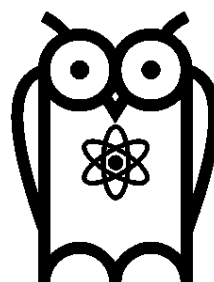




MISKOLCI EGYETEM
ANYAG – ÉS VEGYÉSZMÉRNÖKI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 Miskolc Egyetemváros



HOLDPOR-SZIMULÁNS TÖLTŐANYAGOT TARTALMAZÓ MEREV PUR-HABOK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS VIZSGÁLATA

**Production and characterization of lunar regolith simulant filled rigid
PUR-foams**

Készítette:

Répási Tamás

BSc anyagmérnök hallgató

Konzulensek:

Polyákné Kovács Annamária

tanszéki mérnök

Dr. Tamási Kinga

ipari konzulens (Admatis Kft.)

Energia-, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet

2023.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS.....	1
1. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ.....	2
1.1 Poliuretánok áttekintése.....	2
1.2 Holdi regolit, holdpor-szimulánsok bemutatása	9
1.3 PUR-hab / szemcsés töltőanyag kompozitok ismertetése.....	12
1.3.1 Habosodási jellemzők (viszkozitás, habosodási idő, reakcióhőmérséklet)	12
1.3.2 Fizikai jellemzők (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás).....	13
1.3.3 Cellaszerkezet	15
1.3.4 Nyomószilárdság	15
1.4 Szakirodalom kritikai áttekintése	17
2. KÍSÉRLETI RÉSZ.....	18
2.1 Minták elkészítése.....	18
2.2 Holdpor-szimulánsok szemcseméret-eloszlása	19
2.3 Habosodási jellemzők (habosodási idő, reakcióhőmérséklet)	20
2.4 Fizikai jellemzők (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás)	21
2.5 Nyomószilárdság.....	22
3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA.....	24
3.1 Holdpor-szimulánsok szemcseméret-eloszlása	24
3.2 Habosodási jellemzők (habosodási idő, reakcióhőmérséklet)	28
3.3 Fizikai jellemzők (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás)	33
3.4 Nyomószilárdság.....	38
ÖSSZEFOGLALÁS	43
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	46
MELLÉKLETEK	47
IRODALOMJEGYZÉK.....	49

ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. **ábra:** Az uretánkötés szerkezete [16]
2. **ábra:** Izocianát + poliól alapú poliuretán szintézis során megjelenő reakciók (víz nélkül) [4]
3. **ábra:** Víz jelenlétében megjelenő további reakciók poliól + izocianát alapú poliuretán szintézis esetén [4]
4. **ábra:** Földi talaj és holdi regolit (mare + felföld) tipikus elemi összetételének összehasonlítása [31–33]
5. **ábra:** PUR-habok elkészítésének menete
6. **ábra:** A dolgozat keretében készített és vizsgált PUR-hab minták keresztmetszetei
7. **ábra:** A szitáláshoz és szemcseméret-eloszlás meghatározásához felhasznált szitasor és táramérleg
8. **ábra:** A látszólagos sűrűség és fizikai paraméterek meghatározásához használt Kern PNJ mérleg és Kreator digitális tolmérő
9. **ábra:** Felvételek a PUR-hab minták nyomóvizsgálatának elvégzéséről Instron 5566 univerzális vizsgálóberendezésen
10. **ábra:** A holdpor-szimulánsok szitálással szétválasztott frakciói
11. **ábra:** Holdpor-szimulánsok szitálással meghatározott szemcseméret-eloszlása
12. **ábra:** Holdpor-szimulánsok szitálással meghatározott kumulatív görbéje
13. **ábra:** PUR-hab minták maximális reakcióhőmérsékletének változása a vizsgált faktorok függvényében
14. **ábra:** PUR-hab minták habosodási idejének változása a vizsgált faktorok függvényében
15. **ábra:** PUR-hab minták habosodási idő – maximális reakcióhőmérséklet adatpontjai
16. **ábra:** PUR-hab minták alaplátrixhoz viszonyított habterfogat-változása a vizsgált faktorok függvényében
17. **ábra:** PUR-hab minták látszólagos sűrűségének változása a vizsgált faktorok függvényében
18. **ábra:** PUR-hab minták számított porozitásának változása a vizsgált faktorok függvényében
19. **ábra:** Saját felvett tipikus erő – elmozdulás nyomódiagram (fent) és PUR-habok szakirodalmi nyomódiagramjának (lent [62]) összehasonlítása
20. **ábra:** PUR-hab minták egyezményes nyomószilárdságának változása a vizsgált faktorok függvényében
21. **ábra:** PUR-hab minták összetartozó nyomószilárdság – porozitás értékei

1. **táblázat:** PUR-habok szintézisének kötelező és lehetséges komponensei
2. **táblázat:** Tipikus felföldi és mare holdpor molekuláris összetétele [31–33]

1. **melléklet:** Nyomóvizsgálatok erő – összenyomódás diagramjai

BEVEZETÉS

Az utóbbi években világszerte egyre nagyobb az érdeklődés hosszútávú holdi struktúrák (ún. „holdbázisok”) létesítésére [1]. Az egyik legnagyobb kihívást azonban továbbra is az jelenti, hogy milyen anyagokból állíthatóak elő a tervezett holdi épületek szerkezeti elemei. Ehhez nem csak az adott építőanyag által nyújtott tulajdonságokat kell figyelembe venni, hanem hogy bármely tömegmennyiség Földről Holdra való átszállítása jelentős energia-, erőforrás- és pénzbeli költséget jelent. Korábban tudományos publikációk már felvetették annak ötletét, hogy a merev habszerkezetű poliuretán (PUR-hab) több szempontból előnyös hőszigetelő-szerkezeti építőanyag lehetne holdi épületek számára [1–3]. Ennek oka egyrészt a rendkívül alacsony sűrűsége (akár 30 kg/m^3 [4]), amely következtében igen hatékonyan szállítható, kis tömegmennyiségű alapanyagból is hatalmas habtérfogat készíthető el. Fontos továbbá, hogy viszonylag alacsony hővezetési tényezője miatt ($\sim 0,02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [4]) nagyban hozzájárulhat a holdi struktúrák hőszigeteléséhez, amely a holdfelszínen uralkodó extrém hőmérsékleteket ($-170 \text{ }^\circ\text{C}$ és $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ között [5]) figyelembe véve létfontosságú tényező. Ezen kívül mechanikai jellemzői által bizonyítottan alkalmas lehet teherbíró szerkezeti funkció ellátására is [4,6].

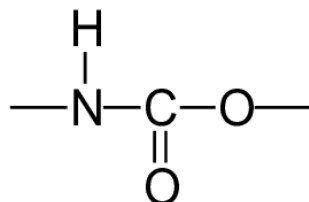
A dolgozatom alapvető feltevése, hogy a holdfelszínt beborító regolitot (holdpor) töltőanyagként felhasználva merev PUR-habokban még inkább előnyösebb kompozit építőanyag hozható létre holdbázisok hőszigetelő-szerkezeti elemeiben való felhasználásra. A holdi regolit töltőanyag ideális esetben kettős funkciót látna el: egyrészt a habtérfogat minél nagyobb mértékű növekedését okozná, ezáltal csökkentve az építkezéshez Földről átszállítandó anyagmennyiséget. Másrészt azonban fontos, hogy a felhasználás szempontjából releváns számos anyagjellemző (szilárdság, merevség, hőszigetelő-képesség, stb...) is lehetőleg javuljon az alaplátrixhoz viszonyítva.

Munkám során holdpor-szimuláns (a tényleges holdi regolit tulajdonságait reprodukáló földi anyag) töltőanyagot tartalmazó merev PUR-habokat készítettem és vizsgáltam. A különböző minták azonos mennyiségű töltőanyagot tartalmaztak, de eltérő volt a habmátrix típusa, a holdpor-szimuláns minősége, illetve a holdpor-szimuláns szemcsemérete. Emellett az összehasonlítás céljából töltetlen habokat is felhasználtam. Célkitűzésem annak vizsgálata volt, miképpen változnak a habminták tulajdonságai az alaplátrixhoz képest a töltőanyag beépítésével, illetve erre milyen hatása van az előbb ismertetett tényezőknek.

1. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

1.1 Poliuretánok áttekintése

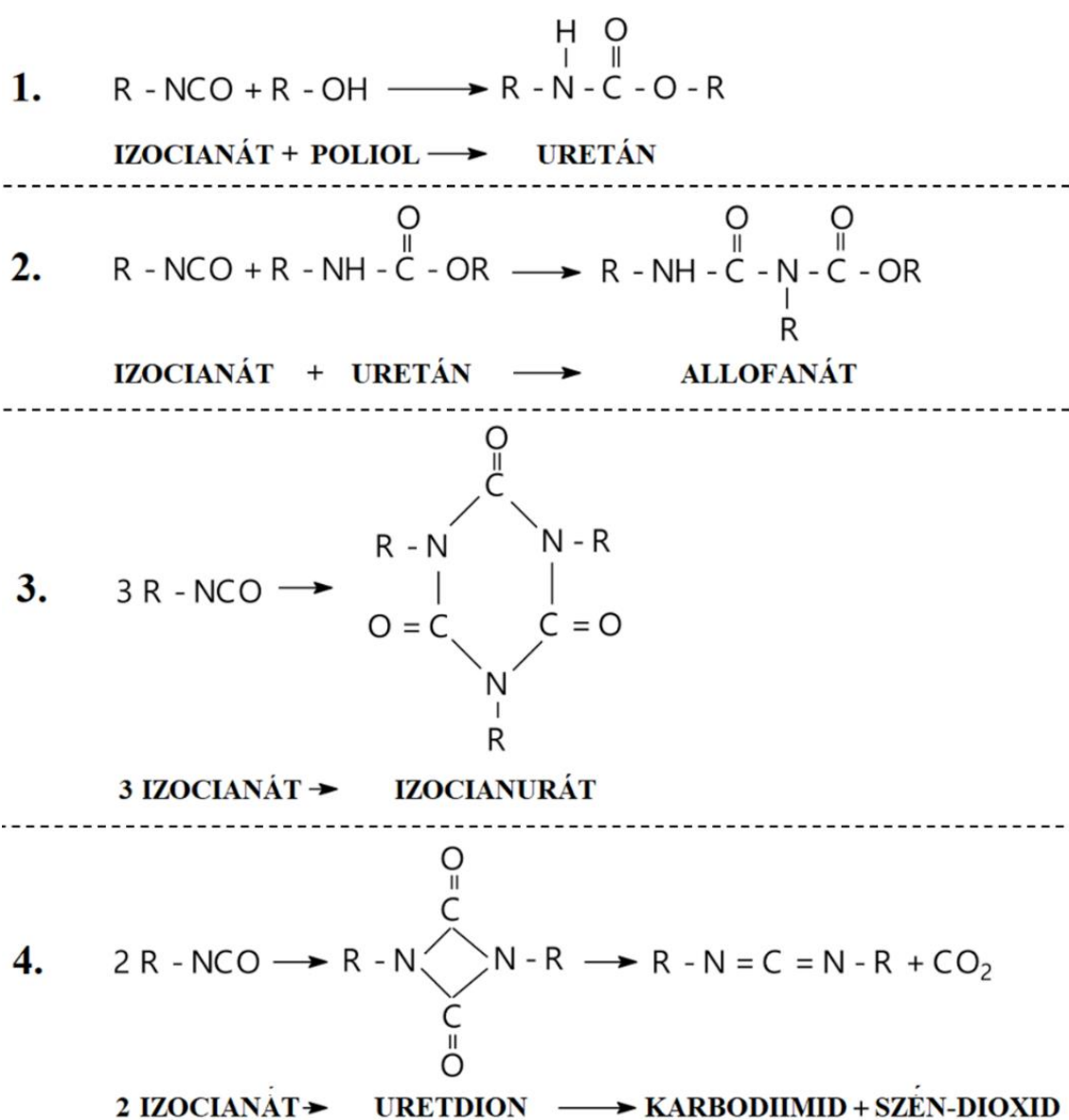
Poliuretánnak nevezünk minden olyan polimert, amelynek monomer-egységében ismétlődő uretánkötés (**1. ábra**) található [7]. A poliuretán (PUR) napjaink egyik legnépszerűbb tömegműanyaga: közel 20 millió tonna az éves termelése, ezzel a világ 6. legnagyobb mennyiségben gyártott polimere [8,9]. Általánosságban elmondható róla, hogy az elkészítéséhez felhasznált alap- és adalékanyagok minőségének és mennyiségének befolyásolásával rendkívül változatos tulajdonságú PUR anyagok állíthatóak elő. Egyaránt készíthetők termoplasztikus, duroplasztikus, elasztomer, valamint rugalmas- és merev hab szerkezetű poliuretánok [6,10–12]. Az anyagjellemzői sokszínűségének köszönhetően számos felhasználási területen (csomagolások, bútorok, gépjárművek, lábbelik, elektronika, hadipar, űripár...) megtalálhatóak poliuretán termékek [13–15]. A dolgozat szempontjából azonban kiemelkedő jelentőséggel bír, hogy a merev poliuretán habok (a továbbiakban rövidítve: PUR-habok) napjaink egyik legfontosabb hőszigetelő-szerkezeti anyagai. Erre a feladatra más anyagokhoz viszonyított rendkívül alacsony hővezetési tényezője és sűrűsége, valamint jó szilárdsága, szívóssága és időállósága következtében kifejezetten alkalmas [4].



1. ábra: Az uretánkötés szerkezete [16]

Bár elméletileg több különböző kémiai reakció útján is előállítható poliuretán, gyakorlati szempontból szinte kizárólag a poliolkok (legalább két hidroxil-csoportot tartalmazó molekulák) és poliizocianátok (legalább két izocianát-csoportot tartalmazó molekulák) reakcióján alapuló szintézis használt [15]. Ez a lépcsős polimerizáció, azon belül is a poliaddíciós reakciók csoportjába sorolható. Ahogy arra a neve is utal, ezen esetben a polimerizáció lényege a hidroxil- és izocianát funkciós csoportok ismételt, melléktermék képződése nélkül végbemenő addícióján alapul. Az izocianát szén-nitrogén kettős kötése felbomlik, a hidroxil-csoport hidrogénje és oxigénje pedig rendre kötések alakít ki az előbb említett nitrogénnel, illetve szénnel. Gyakorlatilag ekkor alakul ki az uretánkötés, a reakció ismételt végbemenetelével jönnek létre a hosszú poliuretán láncok. A PUR komplexitását és

lehetséges tulajdonságainak széleskörűségét jelzi, hogy emellett egyéb mellékreakciók is lejátszódnak a szintézis során. Egyrészt az izocianát képes reagálni a már kialakult uretánkötésekkel, ekkor ún. allofanátkötések jönnek létre. Emellett az izocianátok önmagukkal is képesek reagálni, ekkor szintén különböző funkciós csoportok (izocianurát, uretdion, karbodiimid) jöhetnek létre. Figyelemre méltó, hogy ezen mellékreakciók következtében keresztkötések, térhálós szerkezetek és elágazások is létrejöhetnek. A poliuretán polimerizációjakor lejátszódó reakciókat szemlélteti a **2. ábra**. Megjegyzendő, hogy PUR-habok készítésekor kémiai habosítószer (pl. víz) használatával még több egyéb reakció jelenik meg, ezek bemutatása később fog megtörténni [4,9,15].



2. ábra: Izocianát + poliál alapú poliuretán szintézis során megjelenő reakciók (víz nélkül)
[4]

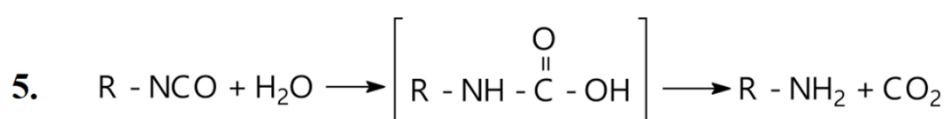
Fontos megismernünk azokat a tényezőket, amelyek befolyásolják a létrejött poliuretán tulajdonságait. Egyrészt fontos szerepe lehet, hogy az alapvető poliól + izocianát láncnövekedési reakció mellett milyen gyakorisággal fordulnak elő az egyéb említett mellékreakciók. Maguk a létrejött funkciós csoportok is beépülnek a poliuretán láncba, illetve a térhálóság és elágazottság mértékét is befolyásolják. Nyilván mindkét tényező képes befolyásolni az elkészített PUR anyagjellemzőit. A mellékreakciók sebességét sok tényező befolyásolhatja, a legfontosabbak ezek közül a konkrét reagánsok kémiai szerkezete, a reakciókörülmények (kiváltképp a hőmérséklet) és a katalizátorok jelenléte. Látható, hogy ezen faktorok figyelembe vételével, a mellékreakciók befolyásolásával is változtatható a keletkező PUR termék tulajdonsága [4,7,9,15].

