Biopolimer alapú, 3D nyomtatás során in-situ habosodó filamentek fejlesztése különböző hatásmechanizmusú habképzőszerek alkalmazásával

Kunsági V., Tomin M.

Accepted for publication in Polimerek
Published in 2025
DOI:

KUNSÁGI VIKTÓRIA[1], TOMIN MÁRTON[1]

BIOPOLIMER ALAPÚ, 3D NYOMTATÁS SORÁN IN-SITU HABOSODÓ FILAMENTEK FEJLESZTÉSE KÜLÖNBÖZŐ HATÁSMECHANIZMUSÚ HABKÉPZŐSZEREK ALKALMAZÁSÁVAL

DEVELOPMENT OF BIOPOLYMER-BASED FILAMENTS FOR IN-SITU FOAMING DURING 3D PRINTING BY USING DIFFERENT BLOWING AGENTS

Manapság a 3D nyomtatás egyre nagyobb teret nyer magának mind ipari, mind hobbi szinten egyaránt. Kutatásunk célja különböző hatásmechanizmusú habképzőszerek alkalmazhatóságának vizsgálata biopolimer alapú, 3D nyomtatás során in-situ habosodó filamentek fejlesztéséhez. Az ideális habképzőszer kiválasztása után a nyomtatási paraméterek expanzióra gyakorolt hatását vizsgáltuk meg. Ezt követően egy gyártástechnológiai lépésben a keresztmetszet mentén változó sűrűséggel rendelkező szendvicsszerkezetet, majd egy azonos sűrűségű homogén habszerkezetet gyártottunk és határoztuk meg ezek hajlító igénybevétellel szembeni viselkedését.

Nowadays, 3D printing is becoming more and more popular, both at industrial and at hobby level. The aim of our research was to investigate the application of blowing agents with different mechanisms of action for the development of biopolymer-based filaments for in-situ foam 3D printing. After selecting the suitable blowing agent, the influence of printing parameters on the expansion was investigated. Subsequently, a sandwich structure with varied density along its cross-section was fabricated in a single manufacturing step. For comparison, a homogeneous foam structure with the same average density was also produced, and the mechanical response of both structures under bending was investigated.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a 3D nyomtatás egy gyorsan fejlődő iparág, amely a népszerűségét számos, más gyártástechnológiákkal szemben mutatott előnyének köszönheti, például lehetővé teszi a komplex geometriák nyomtatását és egyedi alkatrészek gyors előállítását minimális hulladéktermelés és károsanyag kibocsátás mellett. Éppen ezért előszeretettel alkalmazzák ipari és otthoni környezetben is [1, 2].

A műszaki célú felhasználást korlátozza a nyomtatott szerkezetek anizotrópiája és a rétegek közötti gyenge adhézió, amelyek miatt a gyártott termék mechanikai tulajdonságai gyengébbek. Ezek kompenzálását teszi lehetővé az in-situ habosodó nyomtatószálak alkalmazása, amelyek kémiai (CBA), illetve fizikai (PBA) habképzőszereket vagy expandálható mikrogyöngyöket (TEM) tartalmaznak. A magas hőmérsékletű fúvóka hatására a nyomtatószálban található habképzőszer bomlásnak indul, ami gázfelszabadulással jár, majd az anyag a fúvókából kilépve a lecsökkent nyomás következtében expandálódik, azaz habosodás megy végbe. A habosodás hatására csökkennek a rétegek közötti hézagok, így javul a rétegközi tapadás. További előny, hogy a habosodás mértékét a fúvóka hőmérséklet növelésével/csökkentésével szabályozni tudjuk. Ezzel lehetőségünk nyílik egy gyártástechnológiai lépésben, a keresztmetszet mentén változó sűrűséggel rendelkező termékek gyártására, amelyek a homogén szerkezetekhez képest jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek [3, 4].

Az in-situ habosodó filamentek kedvező tulajdonságai egyre több kutató érdeklődését keltették fel. Nieduzak és társai [5] TEM-részecskéket tartalmazó, újrahasznosított HDPE/PP keveréket (blendet) fejlesztettek ki, majd nyomtatási próbákkal igazolták, hogy a habosodás hatására kisebb lesz a próbatest vetemedése. Egy, a Massachusettsi Egyetemen (University of Massachusetts Lowell) működő kutatócsoport politejsav (PLA) mátrixhoz kevertek TEM-et, és az alapanyagból gyártott filamentet alkalmazva kimutatták, hogy a nyomtatási sebesség és a nyomtatási hőmérséklet nagy hatással van a nyomtatott termék habosodásának minőségére [6]. Emellett bebizonyították, hogy trietil-citrát lágyítószerként való alkalmazásával a gyártási hőmérséklet csökkenthető, így elkerülhető a nem kívánatos előhabosodás [7, 8].

[1] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

E vizsgálatoknál megkönnyítette a gyártást, hogy habképzőszerként TEM-részecskéket alkalmaztak, mivel ezek elősegítik a cellanukleációt, ami kontrollált expanziót tesz lehetővé.

Másik lehetséges habosodási eljárás a habosodó nyomatószálak előállításakor a fizikai habképzés. A környezetvédelmi irányzatok hatására azonban napjainkban a szénhidrogének, mint fizikai habképzőszerek használata háttérbe szorult és igyekeznek környezetkímélőbb anyagokat, például nitrogént vagy szén-dioxidot alkalmazni helyettük. Ez jelentősen csökkenti a habképzés hatékonyságát, azonban ennek ellenére is találni ilyen jellegű kutatásokat a szakirodalomban. Zhang és társai [9] szuperkritikus CO_2-vel telített poliuretán filamenteket fejlesztettek, majd vizsgálták a nyomtatási hőmérséklet és sebesség hatását a habosodás mértékére. Mengya és társai [10] kutatásuk során CO_2-vel telített polietérimid és PLA filamenteket fejlesztettek. Megállapították, hogy a nyomtatást megelőző gázszaturáció eléggé időigényesnek bizonyul (24-48 óra) és a gáz ezt követően a szabad levegőn rövid időn belül távozik a mátrixanyagból, ezzel megnehezítve a stabil minőségű nyomtatást. Ebből kiindulva a CBA-k használata előnyösebb lehet [11].

