{\text{levegő}} \quad (1)$$



2. ábra. Az Archimedes mérés menete: balra a levegőben, jobbra folyadékban [5]

Az Archimedes-módszer előnyei közé tartozik, hogy roncsolásmentes vizsgálatot tesz lehetővé. Az eljárás hátránya, hogy csak olyan mintákat vizsgálhatunk, amelyeknek zárt a térfogatuk, elkerülendő a test belsejébe való mérőfolyadék beáramlás, ami meghamisítaná a sűrűség értékét. Továbbá a módszer nem ad képet a pórusok elhelyezkedéséről, nagyságáról, illetve az olyan zárt pórusokról, melyekben az alapanyag olvadás nélkül, por formájában rekedt.

A „Gázpiknometria” [3] [6] is egy roncsolásmentes, térfogatmérő módszer, amely nyomáskiegyenlítésen alapul. A hélium-piknométeres méréshez két tökéletesen ismert térfogatú kamrára, egy nyomásmérőre és egy szabályozható nagynyomású hélium-gáz tartályra van szükség. Az első kamrára csatlakozik a nagynyomású gáztartály és ide helyezük be a mérendő mintadarabot légköri nyomáson ( $p_{\text{környezeti}}$ ), majd lezárjuk. A második kamra a tágulási kamra, ami szeleppel a környezethez csatlakozik. A 3. ábrán látható a rendszer elvi felépítése.



3. ábra. A gázpiknometriai mérés sematikus ábrája [7]

Az ismeretlen térfogatú mintát ( $V_{\text{minta}}$ ) behelyezzük a helyére és a rendszert átöblítjük héliummal. Amikor ez a folyamat befejeződött, a kamrákat el kell zárni a külső környezettől, majd:

- A két kamrát ( $V_{\text{minta}}$  és  $V_{\text{tágulási}}$ ) azonos, nagyjából környezeti nyomás alá helyezzük;
- A kamrákat elszigeteljük egymástól, és a mintát tartalmazó oldalt nagy nyomás alá helyezzük a hélium tartályból. A keletkező nyomás lesz a  $p_1$  értéke;
- A két térfogatot szelepnnyitással újra összekapcsoljuk. Itt kapjuk meg a  $p_2$ -es nyomásértéket.

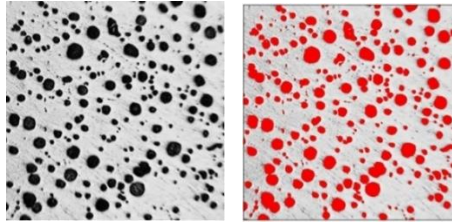
Ezt követően a három nyomás ( $p_{\text{környezeti}}$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ) és a két kamra térfogatának ismeretében a Boyle – Mariotte - törvényt használjuk a minta térfogatának kiszámításához (lásd 2. egyenlet):

$$V_{\text{minta}} = \frac{V_{\text{elsődleges}} - V_{\text{tágulási}}}{\frac{p_1 - p_{\text{környezeti}}}{p_2 - p_{\text{környezeti}}} - 1} \quad (2)$$

A vizsgált minta tömegét előzetesen mérleggel megmértük és most már ismerjük térfogatát is, így kiszámítható annak sűrűsége. A kapott sűrűség érték a 100%-osan tömör anyag referencia sűrűségével való összehasonlítás révén meghatározható a porozitás-arány.

A fém próbatestek „mikroszkópos vizsgálatát” [8] [9] metallográfiának nevezzük. Mikroszkópon keresztül, keresztmetszeti síkcsiszolatban, megfigyelhető az anyag szerkezete. A látható kép elemzésével közvetlenül a porozitási arány értékéhez juthatunk.

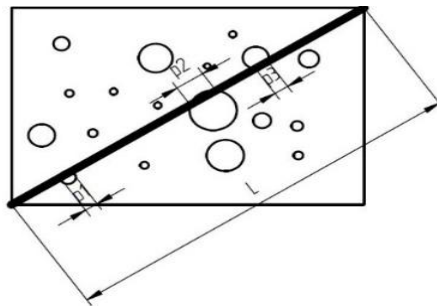
A módszer esetén a szürkeárnyaltos képekből ki kell szűrniünk a számunkra releváns információkat, egy küszöbérték beállításával úgy, hogy a keresett objektumokra és háttérre bontjuk a felvételt a képpontok intenzitása alapján. Egy saját mintánk küszöbölése az 4. ábrán látható.