Emellett meghatározó szerepe van a szintézishez felhasznált konkrét poliolk és poliizocianátok kémiai szerkezetének is. A poliolk szempontjából a két legfontosabb faktor a felhasznált vegyületek funkcionalitása (OH-csoportok száma), illetve molekulatömege. Más lépcsős polimerizációs reakciókhoz hasonlóan a poliól funkcionalitása befolyásolja a létrejövő keresztkötés-sűrűség, térhálóság mértékét. A kis funkcionalitású poliolk (~2-3) többnyire lineáris polimerláncokat eredményeznek. Ennek megfelelően lágy, rugalmas, elasztikus PUR anyagok előállításához használtak. Ezzel szemben a nagyobb funkcionalitású poliolk (~3-8) több elágazást és keresztkötést eredményeznek a poliuretán láncokban, ezért általában keményebb, merevebb, jobb hőállóságú termékekhez ideálisak [4,6,9–11,14]. Hasonlóképpen a nagy molekulatömegű poliolk (~3000-6000 g/mol) rugalmas elasztomerek, míg a kis molekulatömegű poliolk (~300-1000 g/mol) kemény és merev PUR anyagok létrehozására alkalmasak. Ennek oka, hogy a poliuretán láncokban a viszonylagos nagy molekula-hajlékonyságuk miatt mindig a poliolk adják a polimer ún. lágy szegmenseit, szemben az izocianát és egyéb csoportok (uretán, izocianurát, stb...) alkotta kemény szegmensekkel. Ha nagy a szintézishez használt poliól molekulatömege, akkor nagyobb lesz a polimerláncokban ezeknek a lágy szegmenseknek a részaránya. Ez összességében hajlékonyabb, könnyebben deformálható PUR polimerláncokat, ezáltal lágyabb és elasztikusabb anyagot eredményez. A poliól molekulatömegének csökkentésével ezzel ellentétes hatást érünk el: kisebb lesz a poliuretánban a lágy szegmensek részaránya, így merevebb, kevésbé deformálható polimert kapunk [9,11,13–15]. A leírtak alapján látható, hogy a dolgozat keretében előállítandó merev szerkezeti-hőszigetelő PUR-habokhoz például nagy funkcionalitású és kis molekulatömegű poliolt szükséges felhasználnom ezen tulajdonságok eléréséhez.

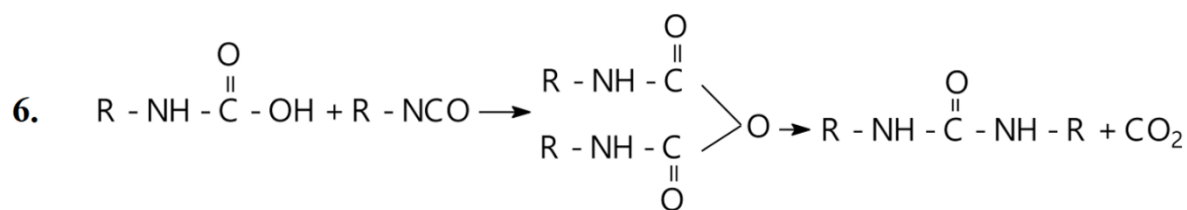
A polioli mellett a felhasznált poliizocianát kémiai szerkezete is nagymértékben befolyásolja a keletkező poliuretán tulajdonságait. Nagyobb funkcionalitású vegyületek ebben az esetben is térhálósabb, több elágazással rendelkező polimerláncokat, ennek megfelelően pedig merevebb és hőállóbb anyagokat hoznak létre. Lágy és rugalmas PUR létrehozásához ezzel szemben lineáris polimerláncok a megfelelők, ehhez pedig kis funkcionalitású izocianátok használata szükséges. Emellett az aromás-csoportok jelenléte az izocianátok esetében is keményebb, szilárdabb és hőállóbb poliuretán-terméket eredményez. Ezen esetben azonban az is fontos tényező, hogy az aromás poliizocianátoknak a reaktivitása is sokkal nagyobb az alifás vegyületekhez képest. A PUR-szintézishez felhasznált izocianátok közel 90 %-át a metilén-difenil-diizocianát (MDI) és toluilén-diizocianát (TDI) vegyületek teszik ki. Figyelemre méltó, hogy mindkettő aromás-csoportot tartalmaz. Az alifás izocianátok általánosságban kevésbé elterjedtek mint poliuretán alapanyagok, leginkább PUR-alapú bevonatok vagy nagy mértékben elasztikus termékek létrehozásához használtak. Erre példák az izoforon-diizocianát (IDPI) vagy hexametilén-diizocianát (HDI) [9–11,13,14]. Ezek alapján merev szerkezeti-hőszigetelő PUR-hab készítéséhez a nagyobb funkcionalitású, aromás poliizocianátok tűnnek megfelelőnek.

Bár a poliolo és poliizocianátok a két elengedhetetlen alapanyag, amelyek poliaddíciója által a poliuretán láncok létrehozhatóak, emellett eltérő célokkal számos egyéb adalékanyag is használt PUR anyagok készítésekor. PUR-habok létrehozásához (ami a jelen dolgozat célja is) feltétlenül szükséges adalékanyagok a habosítószer és a felületaktív anyag. Az előbbi a habszerkezet létrehozásáért, míg az utóbbi ennek stabilizálásáért, a cellaszerkezet kontrollálásáért felelős. A habosítószer terén alapvetően megkülönböztethetünk fizikai- és kémiai habosítószereket. Az előbbieket csoportjába alacsony forráspontú folyadékok tartoznak, amelyek melegítés vagy a polioli + izocianát reakciók exotermikus hőjének hatására gáz állapotba kerülnek. Ahogy arra a nevük is utal, esetükben kémiai reakcióban nem vesznek részt, csak egy fizikai folyadék-gáz fázisátalakulás történik. A reakcióelegyben létrejött gáz a megfelelő koncentrációt elérve elkezd buborékként kiválva önálló gázfázist létrehozni az anyagban, kialakul a habszerkezet. Régebben a PUR-habokhoz használt egyik legnépszerűbb fizikai habosítószer típus a halogénezett szénhidrogének (ún. freonok) voltak, de ezek az ózonrétegre való negatív hatásuk miatt mára visszaszorultak. Habszerkezetű poliuretánok létrehozásához ma is használt fizikai habosítószer példaként a pentán, hexán és aceton [4,9,13–15].

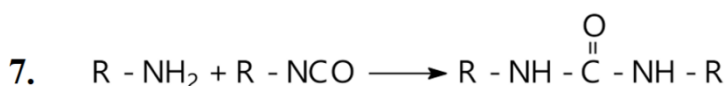
A kémiai habosítószer lényege, hogy kémiai reakció útján hoznak létre gázfázisú molekulákat, amelyek a megfelelő koncentrációt elérve szintén buborékfázisként válnak ki a reakcióelegyből, habszerkezetű anyagot hoznak létre. PUR-habok esetén a legnépszerűbb kémiai habosítószer a víz, amelynek azért is van esetünkben kiemelt jelentősége, mert ezen dolgozat keretében teljes mértékben vízzel habosított poliuretánokat készítettem és vizsgáltam. Ezen esetben az alapvető gázképző reakció az izocianát és víz addícióján alapul, amiből instabil karbamidsav-csoport keletkezik. Ez hamarosan egy amin-csoporttá és szén-dioxiddá bomlik szét, amely közül az utóbbi gázfázisú vegyület. Emellett a víz jelenlétével még több egyéb melléreakció is megjelenik a PUR-hab szintézis során, ezeket a **3. ábra** mutatja be [4,9,19].



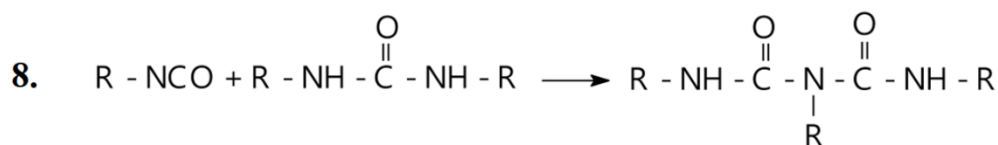
IZOCIANÁT + VÍZ → KARBAMIDSAV → AMIN + SZÉN-DIOXID



KARBAMIDSAV + IZOCIANÁT → KARBAMIDSAV ANHIDRID → UREA + SZÉN-DIOXID



AMIN + IZOCIANÁT → UREA



IZOCIANÁT + UREA → BIURET

3. ábra: Víz jelenlétében megjelenő további reakciók poliál + izocianát alapú poliuretán szintézis esetén [4]

Bár a PUR-habok habszerkezetének kialakításáért a habosítószer felelős, stabilizálásukhoz és a megfelelő cellaszerkezet eléréshez elengedhetetlen a felületaktív anyag mint adalékanyag. Ennek azért van nagy jelentősége, mivel a habszerkezet paraméterei erősen befolyásolják a létrejött anyag tulajdonságait. A porozitás emelkedésével (és a látszólagos

sűrűség csökkenésével) egyre nagyobb térfogatarányt tölt be a gázfázis a habban, ami összességében a hővezetőképesség drasztikus csökkenését eredményezi [21–23]. Ez az elsődleges oka a merev PUR-habok remek hőszigetelő képességének: ezért egy ilyen anyag akár 97 V/V% gázfázis-tartalommal és mindössze 30 kg/m³ sűrűséggel is rendelkezhet [4]. Azonban azt is érdemes figyelembe venni, hogy a porozitás emelkedésével a rugalmassági modulusz és szilárdsági értékek általában romlanak, amelyek szintén fontos szempontok egy merev struktúrális hab esetén [23,24]. Emellett a cellaszerkezet jellemzőinek is nagy hatása van az anyagjellemzőkre: a kicsi átlagos cellaátmérő, és homogén cellaméret- és alakeloszlás számos cikk szerint javítja a hőszigetelő és mechanikai jellemzőket is [4,14,18,21,22]. Végül a nyitott- és zárt cellák részaránya a habban szintén meghatározó tényező. Míg egy nagy mértékben nyitott cellaszerkezet rugalmas, lágy és jó hangszigetelő tulajdonságokkal rendelkező PUR-habot eredményez, addig szerkezeti-hőszigetelő habok esetén sokkal inkább a zárt cellaszerkezet előnyös a jobb nyomószilárdsági és alaktartósági értékek, valamint alacsonyabb hővezetési tényező következtében [6,14,23]. Mindezen hab- és cellaszerkezeti tényezők, ezáltal pedig a PUR-hab tulajdonságai a habosítószer és felületaktív anyag minőségének és mennyiségének változtatásával befolyásolhatók. Az utóbbi adalékok leggyakrabban különböző polisziloxán-alapú ojtott kopolimerek [4,9,10,13–15].

1. táblázat: PUR-habok szintézisének kötelező és lehetséges komponensei

Besorolás	Név	Cél	Csoportosítás, példák
Alapanyagok	Poliol	A láncnövekedési reakció reagense, a PUR lágy szegmensét alkotja	Poliéter- és poliészter típusú poliolo
	Poliizocianát	A láncnövekedési reakció reagense, a PUR kemény szegmensét hozza létre és alkotja	Aromás- (TDI, MDI) és alifás (IDPI, HDI) izocianátok
Szükséges adalékanyagok	Habosítószer	Gázfázisú anyag és habszerkezet létrehozása	Fizikai- (acetón, pentán) és kémiai (víz) habosítószer
	Felületaktív anyag	Cellaszerkezet stabilizálása és kontrollálása	Ojtott polisziloxán kopolimerek
	Katalizátor	Reakciók gyorsítása és szabályozása	Tercier aminok, fémkomplexek
Opcionális adalékanyagok		Anyag- és feldolgozási jellemzők további módosítása	Lágyítószer, stabilizátor, égésgátló adalék, erősítőanyag...

A poliuretánok előállításához általánosságban elengedhetetlennek tartott további adalékanyag a katalizátorok. Ezek elsősorban harmadrendű aminok és eltérő fémkomplexvegyületek. Elsődleges céljuk a PUR szintézis során előforduló reakciók (elsősorban a poliól + izocianát láncnövekedési reakció, és esetlegesen víz + izocianát habképző reakció)

felgyorsítása, miután szobahőmérsékleten egyébként csak igen lassan mennének végbe. Így jelentős hatásuk van többek között a reakcióhőmérsékletre és reakcióidőre is. PUR-habok esetén különösen fontos szempont a katalizátorok oly módon való megválasztása, hogy a polimerizációs (poliol + izocianát) és gázképző (víz + izocianát) reakció sebessége egyensúlyban legyen. Ha az előbbi túl gyors, az anyag már a habosodás befejezte előtt megszilárdul, míg fordított esetben instabil lesz és összeeshet a habszerkezet. Mindezek mellett már említettem, hogy katalizátorokkal az egyéb mellékreakciók gyakorisága is befolyásolható, ezzel még egy lehetőséget adva az anyagjellemzők befolyásolására [4,10,14,25].

A már említett alap- és adalékanyagok azok a komponensek, amik feltétlenül szükségesnek tekinthetők egy merev szerkezeti-hőszigetelő PUR-hab elkészítéséhez. Emellett azonban számtalan más adaléktípus is felhasználható a feldolgozási- és/vagy anyagtulajdonságok további módosításra, amelyek esetleges alkalmazását azonban mindig az adott felhasználási cél határozza meg. A térhálósítószerkezetek, lánchosszabítók, égésgátló adalékok, stabilizátorok, lágyítószerkezetek, színezőanyagok, töltő- és erősítőanyagok csak néhány fontosabb opcionálisan használható további adalékanyag [10,11,15]. A poliuretánok készítéséhez felhasznált komponensekről áttekintést nyújt az **1. táblázat**.

1.2 Holdi regolit, holdpor-szimulánsok bemutatása

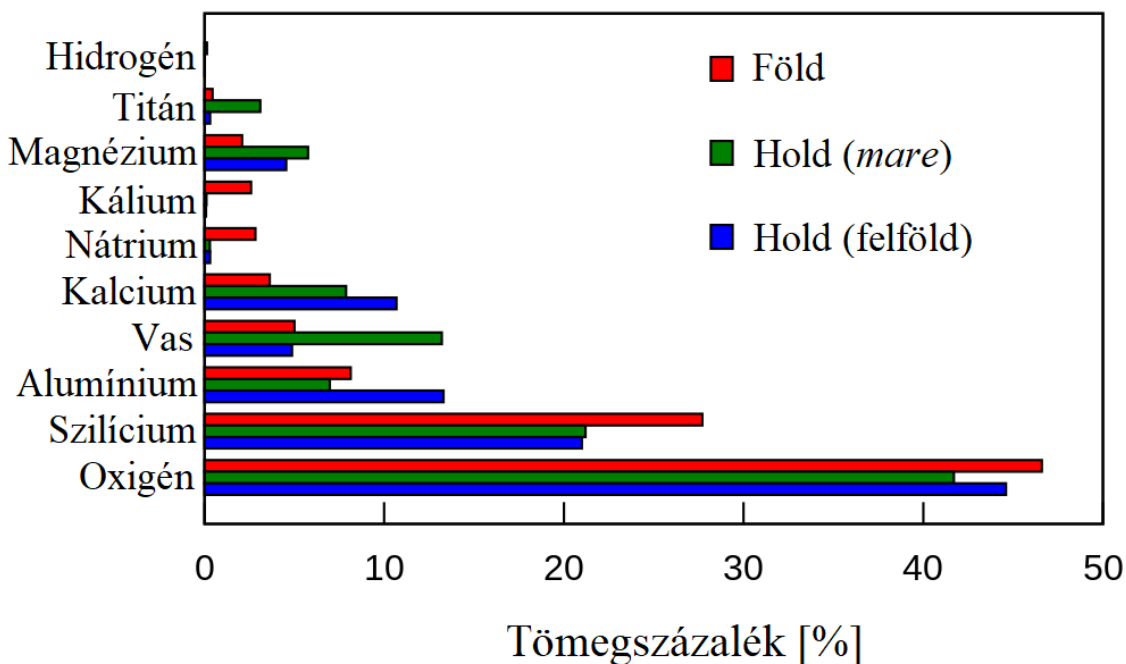
Érdeemes néhány szót szólni a tényleges holdi regolitról, illetve az ennek tulajdonságait reprodukálni célzó és PUR-habban töltőanyagként felhasználandó holdpor-szimulánsokról. A holdi regolit jellege nagy mértékben eltér a földi talajrétegetől. Ennek oka egyrészt a szelek, esők / nedvesség, oxigén és élő organizmusok hiánya mint talajalakító tényezők. Miután azonban a Holdnak nincs atmoszférája és mágneses tere, a Földdel ellentétben a meteoroidok, aszteroidák és kozmikus porszemcsék, valamint a kozmikus töltött részecskék becsapódása jelentős mértékben alakítja a holdfelszínt. Ezen becsapódások következtében a Hold felszínét eredetileg beburkoló alapkőzet olyan mértékű aprózódást szenvedett, hogy jelenleg a teljes holdfelszínt egy finomszemcsés holdporréteg borítja. A néhány nagyobb méretű rögöt eltekintve ezt a holdi regolítot szinte kizárólag 1 cm alatti méretű szemcsék alkotják, aminek további nagyjából 90 %-a 1 mm alatti átmérőjű. A Hold ún. felföldi régióiban 10-15 m vastag ez a szemcsés holdporréteg, de a fiatalabb *mare* területeken is 4-5 m vastagon borítja az alapkőzetet a holdpor [26–30].