Láthatóan sokakat foglalkoztat a 3D habnyomtatás fizikai, illetve TEM habképzőszerek alkalmazásával. Ezzel szemben kevésbé népszerű a kémiai habképzőszerek használata, aminek oka a képződő gáz eloszlatásának nehézsége és a gáz levegőbe való kidiffundálásának veszélye. E problémák kiküszöbölésével a CBA-k nagyobb népszerűségre tehetnének szert, ugyanis a fizikai habképzőszerekkel ellentétben használatukhoz nem szükséges plusz egység a habképzőszer bejuttatására a nyomtatószál előállításakor, hanem a hőre lágyuló berendezések garatján keresztül adagolhatók. A TEM-hez, habár nem szükséges plusz egység, a héj a legtöbb esetben biológiailag nem lebomló, illetve piaci ára más habképzőszerekhez képest magasabb. Éppen ezért célszerű a kémiai habképzőszerek alaposabb vizsgálata.

Kutatásunk célja különböző hatásmechanizmusú kémiai habképzőszerek alkalmazhatóságának vizsgálata biopolimer alapú, in-situ habosodó filamentek fejlesztésében. A kutatás első lépéseként kiválasztottunk egy habképzőszert, amely legjobban megfelelt a céljainknak, azaz a legkevésbé volt hajlamos az előhabosodásra. Így a habképződés nem megy végbe a kívánt feldolgozási lépés, jelen esetben a nyomtatás előtt, ezért az adagolt habképzőszer teljes mennyisége a nyomtatás során hasznosul.

Ezt követően a nyomtatási paraméterek sűrűségre/expanzióra gyakorolt hatását vizsgáltuk meg. Ezáltal lehetőségünk nyílt a nyomtatási paraméterek és a kialakult cellaszerkezet közötti összefüggések megértésére, ami lehetőséget nyújt olyan termékek egy gyártástechnológiai lépésben történő előállítására, amelyek a keresztmetszet mentén változó sűrűséggel és szabályozott porozitással rendelkeznek, így javítva a próbatest mechanikai tulajdonságait (pl. ütésállóság, hajlítómerevség) egy hagyományos, homogén sűrűségű habszerkezethez képest.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. FELHASZNÁLT ANYAGOK

Vizsgálataink során mátrixanyagként Natureworks Ingeo PLA 4043D-t alkalmaztunk [12], amelyhez négyféle habképzőszert adagoltunk, ezek fontosabb adatait az *1. táblázat* foglalja össze.

2.2. MÉRÉSI MÓDSZEREK

A nyomtatószálak előállításához kétlépcsős gyártástechnológiát alkalmaztunk.

Első lépésként Labtech LTE 26-44 típusú ikercsigás extruderrel kompaundokat készítettünk. A mátrixanyagot ezt megelőzően 4 órán át, 80 °C-on egy Faithful WGLL-125 BE típusú szárítószekrényben szárítottuk. A habképzőszereket minden esetben az ajánlott adagolási mennyiségnek megfelelően adagoltuk. Annak érdekében, hogy elkerüljük az előhabosodást, alacsony hőmérsékletprofilt alkalmaztunk, amelyet a *2. táblázat* mutat be.

2. táblázat: Kompaundálás hőmérsékletprofilja

	szerszám	165
Zónahőmérsékletek [°C]	10.	165
	9.	165
	8.	160
	7.	160
	6.	155
	5.	155
	4.	150
	3.	150
	2.	145
	1.	145

1. táblázat: Habképzőszerek adatai [13, 14, 15, 16]

	Habképzőszerek			
Gyártó	Tramaco	Tramaco	Tramaco	Tramaco
Típus	Tracel G 6903 MS	Tracel IM 4201	Tracel IM 4201 PBS	Tracel IM 4215 PBS
Habképzőszer típusa	fizikai (TEM)	kémiai (azodikarbonamid)	kémiai (azodikarbonamid)	kémiai (azodikarbonamid)
Formátum	granulátum	granulátum	granulátum	granulátum
Hordozóanyag	nem ismert	nem ismert	PBS (polibutén-szukcinát)	PBS (polibutén-szukcinát)
Expanzió kezdeti hőmérséklete [°C]	~170	~200	~200	~185-220
Ajánlott adagolási mennyiség [m%]	1,0-5,0	0,5-3,0	0,5-1,5	1,0-2,5

A berendezés és az alapanyag adottságai miatt alacsonyabb hőmérsékletprofilra nem volt lehetőségünk, mivel ebben az esetben a megnövekedett viszkozitás a motor túlterhelését okozta. Az alapanyagokat szárazkeverék formájában kevertük össze. Az adagolás gépi adagolással történt, amelynek értéke 8,0 rpm, míg a motor fordulatszáma 40 rpm volt. Az így legyártott szálakat Labtech LZ-120/V típusú granuláló berendezéssel aprítottuk össze.

Második lépésként a filamentgyártáshoz 3Devo Precision 450 típusú nyomtatószálgyártó berendezést alkalmaztunk. A kompaundáláshoz hasonlóan itt is minimális hőmérsékletprofilra törekedtünk, amelyet a *3. táblázatban* foglaltunk össze. A csiga fordulatszáma 4,0 rpm volt.