4. ábra. A mintánkon vörössel látható a felismert objektum a küszöbölést követően

Ez a módszer lehetővé teszi a pórusok helyének, méretüknek és alakjuknak becslését a mintában, de nem veszi figyelembe a teljes mintát és roncsolásos eljárásnak minősül. [3]

A „*Rosiwall-módszer*” eredetileg arra szolgál, hogy mikroszkópi vizsgálatok során az egyensúlyihoz közeli állapotú ötvözetekben két fázis arányát mérhessük meg. Az 5. ábrán bemutatott mérés okulárskálával történik, amit ráhelyezünk a vizsgálandó keresztmetszetre. [10]

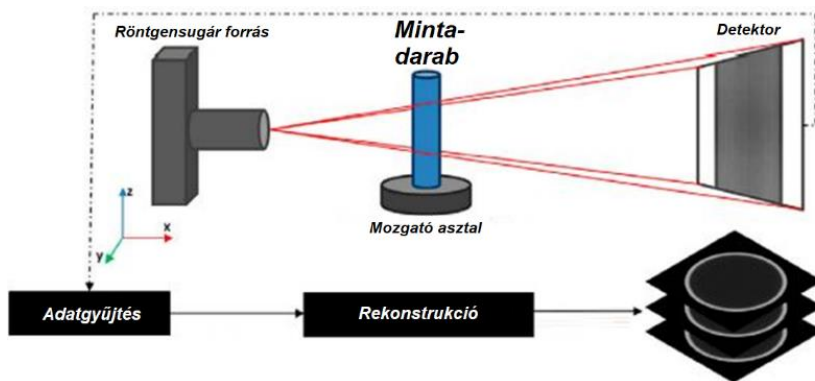


5. ábra. A Rosiwall-módszer felhasználása a porozitás-arány meghatározására

Amennyiben tudjuk az okulárskála hosszát ( $L$ ), illetve a porozítások összeadott skálaletakarását ( $P_i = P_1 + P_2 + \dots$ ), akkor kiszámolható a vonalmenti porozitás aránya (3. egyenlet):

$$\text{porozitás arány } [\%]_i = \frac{P_i}{L} \cdot 100 \quad (3)$$

A komputer-tomográfia (Computer Tomography - CT) egy roncsolásmentes mérési technika, amely képes a pórusok/hibák méretének, alakjának, térfogatának és eloszlásának teljes elemzésére a vizsgált térfogaton belül. Elve leegyszerűsítve (lásd 6. ábra), hogy a röntgensugarakat a próbatestünkön átvezetjük, majd az így energiájában megváltozott sugarakat egy detektorral felfogjuk. Anyaghibák esetén különböző intenzitások jönnek létre. A detektorból érkező elektromos jelekből egy számítógép segítségével készül el a rekonstruált 2D-s vagy 3D-s röntgenfelvétel. [11]



6. ábra. A röntgen CT képalkotásának sematikus ábrája [12]

### 3. Összehasonlító mérések

#### 3.1. A mintadarabok bemutatása

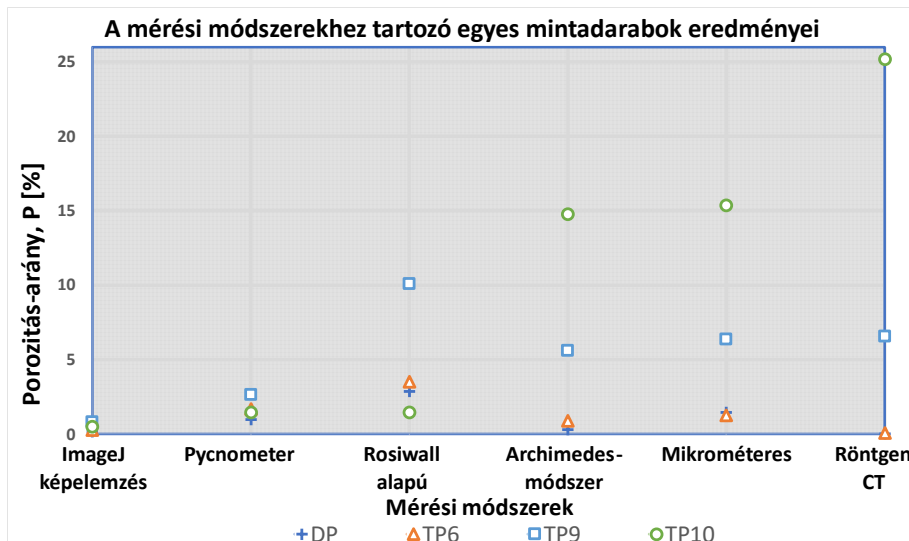
A porozimetriai összehasonlító méréseink során olyan lézeres olvasztással készült mintadarabokat vizsgáltunk, amelyek valamely gyártási paraméterben eltértek egy bizonyos 100% sűrűségűnek tekinthető standard paraméterekkel legyártott mintadarabtól. Ez a darab a táblázatainkban a DP (default parameter) megjelöléssel szerepel. Eredendően ez számított volna viszonyítási alapként a többi mintadarab eredményeihez képest, viszont a mérések során kiderült, nem elegendően porozitásmentes. A rendszerünk hitelesítéséhez rendelkezésünkre állt olyan, a minták anyagával megegyező etalon darab, ami az összes általunk készített mintánál sűrűbbnek bizonyult. Ez lett végül a viszonyítási alapunk. Az összes vizsgálandó test titán-alumínium ötvözet (Ti6Al4V) hengeres formában. A különböző porozitás értéket az olvasztást végző lézersugár pásztázási távolságának növelésével értük el. A feltétel az volt, hogy különböző porozitású darabokat kapjunk vissza, amelyeket különböző porozimetriai módszerekkel vizsgáltunk meg. A reprodukálhatóság miatt az 1. táblázatban adtuk meg a gyártási paramétereket.