2. táblázat: Tipikus felföldi és mare holdpor molekuláris összetétele [31–33]

Vegyület	Tömegszázalék	
	<i>Mare</i>	Felföld
SiO ₂	45,4%	45,5%
Al ₂ O ₃	14,9%	24,0%
CaO	11,8%	15,9%
FeO	14,1%	5,9%
MgO	9,2%	7,5%
TiO ₂	3,9%	0,6%
Na ₂ O	0,6%	0,6%

Bár a regolitréteg a teljes holdi felszínt több méter vastagon beborítja, ettől függetlenül egyáltalán nem tekinthető egy homogén anyagnak. Kémiai és petrológiai szempontból nagymértékű eltéréseket mutatnak a Hold felföldi és *mare* régióiból származó holdporminták. Az előbbi területről származó regolitminták túlnyomó részt anortozitos szerkezettel rendelkeznek, legfőképp plagioklász földpátok alkotják őket. Ezáltal alumínium- és kalcium-oxidban viszonylagosan gazdagok. Ezzel szemben a *mare* régiókat fedő holdport elsősorban bazaltos karakterű, főleg piroxén, olivin és ilmenit ásványok alkotják. Így vas-, magnézium- és titán-oxidban gazdagok a felföldi holdporhoz viszonyítva. Emellett molekuláris szinten a holdport általánosságban kizárólag eltérő szilícium- és fémoxidok alkotják: konkrétan a *mare*

és felföldi regolit tömegének egyaránt közel felét teszi ki a szilícium-dioxid vegyület. Elemi szinten ennek megfelelően az oxigén, szilícium és különböző fémek a holdpor legfőbb alkotói, valamint a Földi talajtól eltérően nitrogént és kARBONT csak nyomelemként tartalmaz [28–32]. A holdpor összetételét (*mare* és felföldi régiókra bontva) molekuláris és elemi szinten részletesebben a 2. táblázat és 4. ábra mutatja be.



4. ábra: Földi talaj és holdi regolit (*mare* + felföld) tipikus elemi összetételének összehasonlítása [31–33]

McKay *et al.* könyvükben ötféle szemcsetípust különböztetnek meg a holdporban: ásványi töredékeket, kristályos közettöredékeket, breccsa töredékeket, üveges anyagokat és agglutinációkat [30]. Ezen szemcsetípusok részaránya is területről-területre változhat a holdi regolitban, ahogyan az átlagos szemcseméret is. Bár a holdpor medián szemcsemérete nagy átlagban körülbelül 72 μm -ként határozható meg, a mintavételek helyétől függően 40 μm és 800 μm közötti eredményeket is mértek [28,30]. A holdpor ezen inhomogenitását, összetétel- és tulajdonságbeli változatosságát a dolgozat szempontjából is érdemes szem előtt tartani.

Az eddig leírtak mind a tényleges holdporra (vagy holdi regolitra) vonatkozó jellemzők voltak. A dolgozat során azonban nem ezt az anyagot használtam fel töltőanyagként a PUR-habokban, aminek pusztán gyakorlati okai vannak: a Földön jelenleg nem érhető el valódi holdpor megfelelő mennyiségben a kísérletekhez. Helyette ún. holdpor-szimulánst alkalmaztam, amik földi eredetű, de kifejezetten a tényleges holdi regolit tulajdonságainak

reprodukálására összeállított szemcsés anyagok. Így ezen holdpor-szimuláns / PUR-hab töltött szerkezetek képesek megfelelő pontossággal szemléltetni azokat az anyagjellemzőket, amiket majd a valódi holdport beépítve is tapasztalnánk. Azonban holdpor-szimulánsból is számos különböző típus létezik és elérhető, amelyek mind csak kisebb-nagyobb hiányosságokkal képesek utánozni a holdregolit tulajdonságait [28,34].

A dolgozat keretében összesen háromfajta holdpor-szimulánst vizsgáltam / használtam: ezek az EAC-1A [34], DNA-1 [35] és DUST-Y [36] néven ismertek. Mind a három szimuláns földi eredetű, többnyire vulkanikus kőzetekből / ásványokból származik. Bár mindegyik a holdi regolit tulajdonságainak reprodukálására készült, ettől függetlenül a minőségük (elsősorban kémiai / petrológiai) nem teljesen egyezik. Ennek oka egyrészt az, hogy maga a valódi holdpor sem egy homogén tulajdonságú anyag, ahogy azt már bemutattam. Az eltérések lehetnek a lokális variációk (azonos régióból származó minták szórása), illetve a regionális különbségek (*mare* és felföldi területek szórása) következményei is. Emellett a szemcseméret-eloszlásuk tekintetében is eltérések vannak a három szimuláns között: míg az EAC-1A és DNA-1 az osztályozatlan holdpor szemcseeloszlását követi, addig a DUST-Y frakcionált szimuláns, amelyekből a durvább szemcsék szándékos módon eltávolításra kerültek. Felhasználásuk előtt azonban szitálás segítségével (tovább) frakcionáltam a három holdpor-szimulánst, így kiküszöbölhetőek voltak az anyagok szemcseméretbeli különbségeiből adódó eltérések.

Számos korábbi tudományos publikáció található, amelyek különböző típusú holdpor-szimulánsokat felhasználva, eltérő módszerekkel állítottak elő építőanyagokat. Az alapvető cél minden esetben annak bizonyítása volt, hogy a helyileg kinyert holdport alkalmazva minimális Földről átszállított alapanyaggal is létrehozhatóak holdi épületstruktúrák. Ezen kutatások alapján az ún. *in-situ resource utilization* (ISRU [37]) elv tekinthető, amely lényege, hogy az idegen égitesteken végzett tevékenységeket minél nagyobb mértékben helyi nyersanyagok felhasználásával érdemes végezni. Ezzel lecsökkenthető a folyamatokhoz Földről átszállítandó tömegmennyiség, az épületek kisebb költséggel és kockázattal, fenntarthatóbb módon készíthetők el. *Cesaretti et al.* 3D nyomtatási technológiával [35], míg *Han et al.* szintereléssel [38] állítottak elő téglaszerű anyagokat holdi regolit szimulánokból. *Gosau* cikkében polimerikus kötőanyaggal összetartva a holdpor-szimuláns szemcséket gyártott építkezésre alkalmas, tömör anyagot [39]. *Dikshit et al.* sajátos eljárás során, kalcium-karbonátot előállító baktériumok segítségével konszolidálta a szimuláns szemcséket, egyfajta keramikus jellegű építőanyagot eredményezve [40].

1.3 PUR-hab / szemcsés töltőanyag kompozitok ismertetése

Eddigi irodalmi kutatásaim alapján jelenleg nincs olyan tudományos cikk, amely holdpor-szimuláns töltőanyagot tartalmazó PUR-habok előállításáról vagy vizsgálatáról számolna be. Bár ez jól jelzi a téma újszerűségét, emellett mindenképpen megnehezíti a szakirodalmi áttekintését. Azonban mindenképpen érdemes elvégezni az ettől eltérő szemcsés töltőanyagot felhasználó cikkek ismertetését, mivel így rálátást nyerhetünk azokra a mechanizmusokra, amik feltételezhetően a saját holdpor-szimuláns / PUR-hab minták anyagszerkezetét és tulajdonságait is alakítják majd. A továbbiakban különböző szemcsés töltőanyag / PUR-hab kompozitok eredményeinek és következtetéseinek áttekintése következik, elsősorban azokra a vizsgálatokra fókuszálva, amelyeket a dolgozatom szempontjából relevánsak.

1.3.1 Habosodási jellemzők (viszkozitás, habosodási idő, reakcióhőmérséklet)

Először is érdemes megnézni a legfontosabb habosodási jellemzők változását a töltőanyag-koncentráció függvényében, mivel azok több szempontból is befolyásolják a PUR-hab szerkezeti-, feldolgozási- és tulajdonságbeli jellemzőit. Számos cikk található, ami a reakcióelegy viszkozitásának monoton emelkedéséről számol be a töltőanyag-mennyiség növekedésével. Ez a trend igen eltérő minőségű töltőanyagok felhasználásával is azonos módon megjelenik, mint például agyag nanoszemcséket [41,42], mikrocellulóz szemcséket [41], szilszkvioxán szemcséket [43], dióhéj-örlemény szemcséket [44] és bazalttörmelék szemcséket [45] tartalmazó PUR-habok esetén. A jelenség általános magyarázata, hogy az egyébként folyékony reakcióelegyhez szilárd halmazállapotú töltőanyag szemcséket adagolunk, ami fokozatosan növeli a rendszer viszkozitását. Ez alapján minden bizonnyal elvárható, hogy holdpor-szimuláns / PUR-hab anyagok esetén is hasonló trendek következzenek be a viszkozitás terén. Érdemes még megemlíteni, hogy bár a viszkozitás emelkedése általános jelenség, ennek mértékét nagyban befolyásolja a töltőanyag kémiai-felületi és szemcseméret-eloszlási tulajdonságai. Jól szemléltetik ezt például *Czlonka et al.* [44], *Strakowska et al.* [43] és *Qi et al.* [41] cikkei, ahol egy kutatás során különböző fajta töltőanyag-szemcséket használva jelentős eltéréseket tapasztaltak a viszkozitás-értékekben.

A viszkozitás növekedése a töltőanyag hozzáadásával egyrészt gátolja a cellák növekedését és a reakciók végbemenetelét, aminek a habosodási idő meghosszabodását kéne eredményeznie. Több cikk megállapította, hogy a töltőanyag általánosságban képes befolyásolni a reakciókinetikát, csökkenti a molekulák mobilitását és a reakciók sebességét.

Ennek megfelelően számos különböző PUR-hab / szemcsés töltőanyag kompozitot vizsgáló cikk kimutatta, hogy a habosodási idő növekszik a töltőanyag-koncentrációval [41,43,44,46–50]. Érdekes azonban megjegyezni, hogy ez nem tekinthető teljesen általános jelenségnek: találhatók például olyan pernye szemcséket [51], cellulóz nanokristály szemcséket [52] és bazalttörmelék szemcséket [45] felhasználó cikkek, ahol ezen faktorok ellenére gyakorlatilag változatlan maradt a habosodási idő.

A viszkozitás növekedése és a molekuláris mobilitás csökkenése a töltőanyag hatására a maximális reakcióhőmérsékletet is befolyásolja. Miután a PUR-hab szintézis során fellépő reakciók alapvetően exotermikus jellegűek, így ezen faktorok a reakciók gátlásával a rendszer maximális elért hőmérsékletét is képesek mérsékelni. Emellett további szempont, hogy a keletkezett hőmennyiségnek a hozzáadott töltőanyagot is melegítenie kell, ami szintén a reakcióhőmérséklet csökkenéséhez járul hozzá. Ezen tényezőknek megfelelően sok cikk található, amelyek többfajta különböző töltőanyaggal is a maximális reakcióhőmérséklet csökkenését állapították meg [44,47,53–57]. Érdekes jelenség azonban, hogy bizonyos kutatók ezen mechanizmusok ellenére teljesen ellentétes eredményt kaptak, és a maximális reakcióhőmérséklet megnövekedését határozták meg a töltőanyag hozzáadásával a PUR-hab mátrixhoz [43,48,49,51]. Ezt a jelenséget azonban általánosan azzal magyarázták, hogy az általuk felhasznált töltőanyagok olyan funkciós csoportokat tartalmaztak, amelyek képesek voltak exotermikus reakcióba lépni a többi komponenssel, így megnövelve a rendszerben felszabaduló hőmennyiséget és hőmérsékletet. Miután az általam használt holdpor-szimulánsokat meglehetősen inert, keramikus oxidvegyületek alkotják, így esetükben nehezen feltételezhető a reaktív funkciós csoportok jelenléte. Így hipotézisem szerint az előbb leírtak alapján a holdpor-szimuláns / PUR-hab rendszerek esetén a maximális reakcióhőmérséklet csökkenését várnám el. A reakcióhőmérséklet befolyásolja a hab kialakult kémiai- és cellaszerkezetét, ezért meghatározó szerepe lehet a tulajdonságokra nézve.

1.3.2 Fizikai jellemzők (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás)

Mint már említettem, a habtérfogat megnövelése a holdpor-szimuláns töltőanyag egyik fő feladata ideális esetben. Ezzel szorosan összefüggő és szintén jelentős anyagjellemzők a PUR-hab látszólagos sűrűsége és porozitása is. Az irodalmi áttekintésem alapján alapvetően három faktor azonosítható, amelyek befolyásolják a habtérfogat változását a töltőanyag hatására. Először is a töltőanyag a saját hozzáadott térfogatával is hozzájárul a habtérfogat

megnöveléséhez, ez azonban egy akár 97 % porozitással rendelkező PUR-hab esetén csak igen csekély hatással van. Meghatározóbb a másik két tényező, amelyek azonban ellenkező irányban befolyásolják a habtérfogatot. Egyrésről fontos faktor, hogy a reakcióelegyhez adagolt szilárd szemcsék gócképzőként képesek viselkedni, mivel heterogén buborékképződési felületet biztosítanak. Ezen jelenség lényege, hogy a töltőanyag felülete mentén kisebb a buborékképződéssel járó Gibbs-energia változás, amely elősegíti a keletkező pórustérfogat és ezáltal a habtérfogat megnövekedését. Ezzel együtt azonban a töltőanyag hozzáadásával a reakcióelegy viszkozitása is emelkedik, amely pedig a buborékok növekedésének gátlása miatt a habtérfogat csökkenését segíti elő. Összességében a habtérfogat változása tehát attól függ, hogy ezen két tényező milyen mértékben képes érvényesülni [41,43,47,53,58]. Érdemes megemlíteni, hogy például *Qi et al.* [41], *Czlonka et al.* [48], *Thirumal et al.* [59] és *Da Silva et al.* [58] cikkeikben sikeresen megnövelték a keletkező PUR-hab térfogatát a töltőanyag hozzáadásával. Ez bizonyítja, hogy a dolgozat alapfeltevése legalábbis elméletben helytálló, miszerint a holdpor (-szimuláns) beépítésével megnövelhető a habtérfogat a korábban már kifejtett célokból.

A hab látszólagos sűrűsége szintén egy fontos anyagjellemző, amely a rendszer tömegének és térfogatának hányadosaként definiálható. Így ha a PUR-hab egyéb komponenseinek tömege állandó, a látszólagos sűrűség változása valójában csak a habtérfogat változásától függ adott töltőanyag-mennyiségnél. Mivel a töltőanyag beépítésével megnöveljük a hab össztömegét, így a habtérfogat csökkenése, állandósága vagy akár nem megfelelő mértékű növekedése is mind a látszólagos sűrűség emelkedését eredményezi. Ennek megfelelően igen gyakori eredmény, hogy a töltőanyag-koncentráció növekedésével monoton módon emelkedik a PUR-hab látszólagos sűrűsége [42,49–52,57]. Ha azonban sikerül megfelelően nagy mértékű térfogatonövekedést elérni, akkor a látszólagos sűrűség csökkentése is lehetséges, amely eredményről több cikk is beszámolt már bizonyos töltőanyagok felhasználásával [41,48,58,59].