3. táblázat: Filamentgyártás hőmérsékletprofilja

Zónahőmérsékletek [°C]	**4.**	170
	3.	180
	2.	180
	1.	170

A gyártás során létrejövő előhabosodás mértékét sűrűségméréssel állapítottuk meg, amelyhez egy Sartorius Quintix 125D típusú analitikai mérleget alkalmaztunk. A vizsgálat hidrosztatikai elven történt az (1) képlet alapján.

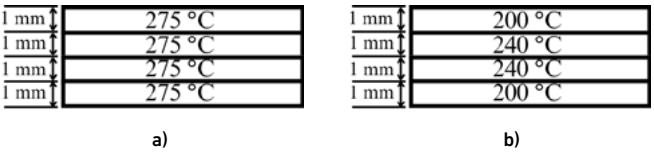
$$\rho = \frac{m_l \cdot \rho_v}{(m_t - m_v)} \left[\frac{g}{cm^3}\right] \quad (1)$$

ahol ρ a minta sűrűsége [g/cm^3], m_l a minta levegőben mért tömege [g], m_v a minta vízben mért tömege [g], ρ_v a mérőfolyadék (desztillált víz) sűrűsége a mérési hőmérsékleten [g/cm^3].

Az előhabosodás mértékét emellett pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálattal is értékeltük, amelyhez Jeol JSM 6380LA típusú berendezést alkalmaztunk 10 kV gyorsítófeszültséggel. A kriogénes töretfelület elérése céljából a mintákat törés előtt folyékony nitrogénnel lehűtöttük, majd ezt követően aranyozó berendezéssel vékony aranyréteget vittünk fel a felületre, ezzel vezetővé téve a mintákat. Emellett a nyomtatott próbatestek habosodásának minőségét szintén SEM felvételek alapján értékeltük.

A nyomtatásokhoz Original Prusa Mini+ típusú 3D nyomtatót alkalmaztunk, az ehhez szükséges modelleket PrusaSlicer programmal szeleteltük fel. A kutatás során két paraméternek, a nyomtatási hőmérsékletnek és a nyomtatási sebességnek a hatását vizsgáltuk meg, amelyekhez egy egységnyi réteg magasságú, 20x20 mm-es kockákat nyomtattunk ki. A hőmérsékletet 180-280 °C között 20 °C-os lépésközökkel, míg a sebességet 20-100 mm/s között 20 mm/s-os léptékkel vizsgáltuk meg. A nyomtató és a geometria adottságai miatt a maximális sebesség értéke 112,3 mm/s volt, amit szintén megvizsgáltunk. Emellett az 5, illetve a 10 mm/s-os nyomtatási sebességet is megvizsgáltuk, ezzel pontosabb képet kapva a nyomtatási sebesség expanzióra gyakorolt hatásáról. A rétegmagasság 0,4 mm, míg a tárgyasztal hőmérséklete 60 °C volt. A kitöltés egyenesvonalú volt.

Ezt követően a rétegrend változtatás hatását vizsgáltuk meg, amihez 80x10x4 mm-es hajlító próbatesteket gyártottunk, ahol a rétegeket eltérő fúvóka hőmérséklettel nyomtattuk ki. Ebben az esetben a rétegmagasság 0,2 mm volt, a kitöltés mintázata pedig 45°-os. A nyomtatási sebesség végig 20 mm/s volt, míg a fúvóka hőmérséklete 1 mm-ig 200 °C, 1-3 mm között 240 °C, míg 3-4 mm között szintén 200 °C volt. Összehasonlítási célból gyártottunk egy homogén habszerkezetet is, amelynek a tömege megegyezett az előállított szendvicsszerkezet tömegével. Ezt a próbatestet a fent említett paraméterek megtartásával, de állandó, 275 °C fúvókahőmérséklettel gyártottuk le *(1. ábra)*.



△ 1. ábra: Nyomtatott habszerkezet (a) és szendvicsszerkezet (b)

Ezzel párhuzamosan egy 80x10x2 mm-es hab próbatestet nyomtattunk ki, amelynek a habosodását SEM vizsgálattal minősítettünk. A nyomtatási hőmérséklet 240 °C, a nyomtatási sebesség pedig 20 mm/s volt.

A habosodás következményeként történő térfogatnövekedést az extrúziós szorzóval kompenzáltuk, ezáltal biztosítva a nyomtatott próbatestek méretpontosságát. Ennek meghatározásához a (2) képletet alkalmaztuk.

$$extrúziós\ szorzó = \frac{w_0}{w_i}\ [-] \quad (2)$$

ahol w_0 a nem habosodott próbatest falvastagsága [mm], w_i a habosodott próbatest falvastagsága [mm].

A nyomtatott próbatest falvastagságát jelen kutatásban a lapka próbatestek magasságával hoztuk összefüggésbe a (3) képlet szerint.

$$w = \frac{m}{A \cdot \rho} \quad (3)$$

ahol w az átlagos falvastagság [cm], m a próbatest levegő közegben mért tömege [g], A a lap területe [cm^2], ρ a sűrűség [g/cm^3].

A hajlítóvizsgálatot egy Zwick Z005 típusú univerzális szakítógépen végeztük hárompontos hajlító feltéttel. A mérési körülményeket mutatja be a *4. táblázat.*

4. táblázat: Hajlítóvizsgálat paraméterei

Paraméter	Érték
Próbatest mérete [mm]	80x10x4
Páratartalom [%]	43,7
Hőmérséklet [°C]	23,6
Alátámasztási távolság [mm]	64
Terhelés sebessége [mm/perc]	5
Előterhelés értéke [N]	1
Előterhelés sebessége [mm/perc]	20

A mérést az alátámasztási távolság 10%-áig, azaz 6,4 mm-es lehajlásig (határlehajlás) mértük. Amennyiben ezen érték előtt eltört az próbatest, a hajlítószilárdságot számoltuk ki a (4) képlet alapján

$$\sigma_{bh} = \frac{3 \cdot F_t \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}\ [MPa] \quad (4)$$

ahol σ_{bh} a hajlítószilárdság [MPa], F_t a töréshez tartozó erő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest vastagsága [mm].