1. Táblázat, Egy EOS M100 géppel, Ti64 porból készített mintáink főbb gyártási paramétereit

Gyártási paraméterek	Mintadarab jelölések			
	DP	TP6	TP9	TP10
Pásztázási távolság [mm]	0,06	0,12	0,18	0,24
Lézer teljesítmény [W]	1400			
Folt mozgatási sebesség [mm/s]	100			

#### 3.2. A mérési eredmények és azok értékelése

Az 1. ábrán látható módszerekkel vizsgáltuk a gyártott darabjainkat. A mechanikai mérés, az Archimedes-módszer, a Rosiwall-módszer és a szoftveres mérés saját belső tanszéki mérések voltak. A CT méréseket egy Nikon XT H225ST típusú röntgentomográfon, a gázpiknometriai méréseket egy Ultracyc-5000 típusú gázpiknométeren végeztük el, külsős intézeteknél.



7. ábra. Azonos darabokon különböző módszerekkel kapott porozitás értékeink

A különböző mérési módszerek által, ugyanazon darabra vonatkozó, porozitás értékeket a 9. ábrán mutatjuk be. A vízszintes tengelyen a különböző mérési módszerek találhatóak, ezek által a négy vizsgált darabon mért porozitás értékeket szaggatott vonallal kötöttük össze. Ezek a szaggatott vonalak nem hivatottak a változás trendjét mutatni, hanem csak arra szolgálnak, hogy az azonos darabokhoz tartozó értékeket könnyebb legyen beazonosítani.

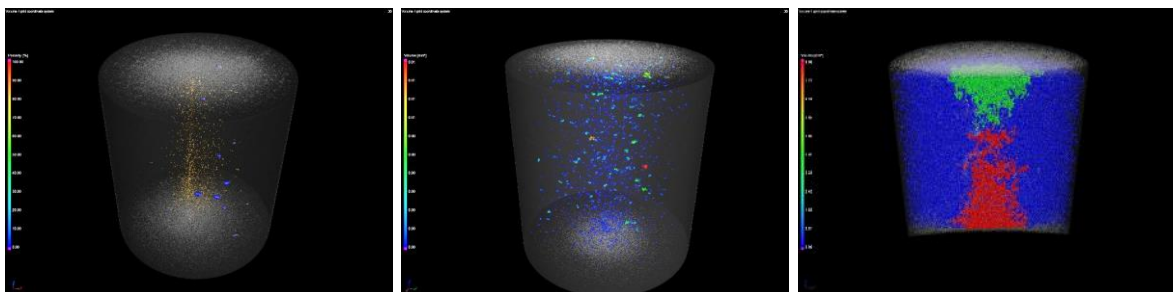
### 3.3. A diagram értelmezése

Nézzük meg cikkünk fő célját, hogy a mért diagramok alapján milyen következtetéseket lehet levonni a különböző porozitás mérési eljárások által visszaadott érték összehasonlítása alapján.

A gyártási paraméterek változtatása alapján, a várt eredmény az lenne, hogy a legkisebb porozitás értékkel a DP jelű daraboknak kellene rendelkeznie, majd egyre növekvő a pásztázási távolság mellett (TP6, TP9, TP10 lásd 1. sz. táblázat) egyre nagyobb porozitás értéket kapunk.

Az egyes mérési módszerek külön-külön vizsgálva nagyjából vissza is adják az előbb említett elvárt trendet, ez alól egyedüli kivétel volt a TP10-es minta Rosiwall-módszeres értéke.

A mérési módszerek egymáshoz történő hasonlításából látható, hogy a gázipkometriai és a mikroszkópos képelemzési vizsgálatokkal (ImageJ, Rosiwall) jelentősen eltérő eredményeket kaptunk a többi eljárás eredményeihez képest. Ennek oka a képelemzéses módszereknél lehet, hogy a mérési eljárások túlnyomóan szubjektív megítélés alapján készültek. Azaz a mérési határok nagyban függtek attól, hogy a mérést végző személy, hova állítja be a kiértékelési határokat. Továbbá a vizsgált keresztmetszetek jellemzői nem reprezentálják a próbatestek teljes egészét. Ezt a megállapítást erősíti, hogy rendelkezésünkre állnak a minták röntgentomográfia felvételei is (8. ábra), ami a porozítások aszimmetrikus térbeli elhelyezkedéséről ad képet.