Végül a porozitás (gázfázis részaránya a habban) szintén meghatározó tulajdonság: fontos a hővezetési tényező csökkentése érdekében, de ezzel együtt a mechanikai jellemzőket is rontja. A töltőanyag egyrésről biztosan megnöveli a szilárd fázis térfogatát (a sűrűségétől függő mértékben), de a korábban említett mechanizmusok által a pórusok össztérfogatát is képes egyaránt növelni vagy csökkenteni. Így a porozitás szintén a habtérfogattól erősen függő jellemző, mely a felhasznált töltőanyag minősége szerint csökkenő vagy emelkedő tendenciát is mutathat [44,47,48,54,56]. Összességében kijelenthető, hogy az ezen szekcióban áttekintett

három jellemző nagymértékben függ a töltőanyag minőségétől, miután több egymással ellentétes hatású („versengő”) mechanizmus is képes befolyásolni őket.

1.3.3 Cellaszerkezet

Korábban a poliuretán habok áttekintése során már hivatkoztam rá, hogy a kialakult cellaszerkezet sajátosságainak jelentős hatása van az anyag termikus- és mechanikai tulajdonságaira. Az egyik legfontosabb ezek közül az átlagos cellaméret, amelynek csökkentésével elvben a hőszigetelési- és szilárdsági jellemzők is javíthatóak. Ennek azért van jelentősége, mert rengeteg tanulmány során kimutatták, hogy a PUR-hab átlagos cellaátmérője csökkenthető töltőanyagok beépítésével. Ennek okaként elsősorban két tényezőt említenek, amelyekről korábban már esett szó. Először is meghatározó a szilárd szemcsék göcképző hatása, amely lehetővé teszi több buborék egyidejű létrejöttét. Másodszor a rendszer viszkozitásának növekedése a töltőanyag hozzáadásával gátolja a cellák növekedését, ezzel korlátozva a méretüket. Ezen két hatás következtében számos cikk található, amelyben rendkívül eltérő minőségű töltőanyagokkal egyaránt sikerült elérni a PUR-hab átlagos cellaméretének csökkenését [42–44,46,47,50,60]. Ez azért jelentős, mivel ha hasonló cellaátmérő-csökkenést érnék el a holdpor(-szimuláns) töltőanyaggal, ez a mechanikai- és termikus anyagjellemzők javulásához is hozzájárulhatna. Azonban ezen jelenség tekintetében is találhatók kivételek, ahol a töltőanyag hatására megnövekedett az átlagos cellaméret [41,54,59]. *Qi et al.* [41] például 3 m/m% nanoagyag szemcse felhasználásával sikeresen csökkentették a PUR-hab cellaméretét, 5 m/m% mennyiség esetén azonban már a töltetlen habhoz képest is nagyobb volt az átlagos cellaátmérő, amit a cellakoaleszcencia mértékének emelkedésével indokoltak.

1.3.4 Nyomószilárdság

A nyomószilárdság a struktúrális PUR-habok egyik legfontosabb mechanikai jellemzője. A töltőanyag beépítésével ideális esetben növekednie kéne, de legalábbis a felhasználáshoz megfelelő szinten kell tartani. Elméleti szinten azonban rendkívül nehéz megmondani, hogy a holdpor-szimuláns hatására a nyomószilárdság milyen változását várjuk el, miután sok komplex tényező befolyásolja ezen anyagjellemző alakulását a töltőanyag hatására. Egyrésről több cikk is egyetért, hogy a megfelelő töltőanyag képes egyfajta

erősítőfázisként viselkedni a PUR-hab mátrixban, így segítve a nyomószilárdság megnövelését. Ennek azonban fontos feltétele, hogy erős felületi adhézió alakuljon ki a két fázis között és homogén módon legyenek elosztatva a szemcsék a mátrixban. Ellenkező esetben a feszültség hatására lokális repedések / szakadások keletkezhetnek a fázishatárok mentén, ami pedig a szilárdsági értékek csökkenését okozza. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a szemcsés töltőanyagok nagyobb mennyiségekben egyre inkább hajlamosak agglomerációk képzésére, amelyek lerontják a felületi adhézió erősségét és a szemcseeloszlás homogenitását, így a nyomószilárdságot is. Emellett a hab cellaszerkezete szintén fontos szempont a nyomószilárdság tekintetében is. A kicsi átlagos cellaméret, homogén cellaméret- és alakeloszlás, valamint a zárt cellák magas részaránya azok a tényezők, amelyek előnyösek a nyomószilárdság szempontjából. Korábban kifejtettem, hogy a töltőanyag hatására miként változhat a cellaméret, emellett pedig a többi említett cellaszerkezeti jellemzőt is befolyásolhatja. Végül a hab porozitásának mértéke is fontos a nyomószilárdság szempontjából: általában kisebb porozitással lehet jobb szilárdsági értékeket elérni. A szakirodalmi áttekintés során korábban már szintén említettem, hogy a töltőanyag minőségétől függően eltérő módon változhat a PUR-habok porozitása is [41,42,44,49,51,52,54,58,60].

Miután ilyen sokrétű faktor befolyásolja a nyomószilárdság változását a töltőanyag hatására, nem meglepő, hogy a konkrét típusától függően igen változatos eredményeket találhatunk e tekintetben. Pernye szemcsék [51], napraforgó préselvény szemcsék [60] és repce préselvény szemcsék [57] felhasználásával a nyomószilárdság monoton növekedését tapasztalták a töltőanyag-koncentráció emelkedésével még egészen magas (rendre 35-30-60 m/m%) mennyiségek esetén is. Ellenben például bazalttörmelék szemcsék [45] és fűrészpor szemcsék [53] esetén a nyomószilárdság monoton csökkent a töltőanyag mennyiségével. Gyakori eredmény még, hogy a nyomószilárdság maximumos függvény szerint változik a töltőanyag-koncentrációval, mint azt szilícium-dioxid szemcsék [49], nanoagyag szemcsék [41,42] vagy dióhéj-örlemény szemcsék [44] esetén elérték. Összefoglalva tehát a holdpor töltőanyag hatására bekövetkező nyomószilárdság-változás bármely említett típusa elképzelhető annak függvényében, hogy a fentebb említett faktorok milyen irányban és mértékben befolyásolják azt.

1.4 Szakirodalom kritikai áttekintése

Ahogy már említettem, a merev PUR-habok mint holdi épületstruktúrák egyik lehetséges építőanyaga a szakirodalomban ismert felvetés [1–3]. Nemcsak teherviselő, szerkezeti szerep betöltésére alkalmasak, de az épületek hőszigeteléséhez is nagyban hozzájárulnának. Ugyanilyen fontosságú, hogy mindemellett a PUR-habok igen alacsony sűrűséggel is előállíthatóak, így viszonylag kis tömegmennyiséget szükséges a Földről átszállítani az épületek kivitelezéséhez. Ezen területtől függetlenül az is látható volt a szakirodalmi áttekintésem során, hogy sok más anyaghoz hasonlóan a PUR-habok tulajdonságai javíthatóak töltő- és/vagy erősítőanyagok alkalmazásával, kompozitok létrehozásával. Ugyan semmi gyakorlati korlátja nincs annak, hogy „tisztá” poliuretán helyett ezen korábban vizsgált PUR-hab kompozitokat alkalmazzuk a Holdon építőanyagként, egy jelentős hátránnyal mégis rendelkeznek. A felhasznált erősítőfázisok ugyanis földi eredetűek, vagyis a poliol / izocianát alapanyagokhoz hasonlóan szükséges a Holdra való átszállításuk, potenciálisan jelentős többletköltséget jelentve.

Dolgozatom témája értékelhető úgy is, mint kísérlet az *ISRU*-elv érvényesítésére a PUR-hab mint holdi épületstruktúrák szerkezeti-hőszigetelő anyaga koncepció esetén. A szakirodalomban erre irányuló kutatással eddig még nem találkoztam. A holdpor lokálisan kinyerhető, így bármely más töltőanyaggal szemben nem szükséges a Földről szállítani. Célja azonban gyakorlatilag megegyezik bármely más töltő- / erősítőanyagével: a PUR-hab felhasználás szempontjából releváns anyagjellemzőinek javítása, illetve a habosodási térfogat növelése. Az utóbbi kritérium szintén a Holdra szállítandó tömegmennyiség csökkentésével hozható kapcsolatba. Ha létrehozható egy ezen célokat teljesítő PUR-hab receptúra, azzal egy holdbázisok létrehozására még inkább előnyös építőanyagot nyernénk.

Gyakorlati szempontból látszólag a kutatást gátló tényező, hogy valódi holdporminták nem állnak rendelkezésre a szükséges mennyiségben. Miután azonban számos más tanulmány kíván hasonlóképpen foglalkozni a holdi regolithoz valamelyest kapcsolódó témákkal, akadémiai és ipari szereplők már korábban kifejlesztettek többfajta holdpor-szimulánst. Ezen szimulánsok ugyan földi eredetűek, összeállításuk a valódi holdpor karakterisztikáinak utánzására történt, a dolgozathoz hasonló *ISRU* kutatások elvégzésére [34,61].

2. KÍSÉRLETI RÉSZ

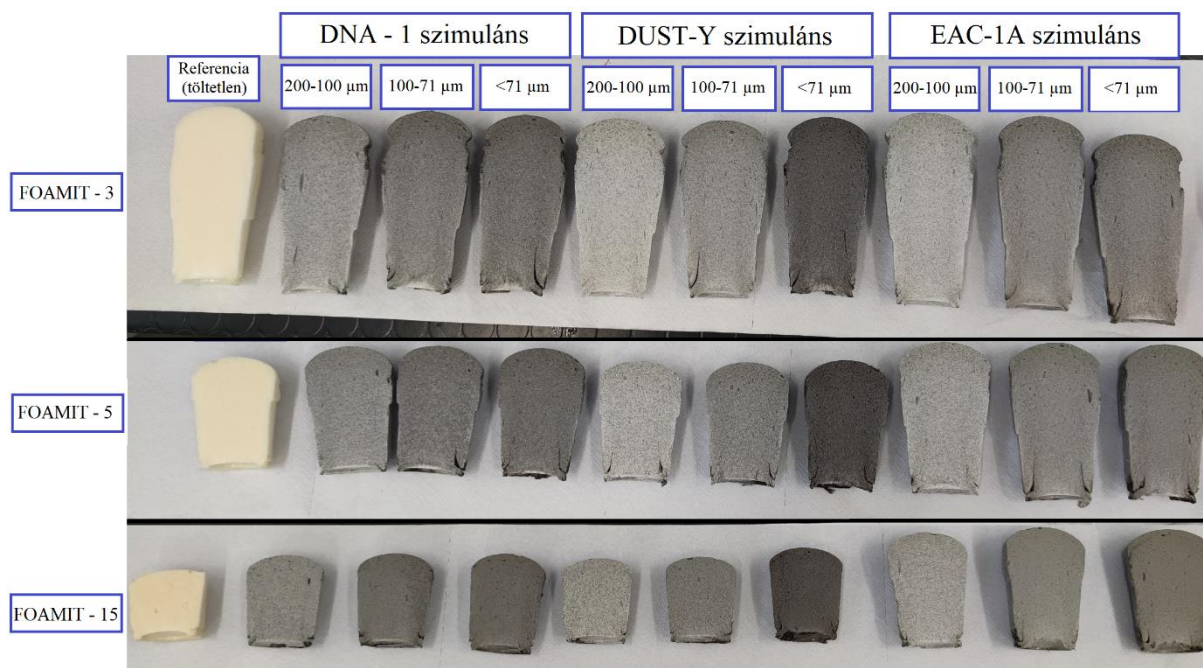
2.1 Minták elkészítése

A háromfajta holdpor-szimulánst felhasználás előtt szítasor segítségével frakcionáltam, ezen folyamat részletes leírása a következő fejezetben olvasható. Így a dolgozat keretében végül háromfajta holdpor-szimuláns (EAC-1A, DNA-1 és DUST-Y) három különböző szemcseméret-frakcióját (100-200 μm , 100-71 μm és < 71 μm) használtam fel töltőanyagként a PUR-habban (5. ábra).



5. ábra: PUR-habok elkészítésének menete

A PUR-habok elkészítéséhez összesen háromfajta kereskedelmi forgalomban kapható termékcsomagot használtam fel: ezek a FOAMIT - 3, FOAMIT - 5 és FOAMIT - 15 neveket viselik. Mindhárom termék két-két folyadékkomponensből áll: az egyik tartalmazza az izocianátot, míg a másik a poliolt és minden egyéb adalékanyagot (víz / habosítószer, katalizátor, felületaktív anyag). A gyártói utasításban rögzített arányokat figyelembe véve minden minta 8.7 gramm poliolt (+ adalékanyagok) komponens és 10 gramm izocianát komponens felhasználásával készült. A töltött minták esetén 8.7 gramm holdpor-szimulánst is hozzáadtam a poliolt komponenshez, és 1 percen keresztül kézi keveréssel homogenizáltam őket. Az izocianát komponens hozzáadása után szintén 1 perc kézi homogenizálás következett. A mintákat műanyagpoharakban készítettem el, a komponensek megfelelő mennyiségeit Kern KB típusú táramérlegen mértem ki. Miután háromfajta holdpor-szimuláns három-három eltérő szemcsefrakcióját tartalmazó habokat készítettem, három típusú eltérő PUR-hab mátrixban, így összesen 30 mintát vizsgáltam (27 töltött + 3 referencia PUR-hab). Az alapvető cél az volt, hogy így a szimulánsok minősége, szemcsemérete és a PUR-hab mátrix befolyását is meghatározhassam a tulajdonságok alakulására. Az elkészített és vizsgált mintatípusokról áttekintést nyújt a 6. ábra.



6. ábra: A dolgozat keretében készített és vizsgált PUR-hab minták keresztmetszetei

2.2 Holdpor-szimulánsok szemcseméret-eloszlása

A holdpor-szimulánsok szitálással történő frakcionálásával egyidőben a szemcseméret-eloszlásuk meghatározását is elvégeztem (7. ábra). Ezen eljárás lényege az egyes szitákon fennmaradó szemcsék tömegmérésén alapul, mivel így megadható, hogy a minta hány tömegszázaléka tartozik az adott szemcseméret-tartományba. Ezen adatok alapján megszerkeszthető a holdpor-szimulánsok kumulatív görbéje is, ami megadja, hogy a szemcsék hány tömegszázaléka rendelkezik az adott méretnél kisebb átmérővel. Emellett az átlagos szemcseméret meghatározásának általánosan elfogadott módja a kumulatív görbe 50 m/m%-os pontjához tartozó érték kijelölése.

A szitálást 630 µm, 400 µm, 200 µm, 100 µm és 71 µm lyukbőségű szitákkal végeztem. Az EAC-1A és DUST-Y szimulánsokból 500 gramm, míg a DNA esetén 1000 gramm por frakcionálásával történt a szemcseméret-eloszlás meghatározása. A tömegmérésekhez Radwag PS 6100.R2.M típusú táramérleget használtam. A szitákon egyenként 30 perc kézi rázással juttattam át a szemcséket.



7. ábra: A szitáláshoz és szemcseméret-eloszlás meghatározásához felhasznált szitasor és táramérleg

2.3 Habosodási jellemzők (habosodási idő, reakcióhőmérséklet)

A szakirodalmi áttekintés során már említettem a habosodási / feldolgozási jellemzők nyomonkövetésének fontosságát. Az ott említett tulajdonságok közül a reakcióelegyek viszkozitása idő- és berendezésbeli korlátok miatt ezen dolgozatban nem került meghatározásra, de jövőbeli kutatásokban sor kerülhet rá.

A maximális reakcióhőmérséklet mérésére infravörös hőmérsékletszenzort használtam. A habosodás végbemenetele során a készüléket a minta felületére irányítva néhány másodpercenként leolvastam a hőmérsékletet, és a legnagyobb mért értéket feljegyeztem. Ezen módszerrel pontosabban a minta felületének maximális elért hőmérséklete került meghatározásra, ami mutathat némi eltérést a belső hőmérséklethez képest.

A habosodási idő mérésére elektromos stopperórát használtam. Az időmérést a reakcióelegy izocianáttal való homogenizálásának kezdetekor indítottam el, és a hab térfogatnövekedésének végekor fejeztem be.