Amennyiben a próbatest nem tört el a határlehajlás előtt, úgy a határhajlító feszültség került meghatározásra az (5) képlet szerint.

$$\sigma_h = \frac{3 \cdot F_h \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \; [MPa] \qquad (5)$$

ahol σ_h a határhajlító feszültség [MPa], F_h a határlehajláshoz tartozó erő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest vastagsága [mm].

A rugalmassági moduluszt a (6) képlet szerint határoztuk meg.

$$E_h = \frac{1}{4} \cdot \frac{L^3}{b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \; [MPa] \qquad (6)$$

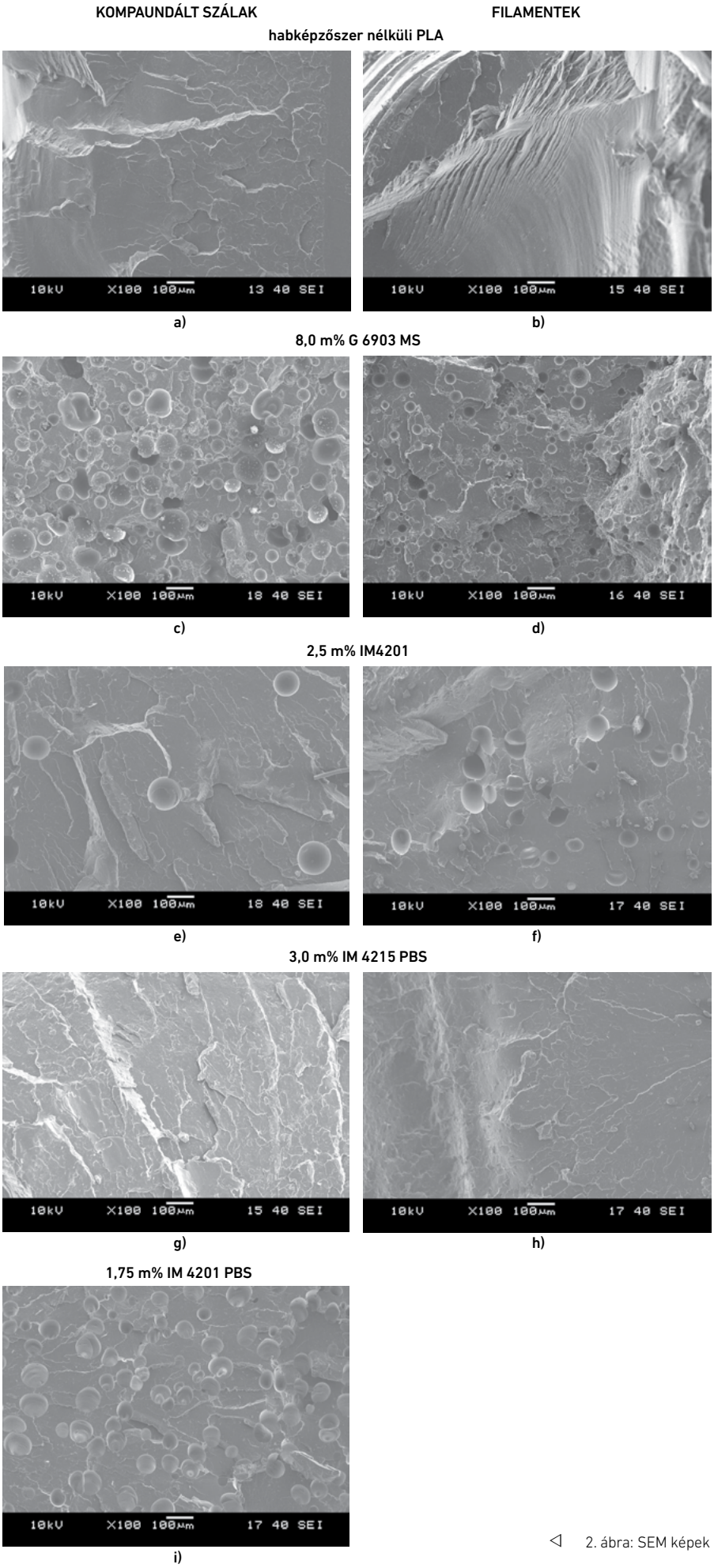
ahol E_h a hajlító rugalmassági modulusz [MPa], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest magassága [mm], $\frac{\Delta F}{\Delta f}$ az erő lehajlás görbe meredeksége 0,05 és 0,25% nyúlásokhoz tartozó lehajlásértékeknél $\left[\frac{N}{mm}\right]$.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. ELŐHABOSODÁS VIZSGÁLATA

A kompaundálás és a filamentgyártás az alacsony hőmérsékletprofil ellenére sikeres volt és stabil gyártást tett lehetővé. A legyártott filamentek minden esetben 1,75±0,1 mm átmérőjűek voltak, azáltal könnyen, elakadás nélkül felhasználhatóak 3D nyomtatóval.