8. ábra. A DP, a TP6 és TP9 számú minta 3D-s röntgentomográfiai képe

A maradék három módszer (Mikrométeres-, Archimedes-, röntgen CT vizsgálat) eredményei viszont hasonlóságot mutatnak egymással. A röntgen CT esetében megjegyzendő, hogy bár az eredmények tendenciája hasonló, értékeiben nagyobb eltérés tapasztalható. Ha ennek a lehetséges okait keressük, elképzelhető, hogy például az Archimedes-módszer eljárásánál azért kapunk kisebb értékeket, mert a zárt pórusok nem gázokat, hanem olvadatlan fémport tartalmaznak. A fémpor sűrűsége jóval nagyobb, mint bármilyen gázé. Ugyanez a jelenség lehet a mikrométeres eljárás esetében is. A röntgentomográfia elemzés folyamán a fémporral telített pórusok is jól kirajzolódnak, hiszen más lesz a fémpor és a tömör anyag röntgensugár elnyelődése.

A cikk alapjául szolgáló mérések tanulsága, hogy nem tudjuk megállapítani, melyik mérési módszer adhat olyan eredményt, amely bázisnak vehető, és amelyhez képest a többi módszerek eredményei hozzá hasonlíthatóak. Egy-egy mérési módszer önmagában nem lesz teljesen egzakt, az általa adott porozitás értéket nem lehet összehasonlítani egy másik módszerrel kapott eredménnyel. A különböző mérési módszerek nem helyettesítik, hanem kiegészítik egymást.

Különböző darabok összehasonlító méréseinél ügyelni kell arra, hogy ugyanazon mérési módszerrel kapott eredményeket hasonlítsunk össze.

### Támogatás hivatkozása

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) finanszírozta. Projekt címe: „Innovatív és újszerű megoldásokra épülő többcélú merevszárnyú drón és a fejlesztéséhez szükséges kompetenciák létrehozása”. A pályázat száma: 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139. Belső méréseinket Böhm Gergely szakdolgozós diákunk segítette. A CT méréseket a Pannon Egyetem, Anyagmérnöki Intézetében Dr. Kovács András végezte el részünkre. A gázipkometriai méréseket az Anton Paar Hungary Kft.-nél Kokavec László és Dudás Imre szolgáltatta számunkra. A szerzők ezúton is köszönik a pénzügyi támogatást és az intézetek önzetlen segítségét!

### Hivatkozott irodalmak

- [1] J. C. Najmon, S. Ræisi and A. Tovar, "Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry," Elsevier, vol. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, pp. 7-31, 2019., DOI: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9
- [2] EOS GmbH., "Taking the laser lead," Elsevier, Vols. May-June, pp. 24-24, 2014.
- [3] T. DE TERRIS, O. ANDREAU, P. PEYRE, F. ADAMSKI, I. KOUTIRI, C. GORNY és C. DUPUY, „Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of Selective Laser Melted metallic parts - Additive Manufacturing,” pp. 802-813 in Vol. 28., August 2019., DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.035
- [4] F. Honarvar és A. Varvani-Farahani, „A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control,” Ultrasonics, december 2020.
- [5] A. B. Spierings és M. Schneider, „Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts,” Institute for Rapid Product Development, pp. 380-386, 2011., DOI: 10.1108/13552541111156504
- [6] F. J. Semel és D. A. Lados, „Porosity analysis of PM materials by helium pycnometry,” Powder Metallurgy, pp. 173-182, 2013., DOI: 10.1179/174329006X95347
- [7] C. S. Chang, „Measuring Density and Porosity of Grain Kernels,” Association of Cereal Chemists, 1988.
- [8] Z. Dr. Gácsi és P. Dr. Barkóczy, Számítógépi képelemzés, Miskolc: Nemzeti tankönyvkiadó, 2009.
- [9] I. Tóth, Szabadon választott téma a digitális képfeldolgozás témakörében, Képjavítási eljárások, Debrecen: Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, 2008.
- [10] Anyagtudomány és Technológia Tanszék, „Mikroszkópvizsgálat elektronikus jegyzet,” BME, Budapest, 2021.
- [11] S. Damjanovich, J. Fidy és J. Szöllősi, Orvosi biofizika, Budapest: Semmelweis Egyetem, 2007, p. 698.
- [12] X. Cai, B. S. Wong, A. A. Malcolm és Z. Fan, „Measurement and characterization of porosity in aluminium selective laser melting parts using X-ray CT,” Virt. & Phys. Prot, pp. 195-206, 2015., DOI: 10.1080/17452759.2015.1112412