2.4 Fizikai jellemzők (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás)

A habminták három releváns fizikai paramétere (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás) közül a látszólagos sűrűséget határoztam meg mérés útján, majd a másik két jellemzőt ezen eredmények segítségével számításos módon vezettem le. A látszólagos sűrűség mérési módszerét korábbi, PUR-hab / szemcsés töltőanyag kompozitok vizsgálatával foglalkozó cikkekből vettem át [50–52,58]. Mind a 30 habtípusból 3-3 darab, nagyjából 2 X 2 X 2 cm élhosszúságú kockát vágtam ki. Digitális tolómérővel minden kockának 12-12 mérési helyen meghatároztam a tényleges átlagos oldalhosszait, majd ezen értékek szorzatából kiszámítottam a térfogatukat. Ezt követően mérlegen három tizedesjegy pontossággal megmértem a kockák tömegét (**8. ábra**). Miután a látszólagos sűrűség definíció szerint a minta össztömegének és össztérfogatának (a pórus- és szilárd térfogatot is beleértve) hányadosa, az alábbi képlet segítségével meghatározhatók az egyes kockák értékei:

$$\text{Látszólagos sűrűség} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{m_{\text{kocka}}}{V_{\text{kocka}}}$$



8. ábra: A látszólagos sűrűség és fizikai paraméterek meghatározásához használt Kern PNJ mérleg és Kreator digitális tolómérő

A módszer alapvető feltételezése, hogy a kivágott kockák látszólagos sűrűsége a teljes habmintára reprezentatív. Tehát egy adott mintatípus esetén az értéket a három belőle kivágott kocka látszólagos sűrűségének átlagaként számoltam, illetve ebből határoztam meg szórást is. Az ily módon meghatározott látszólagos sűrűség értékekkel, valamint a teljes minták előzetesen lemért tömegével kiszámítható a habtérfogatuk is:

$$Habtérfogat [cm^3] = \frac{\rho_{\text{látszólagos}}}{m_{\text{minta}}}$$

A minták porozitásának (gáz fázis részarányának) meghatározását szintén számítás útján végeztem el. Ehhez azt használtam fel, hogy a porozitás definíció szerinti képlete az alábbi formába rendezhető át:

$$Porozitás [-] = 1 - \frac{V_{\text{szilárd}}}{V_{\text{gáz}} + V_{\text{szilárd}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{látszólagos}}}{\rho_{\text{szilárd}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{látszólagos}}}{\frac{m_{\text{össz}}}{\frac{m_{\text{PUR}}}{\rho_{\text{PUR}}} + \frac{m_{\text{regolit}}}{\rho_{\text{regolit}}}}}$$

A képletben szereplő mennyiségek közül a látszólagos sűrűségek a fentebb leírt módon meghatározásra kerültek. A poliuretán fázis tömegének a mintákhoz adott poliól és izocianát tömegének összegét tekinthetjük (18,7 gramm), a regolit-szimuláns tömege pedig szintén ismert (referencia minták esetén 0 gramm, töltött mintáknál 8,7 gramm). Ez alapján könnyen számolható a minta (elméleti) össztömege: a referencia minták esetén 18,7 gramm, míg a töltött haboké 27,4 gramm. A számításhoz szükség van még a poliuretán fázis valódi (pórusmentes) sűrűségére is: erre az 1135 kg/m³ értéket használtam fel, ami a PUR-hab két folyadékkomponensének átlagos sűrűsége. *Szycher* könyve szerint [15] a poliuretánok tipikus valódi sűrűsége 1120 – 1240 kg/m³ értékek között változik, illetve *Placido et al.* [21] és *Yang et al.* [23] cikkeikben 1150 kg/m³ és 1170 kg/m³ értékeket feltételezve végeztek el hasonló számításokat. Végző soron szükség van még a holdpor-szimulánsok valódi (pórusmentes) sűrűségére, amely esetben szakirodalmi adatokra támaszkodtam: az EAC-1A esetén 2900 kg/m³, míg a DNA-1 szimulánsnál 2790 kg/m³ [34], DUST-Y esetén pedig 3000 kg/m³ [36] volt a felhasznált érték.

2.5 Nyomószilárdság

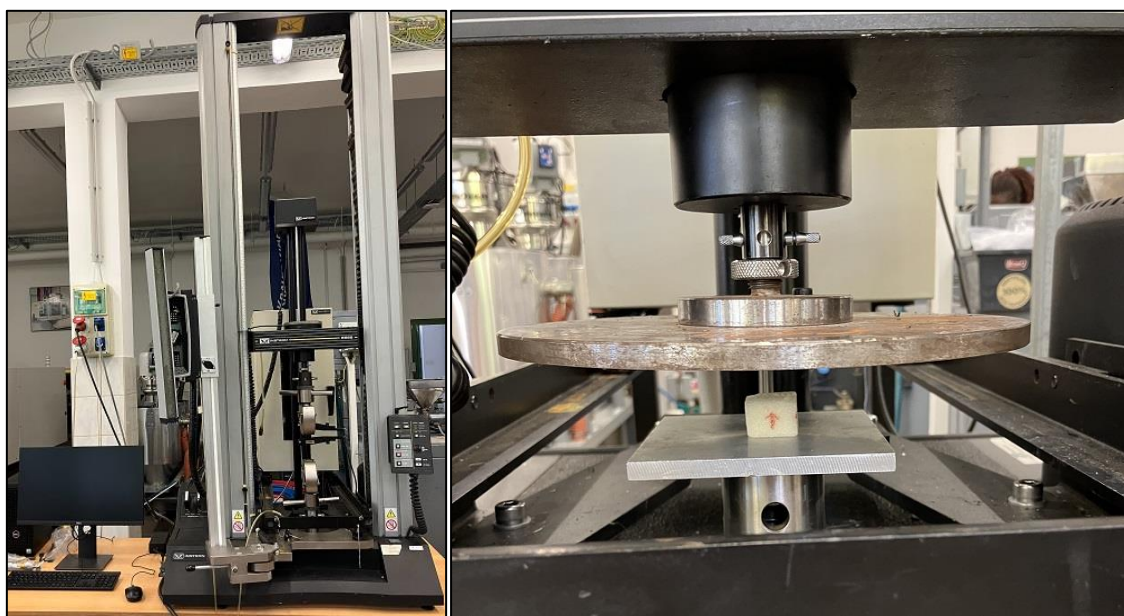
A nyomószilárdság a vizsgált PUR-habok legfontosabb mechanikai jellemzőjének tekinthető, mivel ez határozza meg teherbíró képességüket mint épületszerkezeti-anyag. A nyomóvizsgálatot általában az anyag tönkremeneteléig végzik, és a folyamat során felvett legnagyobb (mérnöki) feszültség értéket tekintik az anyag szilárdságának. Poliuretán habanyagok esetén azonban gyakrabban használt egyfajta „egyezményes nyomószilárdság”, amely egy kijelölt deformációs értékhez tartozó (mérnöki) feszültséget jelenti [42,44,50,53]. Ezen dolgozat keretében az 50%-os deformációs értékhez tartozó feszültséget használtam fel

mint az anyagok egyezményes nyomószilárdsága. Ez azt a feszültséget jelenti, amellyel terhelve a PUR-hab minta magassága az eredeti érték felére csökken. Ezen egyezményes nyomószilárdság az alábbi képlet segítségével határozható meg:

$$\text{Egyezményes } (\varepsilon = 50\%) \text{ nyomószilárdság} = \frac{F_{50\%}}{A_{\text{terhelt}}}$$

A nyomóvizsgálathoz a habmintákból kivágott, korábban a látszólagos sűrűség meghatározásához készített 2 X 2 X 2 cm élhosszúságú kockákat használtam fel. A kockáknak digitális tolómérővel már korábban megmértem a pontos oldalhosszait, amely adatokból kiszámolható a nyomóvizsgálat során terhelt felület nagysága. A mérés során a berendezés folyamatosan rögzíti az adott abszolút deformációhoz tartozó terhelőerőt: a minta kezdeti magasságának ismeretével kijelölhető az 50%-os deformációs érték, és az ehhez tartozó terhelési erő. A fenti képletnek megfelelően az egyezményes nyomószilárdság kiszámítható mint az 50%-os deformációhoz tartozó nyomóerő és a terhelt felület hányadosa. Fontos megemlíteni, hogy a nyomóvizsgálat minden esetben oly módon zajlott, hogy a terhelés iránya párhuzamos volt a PUR-habok növekedési irányával.

A nyomóvizsgálatokat *Instron 5566* típusú univerzális vizsgálóberendezésen végeztem (9. ábra), 10 mm / min deformációs sebességgel. A mérések szobahőmérsékleten zajlottak.

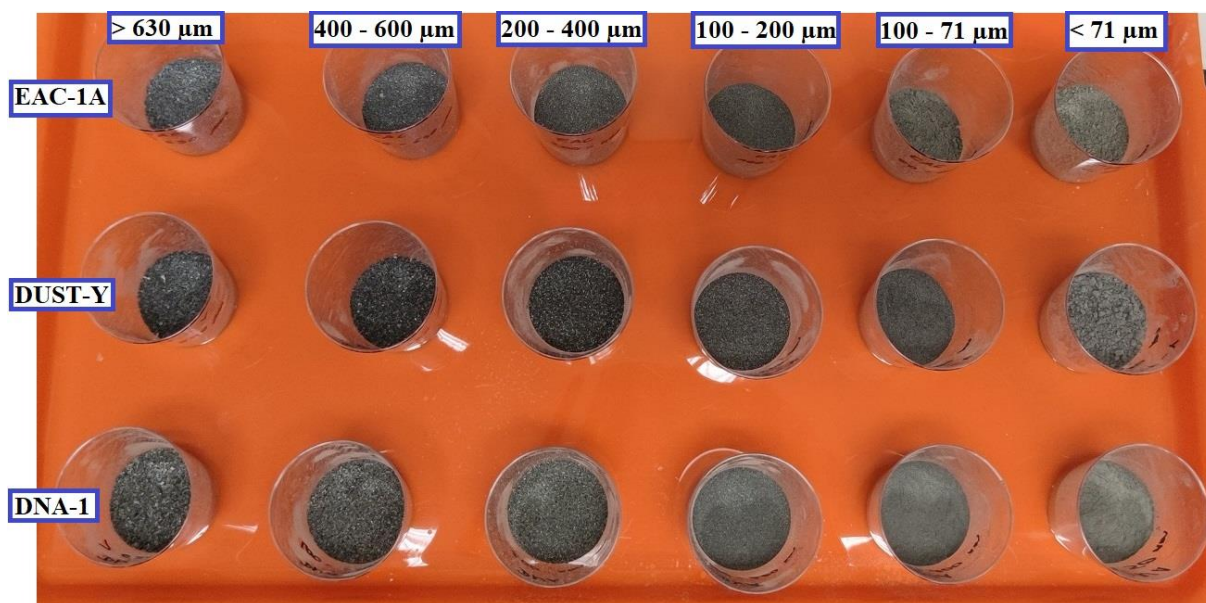


9. ábra: Felvételek a PUR-hab minták nyomóvizsgálatának elvégzéséről Instron 5566 univerzális vizsgálóberendezésen

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

3.1 Holdpor-szimulánsok szemcseméret-eloszlása

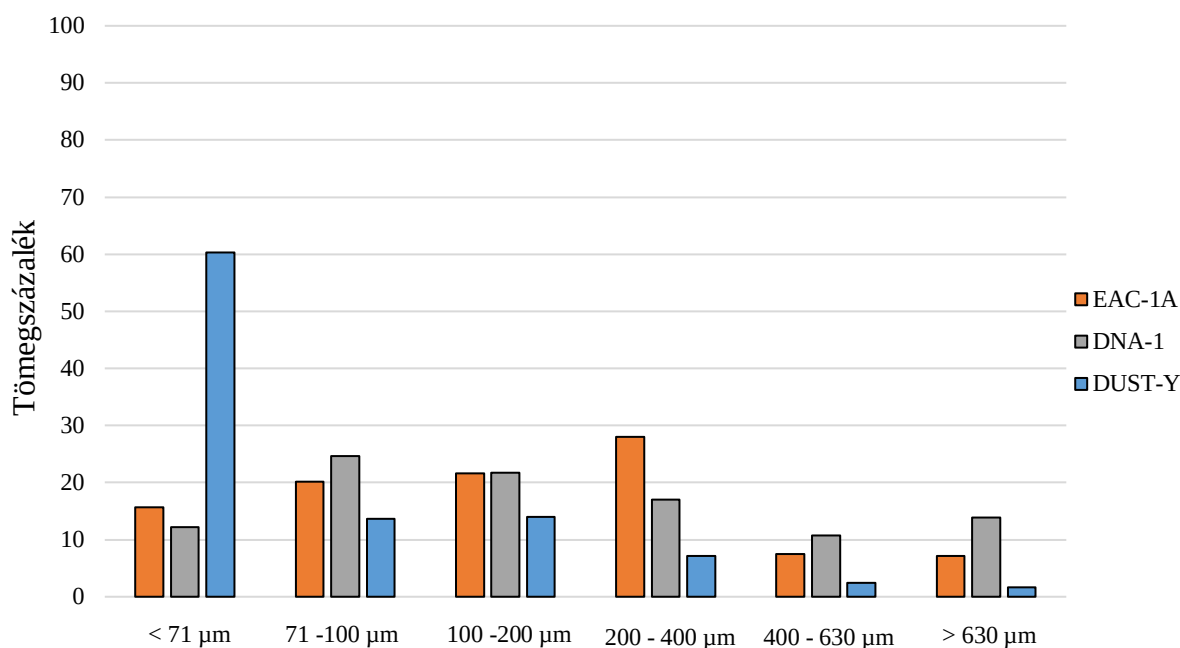
A holdpor-szimulánsok szitálással szétválasztott különböző frakcióit a **10. ábra.** szemlélteti. A szitaanalízis alapján elkészített szemcseméret-eloszlás diagramot a **11. ábra,** a kumulatív görbéket pedig a **12. ábra** mutatja be.



10. ábra: A holdpor-szimulánsok szitálással szétválasztott frakciói

A diagramokon nagy különbségek fedezhetők fel a frakcionált (DUST-Y) és nem-frakcionált (EAC-1A; DNA-1) szimulánsok szemcsemérete között. Az utóbbi két portípus esetében egyaránt kijelenthető, hogy rendkívül széles és egyenetlen szemcseméret-eloszlással rendelkeznek. 630 μm feletti és 71 μm alatti méretű szemcséket is jelentősnek tekinthető mennyiségben tartalmaznak. Egyenletességi fokuk (az átlagos szemcseméret $\pm 1/3$ tartományába tartozó tömegmennyiség) mindössze $\sim 20\%$ körül alakul. A valódi holdpor is hasonlóan egyenetlen eloszlással rendelkezik [34]. Mint már utaltam rá, az átlagos szemcseméret meghatározásának módja ezen vizsgálatípus esetén a kumulatív görbe 50 m/m%-os pontjához tartozó szemcseméret leolvasása. A vizsgált tartományokat is figyelembe véve egyértelműen kijelenthető, hogy az EAC-1A és DNA-1 szimulánsok átlagos szemcsemérete ugyanúgy a 100 – 200 μm intervallumban helyezkedik el. Az *Excel* program által megrajzolt konkrét görbét leolvasva az előbbi átlagos szemcsemérete $\sim 160\ \mu\text{m}$ körül helyezkedik el, míg az utóbbié nagyjából $\sim 150\ \mu\text{m}$.