Mivel a gyártás során a nyírásból származó hőt nem vizsgáltuk, így annak ellenére, hogy a gyártási hőmérséklet a habképzőszerek adatlapján szereplő habosodási hőmérséklet alatt volt, fontos volt az előhabosodás mértékét megvizsgálni, így a kompaundált szálról és a filamentekről is SEM képeket készítettünk, amelyet a *2. ábra* mutat be. A képeknél minden esetben az egyes habképzőszer típusokat legnagyobb arányban tartalmazó felvételeket mutatjuk be. Referenciaként habképzőszer nélküli PLA 4043D kompaundált szálat és filamentet is legyártottunk.



◁ 2. ábra: SEM képek

A képek alapján megállapítható, hogy a kompaundált szálak és a nyomtatószálak esetében is jelentős előhabosodást láthatunk annak ellenére, hogy a gyártási hőmérséklet a legtöbb esetben a habképzőszer bomlási hőmérséklete alatt volt. Ennek oka, hogy a nyírásból fejlődő hő mennyisége jelentős, így az extruderben uralkodó hőmérséklet a bomlási hőmérséklet felé emelkedett. Mivel az IM 4201 PBS típusú habképzőszer esetében már gyártás során is látható volt, hogy gyors reakcióképessége miatt jelentős előhabosodás megy végbe, így ebben az esetben a filamentet nem gyártottuk le. Érdekes tapasztalat, hogy habár három habképzőszer is (IM 4201, IM 4201 PBS, IM 4215 PBS) közel azonos hőmérsékleten indul bomlásnak, az előhabosodás mértéke szignifikánsan eltér. Ennek oka egyrészt, hogy az anyagok más hordozóanyaggal rendelkeznek, másrészt, hogy eltérő az ajánlott adagolási mennyiség, tehát nem azonos mennyiségű habképzőszert tartalmaznak a mesterkeverékek. Tapasztalatunk szerint a kisebb mennyiségben adagolandó habképzőszerek gyorsabban és intenzívebben reagálnak a környezeti hőmérsékletre, így hajlamosabbak az előhabosodásra. A SEM képek alapján megállapítható, hogy az IM 4215 PBS típusú habképzőszer alkalmazásával értük el a legkisebb előhabosodást.

Mivel a kutatásunk szempontjából az ideális habképzőszer kiválasztása meghatározó szerepet játszik, így fontosnak tartottuk egy másik mérési módszerrel, jelen esetben sűrűségméréssel leellenőrizni a kapott eredményeket. Ennek eredményét foglalja össze a *3. ábra.*

A sűrűségmérés eredménye szinkronban van a SEM képek eredményével, a legtöbb esetben itt is jelentős előhabosodást figyelhetünk meg. Mivel az IM 4215 PBS típusú habképzőszer esetében sem a kompaundált szál, sem a filament sűrűsége nem változott jelentősen a habképzőszer tartalom növelésével, így az előhabosodás mértéke csekély ebben az esetben. Ennek megfelelően a kutatás további szakaszaiban kizárólag ezt az egy habképzőszert vizsgáltuk.

3.2. NYOMTATÁSI PARAMÉTEREK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

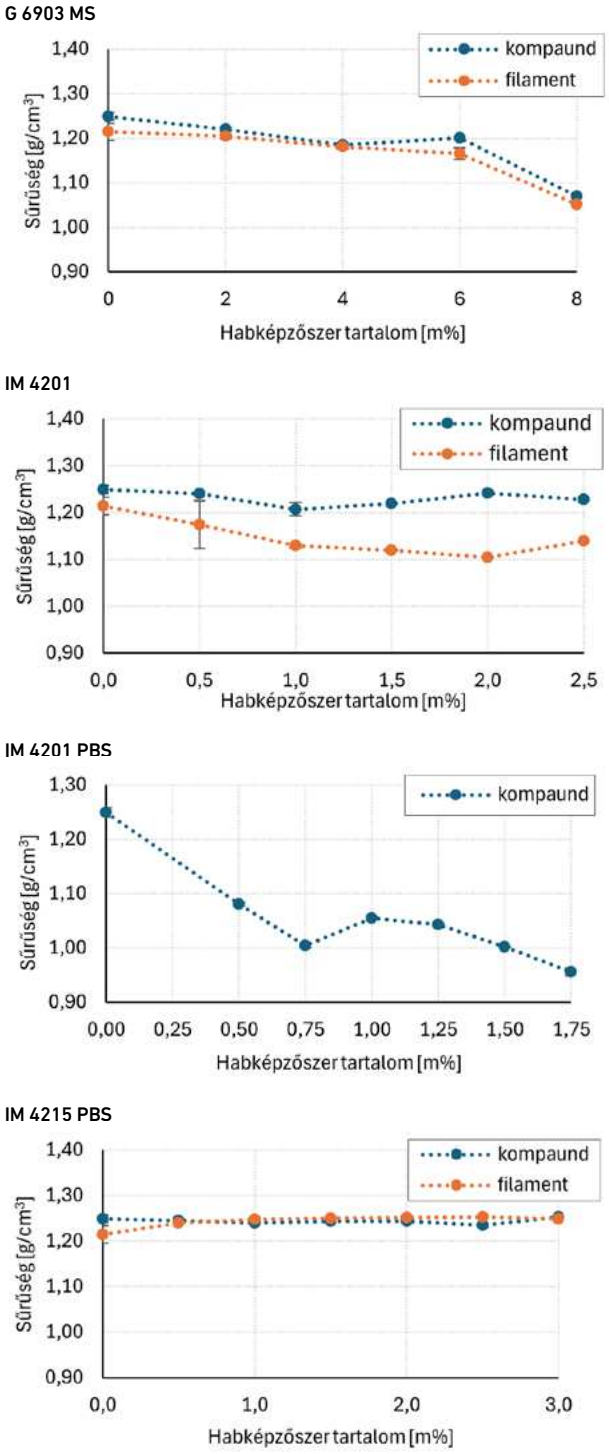
Korábbi kutatások [5, 6] szerint a habosodás mértékét jelentősen befolyásolják a nyomtatási paraméterek, ezért elsőként a nyomtatási hőmérséklet hatását vizsgáltuk különböző habképzőszer tartalmú szálaknál *(4.ábra).*

Látható, hogy a legkisebb sűrűséget, tehát a legnagyobb mértékű expanziót a 2,0 m% habképzőszer tartalmú filamenttel értük el 240 °C-os fúvóka hőmérsékletnél, ami igazolja, hogy a nyomtatási hőmérséklethez tartozik egy optimum érték.