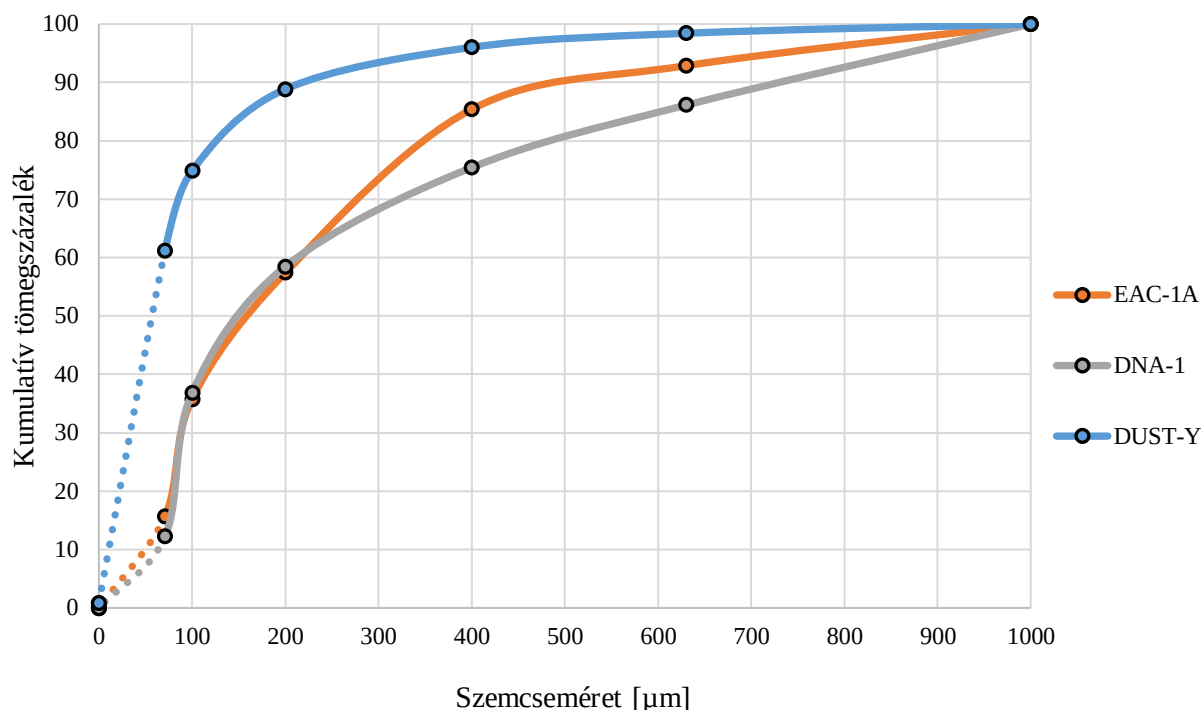
Általánosságban az mondható, hogy az EAC-1A és DNA-1 regolit-szimulánsok szemcseméret-eloszlása viszonylagosan jól illeszkedik a szakirodalmi adatokhoz [34,61]. Igazán jelentős eltérések a finomabb frakciók ($<100\ \mu\text{m}$) mennyiségeit illetően fedezhetők fel, ahol a saját vizsgálataim alapján kisebb tömegszázalék tartozik a legfinomabb $<71\ \mu\text{m}$ frakcióba mint korábbi cikkek adatai alapján. Ennek valószínűsíthető oka a vizsgálati módszerek eltéréseiben fedezhető fel: a szitálás egyéb metódusokhoz képest (pl. optikai analízis, lézerdiffrakciós vizsgálat) a nagyobb méretű frakciók felé hajlamos torzítani az eredményt. Különösképpen a finomabb szemcseméret-tartományok esetén okozhat ez jelentősebb eltéréseket. Oka, hogy a legfinomabb szemcsék képesek hozzátapadni a nagyobb regolitdarabokhoz, nehezen széttörhető aggregációkat képeznek, eltömíthetik a szitát. Ez egyben arra is utal, hogy az elválasztás ennek következtében nem volt teljes hatékonyságú a legfinomabb átmérőjű sziták esetén.



11. ábra: Holdpor-szimulánsok szitálással meghatározott szemcseméret-eloszlása

A valódi holdi regolithoz képest az EAC-1A és DNA-1 meghatározott átlagos szemcseméretei kissé nagyobbak. Ahogy az irodalmi áttekintés során már említettem, a holdpor esetén nagy átlagban $72\ \mu\text{m}$ ez az érték. Azonban a Holdról vett különböző minták között elég nagy a szórás is e tekintetben, így az $150\text{--}160\ \mu\text{m}$ értékeikkel a két szimuláns még mindig reálisnak tekinthető szemcsemérettel rendelkezik [28–30]. Korábbi cikkek is hasonló következtetéseket vontak le a holdpor-szimulánsok szemcseméretét a valódi holdi regolithoz viszonyítva [34,35,61]. A konkrét eloszlást vizsgálva is jól követi a két szimuláns a durvább

méretű valódi holdpormintákat. Ez alól kivételt képez a legfinomabb ($<71\ \mu\text{m}$) frakció, amelyből az eredményeim szerint túl keveset tartalmaz a valódi holdi regolithoz képest. Ennek oka azonban valószínűsíthetően a szitálási módszer már fentebb kifejtett sajátosságai, korábbi kutatások esetén ezen tartományban is relatíve jól követték a szimulánsok a holdpor méreteit [34,61].



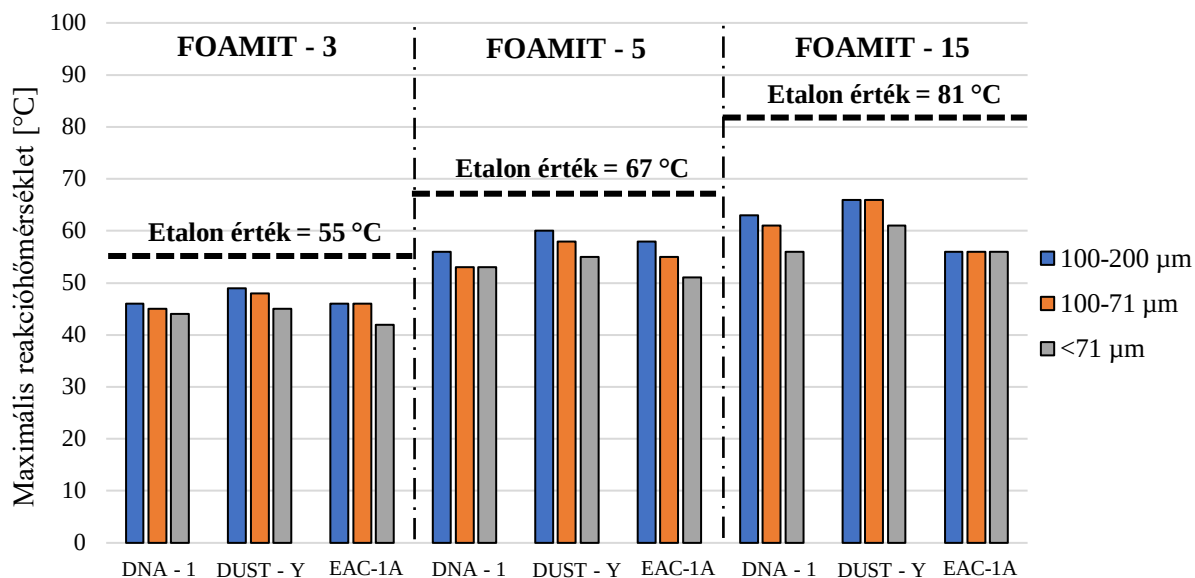
12. ábra: Holdpor-szimulánsok szitálással meghatározott kumulatív görbéje

A DUST-Y szemcseméretbeli jellege alapvető eltérést mutat a másik két szimulánshoz képest: jóval kevesebb durva méretű szemcsét tartalmaz, tömegének több mint 60 %-a $71\ \mu\text{m}$ alatt található. Ennek megfelelően átlagos szemcsemérete is $71\ \mu\text{m}$ alatti, ezzel jóval finomabb a másik két portípushoz képest. Mint már említettem, a DUST-Y egy frakcionált holdpor-szimuláns, mely szándékosan nem követi a valódi holdpor szemcseméret-eloszlását, hanem a durvább szemcsék mennyiségét szándékosan lecsökkentette. Ezen frakcionáció mértéke azonban érdekes módon az eredményeim alapján jóval kisebb, mint azt a gyártó honlapján [36] feltüntetett adatok alapján elvárnánk. Ha valóban igazak lennének az ott közölt értékek, a DUST-Y gyakorlatilag 100 %-ának át kellett volna esnie a $71\ \mu\text{m}$ átmérőjű szitán. Ez már csak azért sem lehet a szitálási módszer pontatlansága, mivel az egyes szétválasztott frakciók méretében szabad is szemmel is jól látható különbségek vannak (**10. ábra**). A frakcionált jellegének köszönhetően a DUST-Y így is finomabb szemcseméret-eloszlással rendelkezik, mint akár a legfinomabb *Apollo* küldetés során vizsgált valódi holdporminta [34].

A fentebb meghatározott szemcseméret-eloszlások nyilván azon jövőbeli kutatások során lesznek igazán relevánsak, amelyek a holdpor-szimulánsokat a gyártó által összeállított állapotukban használják fel. A jelen dolgozatban mindhárom portípus $100 - 200\ \mu\text{m}$, $100 - 71\ \mu\text{m}$ és $< 71\ \mu\text{m}$ méretű szétválasztott frakcióját külön-külön használtam fel töltőanyagban a PUR-habokban. Ezzel nemcsak a szemcseméret hatása figyelhető meg az egyes jellemzőkre, de a három holdpor-szimuláns szemcseméretbeli eltérései sem befolyásolják az eredményeket. Ennek köszönhetően biztosak lehetünk benne, hogy az egyes szimuláns-típusokkal készített PUR-habok eltérései nem a szemcseméretük különbségei, hanem az alakbeli és kémiai/anyagszerkezeti eltéréseik okozzák.

3.2 Habosodási jellemzők (habosodási idő, reakcióhőmérséklet)

A maximális reakcióhőmérséklet változását a vizsgált tényezők függvényében a **13. ábra** mutatja be. A habosodási idő mért értékeit a **14. ábra** szemlélteti. Az egyes összetartozó maximális reakcióhőmérséklet – habosodási idő adatpárokat a **15. ábra** mutatja be.



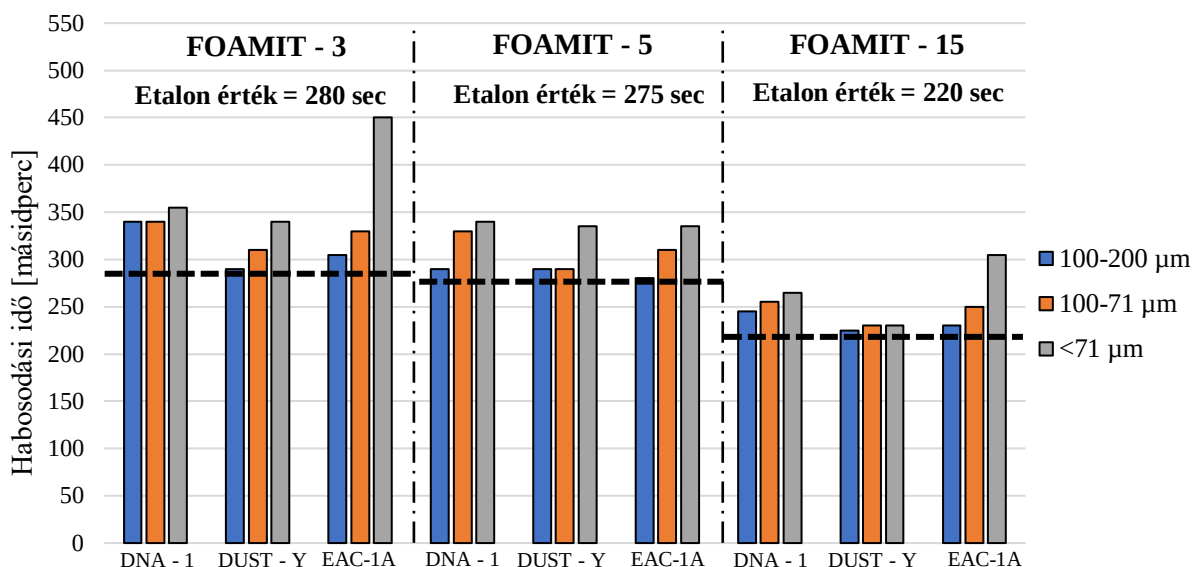
13. ábra: PUR-hab minták maximális reakcióhőmérsékletének változása a vizsgált faktorok függvényében

Ahogy látható, a három eltérő referenciamátrix maximális reakcióhőmérsékleteiben viszonylag jelentős eltérések voltak megfigyelhetők. A FOAMIT - 3, FOAMIT - 5 és FOAMIT - 15 töltetlen PUR-habok értékei rendre 55 °C, 67 °C és 81 °C voltak. Általánosságban kijelenthető az eredmények alapján, hogy a holdpor-szimuláns töltőanyagok beépítésével mind a három alpmátrix esetén mérhető mértékben csökkent a maximális reakcióhőmérséklet. Emellett bár a hőmérsékletcsökkenés általánosan megjelenő jelenség, a nagyságát enyhén befolyásolni látszik a három vizsgált tényezők. Egyrésztől minél nagyobb volt a töltetlen PUR-hab reakcióhőmérséklete, annál nagyobb volt az érték csökkenése. Például a 100 – 200 µm méretű DNA-1 töltőanyagot tartalmazó PUR-hab maximális hőmérséklet csökkenése FOAMIT - 3 mátrix esetén 9 °C volt, FOAMIT - 5 esetén 11 °C, míg a FOAMIT - 15 mátrixszal 18 °C. Az összes többi frakció és holdpor-szimuláns esetén is hasonló trendek figyelhetők meg. Másodszor úgy tűnik, hogy a szemcseméret csökkentésével a maximális reakcióhőmérséklet is enyhén kisebb lesz. Érdekes azonban megjegyezni, hogy ez a hatás nem minden esetben jelent meg: konkrétan a FOAMIT - 15 mátrixszal és EAC-1A szimulánssal készült minták esetén nem volt mérhető hatása a szemcseméretnek a reakcióhőmérsékletre. A

másik nyolc PUR-hab mátrix + holdpor-szimuláns kombináció esetén azonban egyaránt megjelent ez a trend, tehát így is egy viszonylag jól kimutatható (bár gyenge) hatásnak tekinthető. Harmadszor pedig a holdpor-szimuláns típusa szerint is egy csekély nagyságú, de minden esetben megjelenő trend látható a reakcióhőmérséklet tekintetében. Mind a kilenc PUR-hab mátrix + szemcseméret-frakció kombináció esetén a DUST-Y töltőanyagot felhasználó habok maximális reakcióhőmérséklete volt néhány Celsius-fokkal a legnagyobb. A DNA-1 és EAC-1A szimulánsok között egyértelmű eltérés nem volt kimutatható a reakcióhőmérséklet terén.

A szakirodalmi áttekintés során már hivatkoztam rá, hogy a maximális reakcióhőmérséklet csökkenése egy igen gyakori jelenség töltőanyagot beépítő PUR-habok esetén [44,47,53–57]. Az ezekben a cikkekben említett mechanizmusok fellépése valószínűsíthető esetekben is. A holdpor-szimuláns szemcsék egy extra felmelegítendő anyagmennyiséget szolgáltatnak a rendszer számára, miközben ők maguk többnyire inertnek tekinthetők, így nem növelik a reakciók által keletkező hőmennyiséget. Továbbá a töltőanyag reakciókinetikai változásokat idézhet elő: növeli a rendszer viszkozitását, gátolja a reakciók végbemenetelét, csökkenti a molekulák mobilitását. Ezen faktorok összességében a maximális reakcióhőmérséklet csökkenését okozzák, ahogy az meghatározásra került. Ha nagyobb a referencia PUR-hab reakcióhőmérséklete, akkor a beépített holdpor-szimuláns szemcsék több hőt képesek elvonni a reakcióelegytől, valamint a két fázis közti hőátadás teljesítménye is magasabb lesz a nagyobb hőmérsékletkülönbség következtében. Ez okozhatja, hogy ezen esetekben nagyobb hőmérsékletesést tapasztalunk a töltőanyag beépítésével. Emellett kisebb méretű szemcsék felhasználásával is javulhat a töltőanyag-PUR-hab fázisok közti hőátadás sebessége a nagyobb fajlagos felületük miatt, illetve a szemcseméret a reakciókinetikára gyakorolt hatást is feltételezhetően befolyásolja. Ennek megfelelően az esetek túlnyomó többségében valóban kimutatták az eredményeim, hogy a szemcseméret csökkentésével a maximális reakcióhőmérséklet is enyhén csökkenthető. Végül soron maguk a holdpor-szimuláns szemcsék konkrét karakterisztikái (szemcsealak, hővezetési tényező, hőkapacitás, kémiai-felületi tulajdonságok) is befolyásolják, hogy az említett hatásokkal pontosan milyen mértékben képesek csökkenteni a rendszer reakcióhőmérsékletét. Mint az korábban látható volt, például a DUST-Y töltőanyag jellemzőinek köszönhetően enyhén, de minden vizsgált esetben kimutathatóan magasabb reakcióhőmérséklettel rendelkeztek a vele készült minták a másik két portípushoz képest.

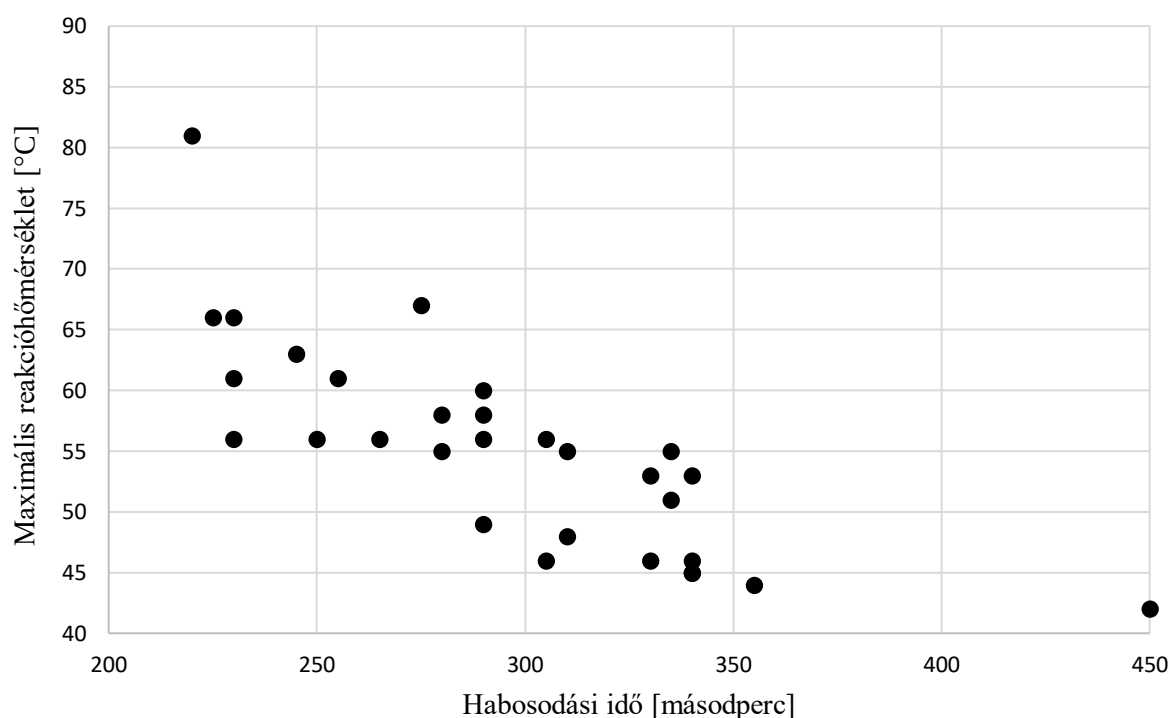
A maximális reakcióhőmérséklet megváltozása gyakorlati szempontból azért is releváns, mivel a PUR-habok képződése során számos fő- és mellékreakció bekövetkezhet, mint azt a szakirodalmi áttekintés során részletesebben bemutattam. Az eltérő reakciókinetikák egyensúlyára, így pedig a kialakult PUR-hab kémiai szerkezetére hatással van a reakcióhőmérsékletnek is [9,15]. Így elképzelhető, hogy a megváltozott reakcióhőmérséklet képes befolyásolni a PUR-habok anyagjellemzőit is. Konkrét vizsgálat nélkül ezt azonban egyelőre nem érdemes kijelenteni: nem ismert, hogy a hőmérsékletváltozások valóban képesek-e mérhető mértékű változást okozni a poliuretán láncok szerkezetében. Azt is érdemes figyelembe venni, hogy esetemben viszonylag rövid időt töltenek csak a habok ezeken a megemelkedett hőmérsékleteken, mielőtt visszahűlnék szobahőmérsékletre. Összességében legalábbis előrejelzi, hogy a jövőben érdemes lehet vizsgálatokat végezni az egyes minták kémiai szerkezetét illetően.



14. ábra: PUR-hab minták habosodási idejének változása a vizsgált faktorok függvényében

A habosodási idők tekintetében is eltért a három vizsgált PUR-hab típus, bár ezen esetben közel sem volt olyan egyértelmű az értékek tagozódása mint a reakcióhőmérséklet esetén. Az egyes FOAMIT típusok habosodási idejei 280, 275 és 220 másodperc voltak. Az eredmények alapján a holdpor-szimuláns töltőanyag hozzáadásával általánosságban megnövekedett a habosodási idő. Azonban ezen a téren is elég nagymértékű variabilitást mutatnak az értékek: láthatóak a diagramon például olyan minták, melyek esetében gyakorlatilag elhanyagolható volt a habosodási idő megnövekedése. Nem meglepő módon minél nagyobb volt az alapmátrix habosodási ideje, annál nagyobb volt az adott minőségű

töltőanyagot tartalmazó PUR-habé is. Azonban ezen esetben a maximális reakcióhőmérséklethez hasonló következtetés nem vonható le egyértelműen. Emellett úgy tűnik, hogy az átlagos szemcseméret csökkenésével az esetek túlnyomó többségében emelkedett a habosodási idő. Végző soron a holdpor-szimulánsok típusának hatását vizsgálva a kilenc kombinációból hét esetében a DUST-Y-al készült minta rendelkezett a legalacsonyabb habosodási idővel, az értékek különbsége pedig a maradék két esetben is igen kicsi volt. Miután az esetek viszonylag nagy többségéről van szó, ezt valószínűleg a holdpor-szimulánsok minőségbeli eltérései okozzák. Tehát a DUST-Y szimulánssal töltött minták rendelkeznek általában a legrövidebb habosodási idővel, bár ez nem minden esetben volt kimutatható, amit az eltérés enyhése és a mérési bizonytalanságok együttese okoz. Az EAC-1A és DNA-1 porok között ismét nem érdemes egyértelmű különbséget tenni ezen a téren.



15. ábra: PUR-hab minták habosodási idő – maximális reakcióhőmérséklet adatpontjai

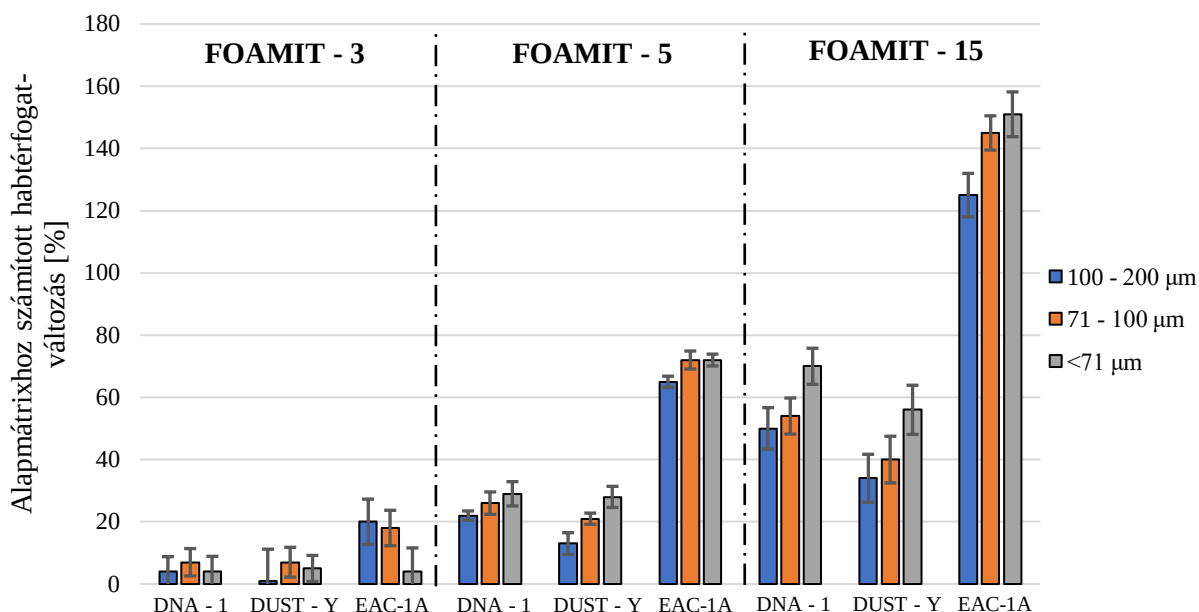
A habosodási idő emelkedése szintén egy rendkívül gyakori eredmény különböző töltőanyagok beépítésével, számos erről beszámoló cikk található [41,43,44,46–50]. Emellett azonban bizonyos töltőanyagok esetén rögzítették a habosodási idő változatlanságát is, tehát ez sem tekinthető példátlan eredménynek [45,51,52]. A szakirodalom szerint a töltőanyag felhasználásával megnövekszik a rendszer viszkozitása (amely esetemben kvalitatív módon valóban érzékelhető volt a homogenizálás során), amely megnehezíti a cellák növekedését. Továbbá a már említett reakciókinetikai változások, a reakciók lassulása és a molekuláris

mobilitás csökkenése is mind a habosodási idő meghosszabodásához járulnak hozzá. Gyakorlati szempontból a habosodási idők minden esetben nagyságrendileg összemérhetőek voltak az alapmátrixszal. Miután nem egy tömeggyártásra szánt anyagról van szó, így a termelékenység ilyen mértékű esetleges csökkenése nem igazán jelent problémát. Az eredmények alapján a vizsgált faktoroktól függetlenül lehetséges a töltött PUR-habok észszerű időkeretek közti előállítása.

Végző soron érdemes megemlíteni, hogy a maximális reakcióhőmérséklet és habosodási idő mint feldolgozási paraméterek nem tekinthetők egymástól teljesen független változóknak. Ahogy a **15. ábra** mutatja, mindenképpen bizonyos mértékű korreláció fedezhető fel az alacsony reakcióhőmérséklet és hosszú habosodási idő között, illetve fordítva is. Ez arra utalhat, hogy alapvetően mindkét érték függ a rendszer reaktivitásától, a reakciókinetikai jellemzőktől. A hab megnövekedett hőmérsékletét az exoterm reakciókból felszabaduló hőmennyiség biztosítja, amelyek emellett a habosodás végbemeneteléért is felelősek.

3.3 Fizikai jellemzők (habtérfogat, látszólagos sűrűség, porozitás)

A holdpor-szimuláns töltőanyagot tartalmazó minták százalékos habtérfogat-változását a megfelelő töltetlen referencia mintához viszonyítva a **16. ábra** mutatja be. Az habtérfogatok összehasonlíthatóságát az biztosítja, hogy a felhasznált polirol / izocianát tömegmennyiség minden esetben megegyezett. A habminták látszólagos sűrűségének és porozitásának alakulását a **17. ábra** és **18. ábra** szemlélteti.



16. ábra: PUR-hab minták alapmátrixhoz viszonyított habtérfogat-változása a vizsgált faktorok függvényében

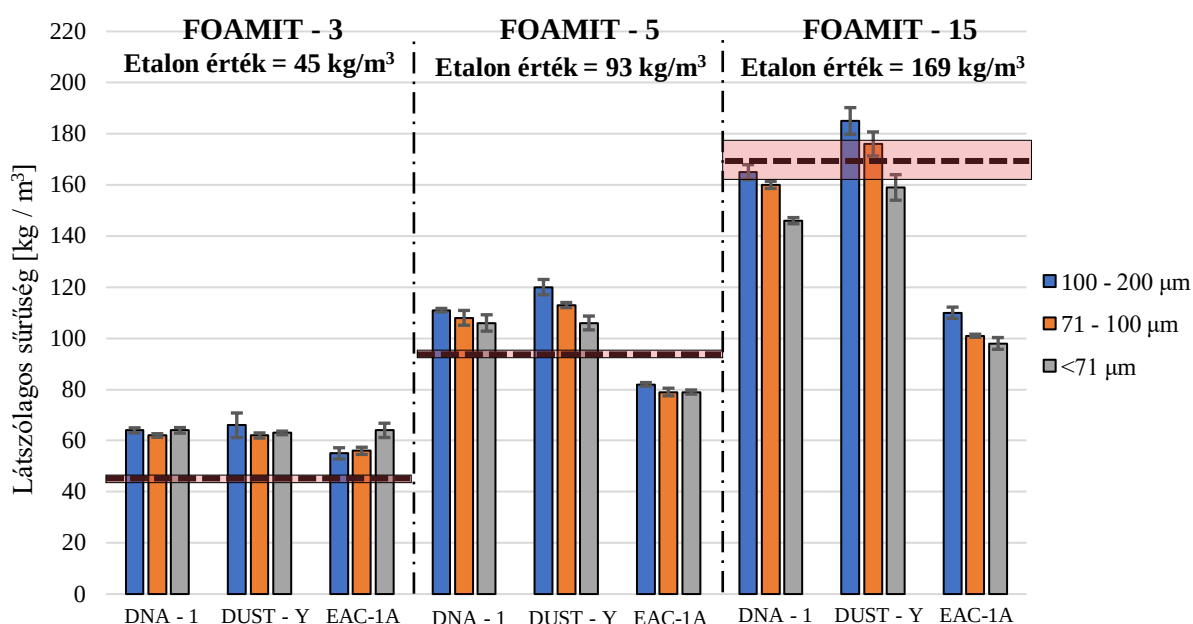
Általánosságban kijelenthető, hogy a habtérfogat alakulására meghatározó hatása volt a vizsgált tényezőknek. Egyes esetekben a holdpor-szimuláns töltőanyag beépítésével gyakorlatilag nem változott a keletkező habminta térfogata, bizonyos receptúrák esetén azonban egészen rendkívüli, akár 100%-ot is meghaladó térfogatnövekedés volt meghatározható az alapmátrixhoz viszonyítva. Ezen eredmények bizonyítják, hogy megfelelő PUR-hab mátrix / holdpor-szimuláns felhasználásával valóban teljesíthető a töltőanyag egyik fő megfogalmazott feladata, vagyis képes jelentős mértékben megnövelni a keletkező hab térfogatát. Ez azért fontos szempont, mivel így egy holdi épülethez felhasználandó, adott térfogatú PUR-hab hőszigetelő-szerkezeti rendszer kevesebb Földről átszállított alapanyaggal is megvalósítható, ami sokkal hatékonyabbá teszi az építkezést. Ennek természetesen feltétele, hogy a holdpor(-szimuláns) töltőanyagot tartalmazó habok tulajdonságai is megfelelőek legyenek a felhasználásukhoz, ideális esetben akár a töltetlen alapmátrixénál is előnyösebbek.

Figyelemre méltó továbbá, hogy a habtérfogat-növekedés mértéke megfelelő esetekben jelentősen nagyobb a holdpor-szimulánsok saját hozzáadott térfogatánál, becsült számításaim szerint akár ötvenszeres is lehet a két érték eltérése. Korábban már kifejtettem, hogy ez a szakirodalomban korábban is ismert jelenség, más szemcsés töltőanyagokat a PUR-habhoz hozzáadva is kimutatták. A jelenleg elfogadott domináns elmélet szerint a szemcsék egyfajta heterogén pórusképződési felületet biztosítanak, amely nagymértékben képes megnövelni a keletkező habtérfogatot és porozitást [41,43,47,58].

A vizsgált tényezők tekintetében mindenképpen jelentős eredmény, hogy az eltérő PUR-hab alaplátrixokat felhasználva milyen nagymértékű eltérések figyelhetők meg a habtérfogat-növekedés alakulásában. FOAMIT - 3 mátrixhoz hozzáadva a holdpor-szimulánsokat egyes esetekben gyakorlatilag változatlan maradt a habtérfogat a referencia mintához viszonyítva, de a legkedvezőbb esetben is csak 20%-os volt a térfogatnövekedés. Ezzel szemben FOAMIT - 15 mátrixba beépítve a töltőanyagot már 34% és 151% közötti habtérfogat növekedések voltak meghatározhatóak. Bár a közvetlen kauzalitás nem bizonyított, feltűnő, hogy azon PUR-hab mátrixok esetén volt nagyobb a térfogatnövekedés, ahol a töltetlen minták habtérfogata kisebb (pontosabban sűrűsége kisebb / porozitása nagyobb) volt. Ezt szemlélteti például a korábbi **6. ábra** is. Ezen területen érdemes részletesebb kutatásokat végezni a jövőben, de a jelenlegi eredményeim alapján felvetem a hipotézist, hogy ugyanazon holdpor-szimulánst kisebb habtérfogattal (nagyobb sűrűséggel / kisebb porozitással) rendelkező PUR-hab mátrixhoz adva nagyobb térfogatnövekedés érhető el a referencia mintához viszonyítva. A korábban leírtak alapján feltételezhető, hogy ahol a PUR-hab alaplátrixban egyébként is nagyobb volt a gáz fázis részaránya, ott kevésbé tudott érvényesülni a töltőanyag gócképző szerepe, ezáltal kisebb térfogatnövekményt eredményezve.