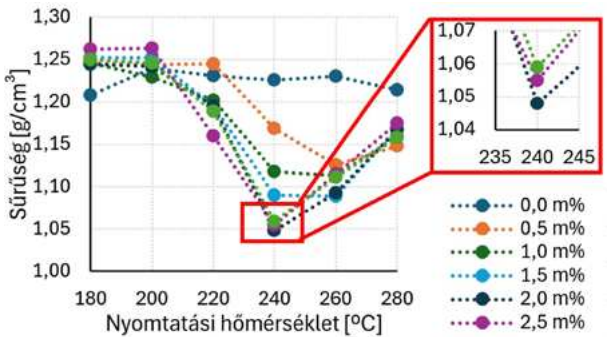
A kapott trend oka, hogy alacsony hőmérsékletnél a hőmennyiség nem elég ahhoz, hogy a habképzőszer bomlása teljes mértékben végbemenjen, így kevesebb a fejlődő gáz mennyisége, emellett a nagyobb ömledékszilárdság szintén akadályozza az expanziót. Magas hőmérséklet során a cellák összeomlanak, ugyanis ekkor a cella fala nem elég merev. Továbbá a gáz diffúziós képessége a hőmérséklet növelésével nő, így nagyobb eséllyel távozik a gáz a mátrixanyagból *(5. ábra).*

Korábbi kutatás [5] igazolta a nyomtatási sebesség ideális értékét, ezért 240 °C-os fúvókahőmérséklet és változó sebesség mellett ezt is megvizsgáltuk. Az eredményeket a *6. ábra* szemlélteti.

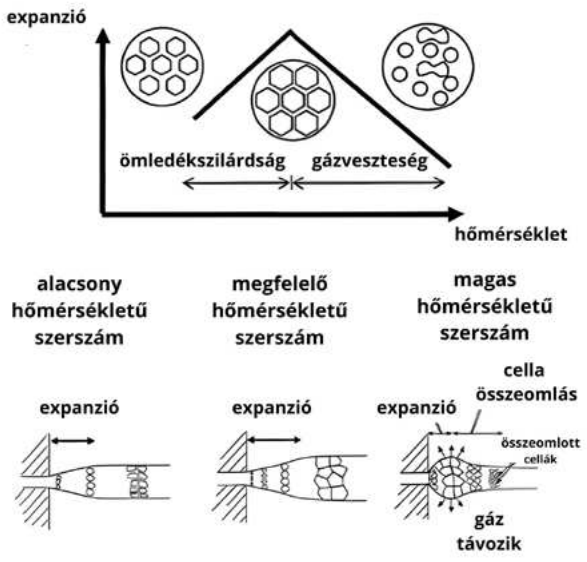
Megállapítható, hogy a nyomtatási sebességnek is van egy optimuma, ami jelen kutatás során 20 mm/s-os sebességnél volt. Kisebb sebesség esetében a nyomtatószál több időt tölt a fúvókában,



△ 3. ábra: Sűrűségmérés eredménye a kompaundált szálakról (kék vonal) és a filamentekről (sárga vonal)



△ 4. ábra: Nyomtatási hőmérséklet hatásának vizsgálata



△ 5. ábra: Nyomtatási hőmérséklet hatása [17]

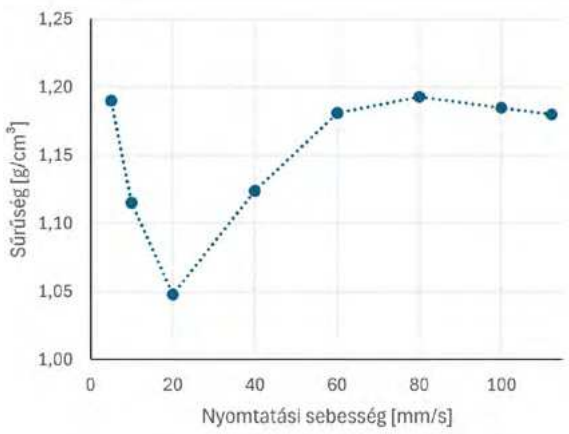
így az ezzel járó túlzott hőfelvétel a gáz kidiffundálását eredményezi. Látható, hogy 5 mm/s-os nyomtatási sebesség esetében e jelenség olyannyira jelentős, hogy a nyomtatott próbatest sűrűsége megegyezik a töltetlen mátrixanyagéval. Abban az esetben, ha a sebességet túl nagyra választottuk meg, a tartózkodási idő csökkenése miatt a filament nem tud elegendő mennyiségű hőt felvenni, így a habképzőszer nem tudja kifejteni teljes hatását, ugyanis nem bomlik el teljes mértékben. Az eredmények alapján a legnagyobb sűrűségcsökkenést 240 °C-os nyomtatási hőmérséklet és 20 mm/s-os nyomtatási sebesség mellett értük el.

A habosodás minősítésének a céljából a korábban említett paraméterekkel habszerkezetet nyomtattunk ki, amit a *7. ábra* mutat be.

Látható, hogy a próbatestre gyenge cellagócképződés, alacsony cellasűrűség és szabálytalan morfológia jellemző. Ez a további kutatások során cellagócképző alkalmazásával javítható.

3.3. RÉTEGRENDMÓDOSÍTÁS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Ezt követően kétféle hajlító próbatestet gyártottunk le, egy keresztmetszet mentén állandó sűrűséggel rendelkező habszerkezetet, illetve egy keresztmetszet mentén változó sűrűséggel rendelkező szendvicsszerkezetet, amelyeket hajlítóvizsgálattal elemeztünk. A kísérlet célja az volt, hogy megállapítsuk, a habszerkezethez képest a szendvicsszerkezet mennyivel ellenállóbb a hajlító igénybevétellel szemben. A vizsgálati eredményeket a *8. ábra* mutatja be.

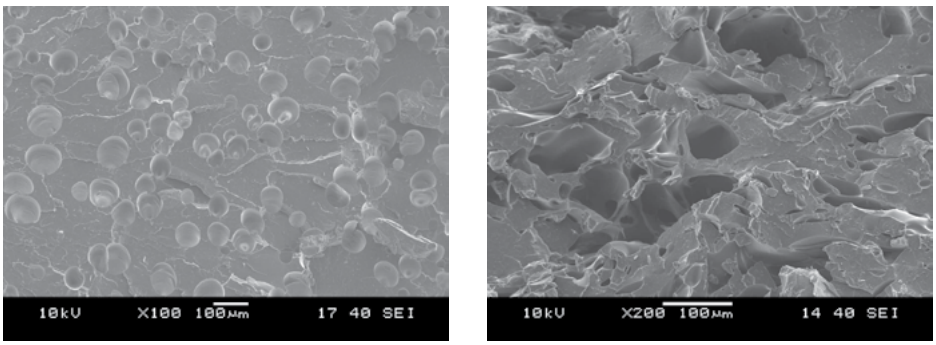


△ 6. ábra: Nyomtatási sebesség hatása a sűrűségre

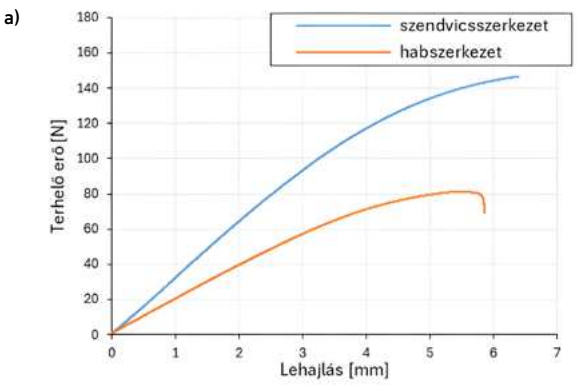
A lehajlás-terhelő erő diagram esetében a három mérési eredmény átlagát ábrázoltuk. Látható, hogy nagyobb terhelő erőt és lehajlást képes a szendvicsszerkezet elviselni. A habszerkezet még a határlehajlás (6,4 mm) előtt, 5,47 mm-es lehajlásnál eltört. Ebben a pontban a szendvicsszerkezet közel másfélszer akkora hajlítószilárdsággal rendelkezett. A kezdeti hajlító rugalmassági modulusz értéke is több mint 10%-kal nagyobb a szendvicsszerkezet esetében. Tehát a szendvicsszerkezetnél nagyobb erő szükséges ugyanakkora mértékű lehajlás eléréséhez, mint az egyszerű habszerkezetnél. Emellett a szendvicsszerkezet nagyobb mértékű lehajlást képes elviselni törés nélkül.

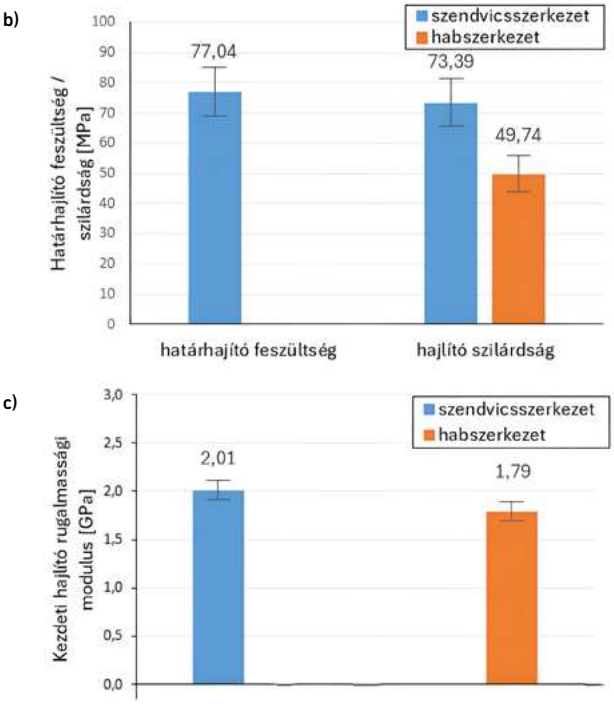
4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatásunk során különböző hatásmechanizmusú habképzőszerek alkalmazhatóságát vizsgáltuk biopolimer (politejsav) alapú, in-situ habosodó filamentek fejlesztéséhez. Ikercsigás extruderrel, alacsony hőmérsékletprofil alkalmazásával elkészítettük a különböző kompaundokat, amelyekből ezt követően szintén alacsony hőmérsékletprofilon filamentgyártó berendezéssel nyomtatószálakat készítettünk. SEM vizsgálattal és sűrűségméréssel értékeltük az előhabosodást, majd a legkevésbé előhabosodásra hajlamos habképzőszerrel társított PLA nyomatószál esetében megvizsgáltuk a nyomtatási hőmérséklet és sebesség hatását a sűrűségre. Ezt követően egy gyártástechnológiai lépésben, a fúvóka gyártás közbeni hőmérsékletének a változtatásával szendvicsszerkezetet, majd egy azonos sűrűségű homogén habszerkezetet gyártottunk, amiket ezt követően hajlítóvizsgálattal elemeztünk. A rétegelt szerkezet közel másfélszer nagyobb hajlítómerevséggel rendelkezett, ami előnyt jelenthet például sport- vagy csomagolóeszközök



◁ 7. ábra: In-situ habosodott próbatest SEM képei





△ 8. ábra: Lehajlás mértéke a terhelő erő függvényében (a), hajlító szilárdság és a határhajlító feszültség értéke (b), illetve a kezdeti hajlító rugalmassági modulus értéke (c)

esetében. Kutatási eredményeink jól mutatják az in-situ habosodó nyomtatószálak fejlesztésében rejlő lehetőségeket, amely segíthet a szálolvasztásos elven működő 3D nyomtatás műszaki célú felhasználási területeken való gyakoribb alkalmazásában.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-146236 számú pályázatának szakmai támogatásával, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült. A habképzőszereket az Interdist Kft. biztosította számunkra.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Shantar R., Chen K., Abeykoon C.: Powder-Based Additive Manufacturing: A Critical Review of Materials, Methods, Opportunities, and Challenges. Advanced Engineering Materials. Wiley, 2023, 25(1), 2200758.
[2] Shahrubudin N., Lee T. C., Ramlan R.: An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Procedia Manufacturing. Elsevier, 2019, 35, 1-10.
[3] Tomin M., Török D., Pászthy T., Kmetty Á.: Deformation analysis in impact testing of functionally graded foams by the image processing of high-speed camera recordings. International Journal of Impact Engineering. Elsevier, 2023, 173, 104526.
[4] Tomin M., Kmetty Á.: Polymer foams as advanced energy absorbing materials for sports applications – A review. Journal of Applied Polymer Science. Wiley, 2022, 139(9), 51714.
[5] Nieduzak Z., Hart S., Joseph Y., Kalia K., Ameli A.: In-situ foam 3D-printing of recycled HDPE/PP blend. SPE FOAMS 2022. Indianapolis, USA, Vol. 5, 2022.
[6] Kalia K., Ameli A.: Understanding the process-microstructure-property relationships in material extrusion additive manufacturing of polylactic acid microcellular foams. Additive Manufacturing. Elsevier, 2023, 72, 103636.
[7] Kalia K., Francoeur B., Amirkhizi A., Ameli A.: In situ foam 3D printing of microcellular structures using material extrusion additive manufacturing. ACS Applied Materials & Interfaces. ACS Publications, 2022, 14, 22454-22465.
[8] Kalia K., Amirkhizi A., Ameli A.: The effect of melt flow rate and print speed on the density and microcellular structure of 3D printed polylactic acid foams. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2023, 2884(1), 140003.
[9] Zhang S., Gao Q., Zhang Y., Sheng X., Miao Z., Qin J., Zhang G., Shi X.: 3D printing thermoplastic polyurethane hierarchical cellular foam with outstanding energy absorption capability. Additive Manufacturing. Elsevier, 2023, 76, 103770.
[10] Li M., Jiang J., Hu B., Zhai W.: Fused deposition modeling of hierarchical porous polyetherimide assisted by an in-situ CO_2 foaming technology. Composites Science and Technology. Elsevier, 2020, 200, 108454.
[11] Tomin M.: Development and investigation of enhanced shock-absorbing polymer foam structures. PhD disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2023).
[12] https://www.natureworksllc.com/~/media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf (2024.11.05)
[13] Tramaco GmbH: Tracel G6903 MS Technikai adatlap (2024.11.05)
[14] Tramaco GmbH: Tracel IM 4201 Technikai adatlap (2024.11.05)
[15] Tramaco GmbH: Tracel IM 4201 PBS Technikai adatlap (2024.11.05)
[16] Tramaco GmbH: Tracel IM 4215 PBS Technikai adatlap (2024.11.05)
[17] Nofar M., Utz J., Geis N., Altstädt V., Ruckdäschel H.: Foam 3D Printing of Thermoplastics: A Symbiosis of Additive Manufacturing and Foaming Technology. Advanced Science. Wiley, 2022, 9, 2105701.

A POLIMEREK szakmai folyóiratot a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya hazai, lektorált tudományos folyóiratnak fogadja el, a Magyar Tudományos Művek Tárában (MTMT) is magyar nyelvű, lektorált folyóiratként van nyilvántartva.

Ezt jelzi *Lektorált tudományos közlemények* rovatunk, amelyben az egyetemektől és tudományos kutatóintézetektől kapott tudományos cikkeket a nemzetközi elvárásoknak megfelelően, a Tudományos Szerkesztőbizottságunk (egyetemi tanárok, MTA doktorok) lektorálása után közöljük.

A tudományos cikkeknél külön jelölve van a rovatcímben, hogy *Lekorált tudományos közlemény*, ezek felépítése megfelel a szigorú nemzetközi normáknak, a magyar mellett angol nyelvű absztrakt foglalja össze az eredményeket, a cikk bevezetése tartalmazza a tudomány jelenlegi állását megfelelően alátámasztva hivatkozásokkal. A következő részben modern eszközökkel és módszerekkel elért eredményeket mutatják be a szerzők, az összefoglalás pedig rendszerezi a cikk eredményeit. A cikkek végén a köszönetnyilvánítás és az egységes irodalmi hivatkozás szerepel. Mindezek alapján valósulhatott meg, hogy a POLIMEREK az MTMT-ben lektoráltként szerepel mind a PhD, mind az MTA doktori eljárásokban – elismert és elfogadott folyóiratként.