Érdemes figyelembe venni, hogy a felhasznált holdpor-szimuláns típusa is jelentősen befolyásolja a habtérfogat alakulását. Az EAC-1A szimulánssal töltött mintáknál majdnem minden esetben számottevően nagyobb volt a habtérfogat-növekedés mértéke, mint a másik két töltőanyag-típussal. Ez a trend csakis a FOAMIT - 3 / <71 μm összeállítás esetén nem jelenik meg, ezen minta azonban több tekintetben is kiugró jellemzőkkel rendelkezett. FOAMIT - 3 alaplátrixnál DNA-1 és DUST-Y szimuláns esetén is hasonlóan csekély volt a térfogatnövekedés. A másik két PUR-hab mátrix esetén azonban a DUST-Y enyhén, de kimutatható módon kisebb habtérfogat-növekedést okozott a DNA-1 töltőanyaghoz képest. A DNA-1 és DUST- Y szimulánsok hozzáadásával kiváltott habtérfogat-növekedések mértéke között általánosságban kevésbé volt jelentős az eltérés, mint az EAC-1A és DNA-1 / DUST-Y

között. Mindenképpen érdekes eredmény, hogy a meglehetősen hasonló (bár nem teljesen megegyező) kémiai felépítésű holdpor-szimulánsok ilyen eltérő mértékű habtérfogat-növekedéseket eredményeztek a töltetlen esethez viszonyítva. Bár a szakirodalomban általánosan elfogadott a szemcsés töltőanyagok gócképző mechanizmusa, arról gyakorlatilag nincs információ, hogy kémiai-felületi tulajdonságaik miképpen befolyásolják a jelenséget. Tudományos szempontból a jövőben releváns kérdés annak mélyebb megértése, hogy például az EAC-1A mely jellemzője által képes jelentősen nagyobb térfogatnövekményt kiváltani más holdpor-szimulánsokhoz képest.

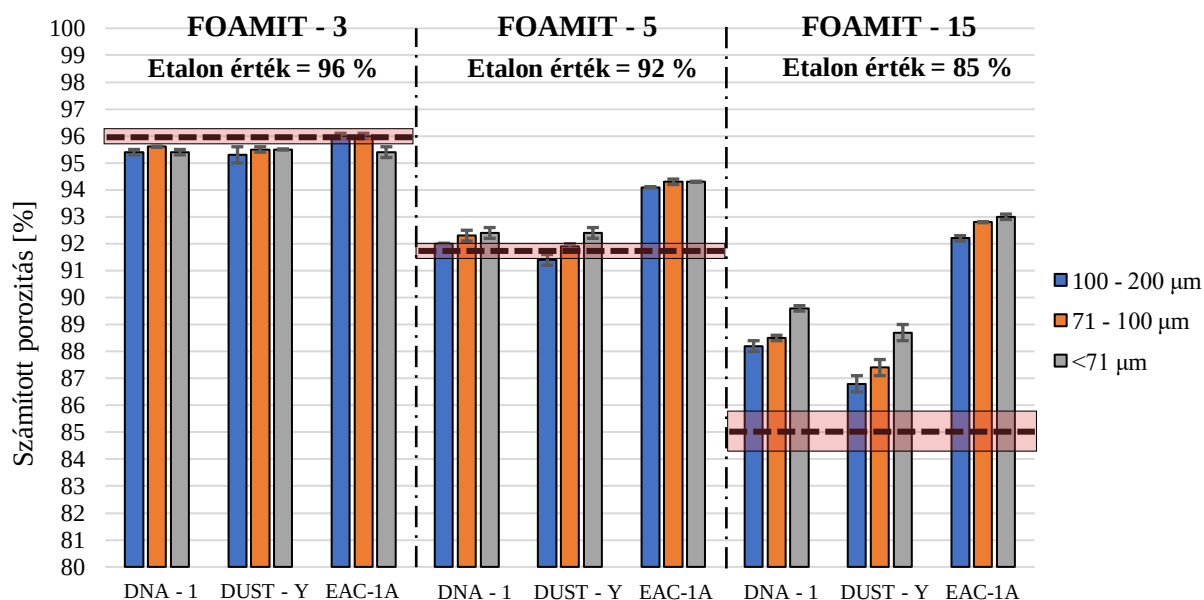


17. ábra: PUR-hab minták látszólagos sűrűségének változása a vizsgált faktorok függvényében

Végezetül a kompozit receptúrák harmadik vizsgált befolyásoló faktora, a holdpor-szimuláns töltőanyagok szemcsemérete is hatással volt a meghatározott habtérfogat-növekedésre. Ez leginkább a FOAMIT - 5 és FOAMIT - 15 alaplátrixok esetén volt egyértelműen kimutatható, ahol finomabb szemcseméretekkkel általánosan nagyobb térfogatnövekmény volt elérhető a töltetlen referenciához viszonyítva. Ez jól összeegyeztethető a töltőanyag gócképző jellegével, amely a habtérfogat-növekedést kiváltó jelenségnek tekinthető. Finomabb szemcséket használva növekszik a töltőanyag fajlagos felülete, így nagyobb heterogén buborékképző felületet biztosítanak, ezáltal a habtérfogat nagyobb mértékű növekedését okozva. Ezzel szemben azonban FOAMIT - 3 alaplátrix esetén a finomabb szemcseméretek felhasználásával gyakorlatilag egyáltalán nem volt kimutatható jótékony hatás

a térfogatnövekedésre. Ez ismét arra engedhet következtetni, hogy a töltetlen állapotban legnagyobb porozitású FOAMIT - 3 mátrix esetén kevésbé tudott érvényesülni a töltőanyag gócképző szerepe.

A szakirodalmi áttekintésem során említettem, hogy adott töltőanyag-koncentráció esetén a látszólagos sűrűség változását az alapmátrixhoz viszonyított habtérfogat-változás határozza meg. Megfelelően nagy mértékű térfogatnövekedés esetén a töltőanyag képes csökkenteni a PUR-hab sűrűségét, ellenkező esetben pedig az érték növekedését okozza. Ezen sémákat remekül szemléltetik a saját mérési eredményeim. Miután a vizsgált tényezők szerint rendkívül eltérő volt a töltetlen referenciához viszonyított habtérfogat-növekedés, a látszólagos sűrűség jelentős növekedése és csökkenése egyaránt kimutatható volt. Például a FOAMIT - 3 / DUST-Y / 100 – 200 μm összeállítás esetén gyakorlatilag megegyezett a habtérfogat a töltetlen mátrixéval, ezáltal a látszólagos sűrűség ~47%-os emelkedést mutatott. Ezzel szemben a FOAMIT - 15 / EAC-1A / <71 μm receptúra esetén hatalmas térfogatnövekedés következett be az alapmátrixhoz képest (~151%). Ennek megfelelően a látszólagos sűrűség ezen esetben ~42%-os csökkenést mutatott. A látszólagos sűrűségek változásai a többi esetben ezen két szélsőséges érték között változnak, az alapmátrixhoz viszonyított habtérfogat-növekedés előbb már kifejtett mértékétől függően.

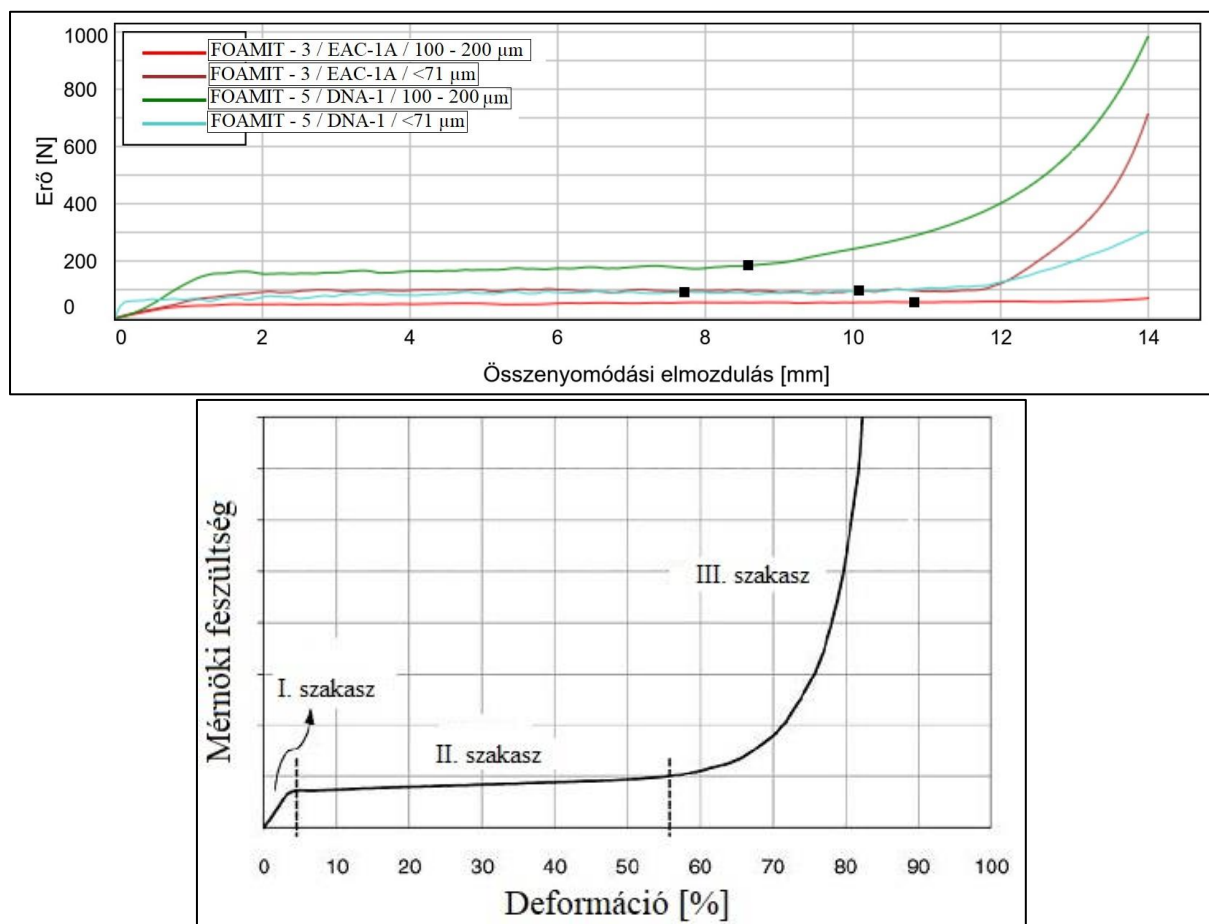


18. ábra: PUR-hab minták számított porozitásának változása a vizsgált faktorok függvényében

A látszólagos sűrűséghez hasonlóan a habminták porozitását is elsődlegesen a referencia mátrixhoz viszonyított térfogatnövekedés határozza meg. Ennek megfelelően a számított porozitás értékek között is megjelent csökkenő, illetve növekvő tendencia is a vizsgált tényezők függvényében. Figyelemre méltó azonban, hogy a porozitás legnagyobb meghatározott csökkenése is 1 százalékpont alatti volt az alaplátrixhoz viszonyítva, tehát gyakorlati szempontból elhanyagolható. Ezen jelenséget elsősorban két faktor okozza: a holdpor-szimulánsok jelentősen nagyobb (valódi / pórusmentes) sűrűsége a poliuretánhoz képest, illetve a töltetlen PUR-habok eleve nagy porozitása. Az előbbi tény következtében bár a hozzáadott töltőanyag ~47%-kal megnövelte az alaplátrix tömegét, a porozitás szempontjából releváns szilárd térfogatot ezen érték kevesebb mint felével emelte csupán. Az utóbbi tényező fontossága könnyen megérthető, ha figyelembe vesszük, hogy a PUR-hab szilárd térfogathányada nem más mint a porozitás értéke kivonva 100%-ból. Például a töltetlen FOAMIT - 3 alaplátrix 96%-os porozitása egy 4%-os szilárd térfogathányadot jelent: így a hozzáadott holdpor-szimuláns valójában ennek a mindössze 4% térfogathányadot kitevő szilárd térfogathányadnak emeli az értéket. Kiszámítható, hogy ezen esetben a szilárd térfogat akár 25%-os növekedése is csupán nagyjából 1 százalékponttal csökkenti a porozitást. A másik oldalról pedig a töltőanyag gócképző szerepe a gáztérfogatot növelve ellensúlyozza ezt a csökkenést, a porozitás növekedéséhez járul hozzá. Ennek megfelelően a porozitás viszonylag jelentős emelkedése meghatározható volt egyes esetekben: legnagyobb mértékben a FOAMIT - 15 / EAC-1A / <71 μm receptúra esetén, ahol az alaplátrix 85%-os porozitása 8 százalékponttal emelkedve 93% lett.

Bár a habtérfogat-növekedés fontosságát korábban már megemlítettem, a PUR-habok látszólagos sűrűségének és porozitásának ismerete is fontos tényező, mivel azok alapvetően meghatározzák az anyag valamennyi fontos tulajdonságát. Az eredmények bizonyítják, hogy a receptúra valamennyi vizsgált faktorának pontos és helyes megválasztása fontos, hogy a kívánt sűrűségű / porozitású PUR-hab építőanyag legyen előállítható.

3.4 Nyomószilárdság

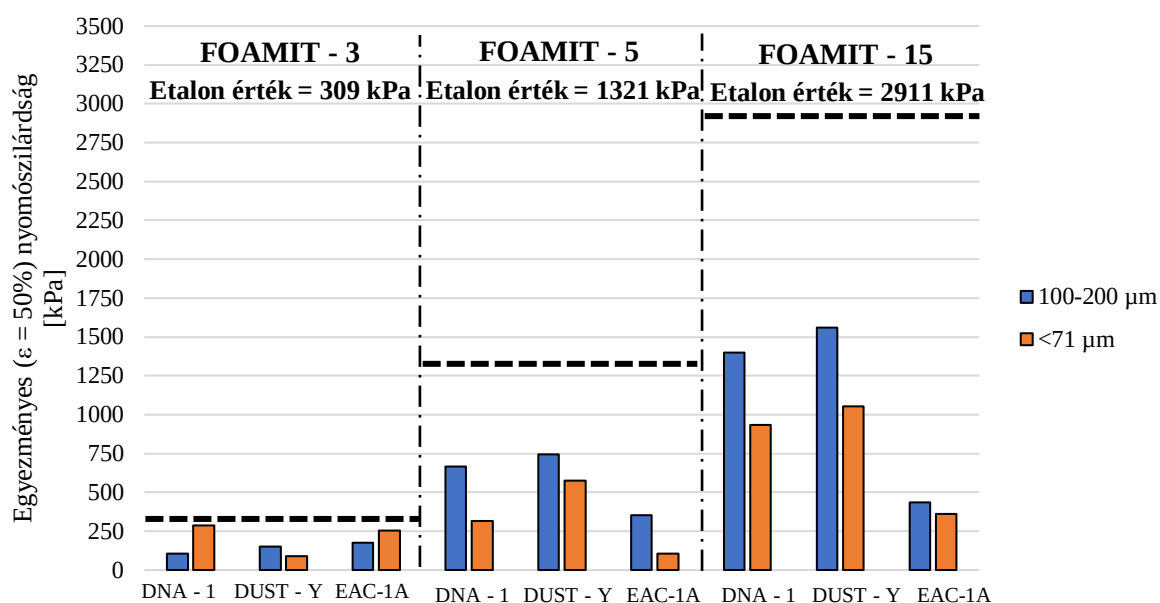


19. ábra: Saját felvett tipikus erő – elmozdulás nyomódiagram (fent) és PUR-habok szakirodalmi nyomódiagramjának (lent [62]) összehasonlítása

Elsősorban érdemes közelebbről megfigyelni a vizsgált minták sajátos erő – összenyomódás diagramjainak jellegét (érdemes megemlíteni, hogy ez alakját tekintve teljesen megegyezik a feszültség – százalékos deformáció diagrammal). A felvett görbék jól megfeleltethetők a PUR-habok szakirodalomban megtalálható tipikus nyomódiagramjaival (19. ábra). A poliuretán habanyagok nyomódiagramjai három általános szakaszra oszthatóak fel: legelőször egy rövid, lineáris szakasz során rugalmasan deformálódik a polimer. A saját munkám során végzett nyomóvizsgálatok ezen ideális linearitástól egyes esetekben mutathatnak eltérést az 1. szakaszban, mivel ebben a tartományban megy végbe a terhelés felvétele is. A 2. szakasz jellegzetessége, hogy közel állandó (vagy legalábbis rendkívül enyhe mértékben növekvő) erőterhelés mellett növekszik az anyag deformációjának mértéke. Ezen folyamat a minták habszerkezetének köszönhető: a 2. szakasz során a gáznemű anyagot tartalmazó cellák összeomlása következik be, a cellafalak plasztikus deformációja által. A közel

állandó erő / feszültség értékkel jellemezhető 2. szakasz után élesen elkezd emelkedni a deformáció további emeléséhez szükséges terhelés, ez a PUR-habok nyomódiagramjának 3. szakasza. Ezen szakasz a cellák gyakorlatilag teljes mértékű megsemmisülését követően indul el, miután a cellafalak érintkezésbe kerülnek egymással [24,62,63]. Általánosságban kijelenthető, hogy a kisebb eltérésektől eltekintve az összes általam vizsgált PUR-hab minta nyomódiagramja (erő / feszültség – deformáció) jól követi az előzőekben ismertetett jelleggörbét.

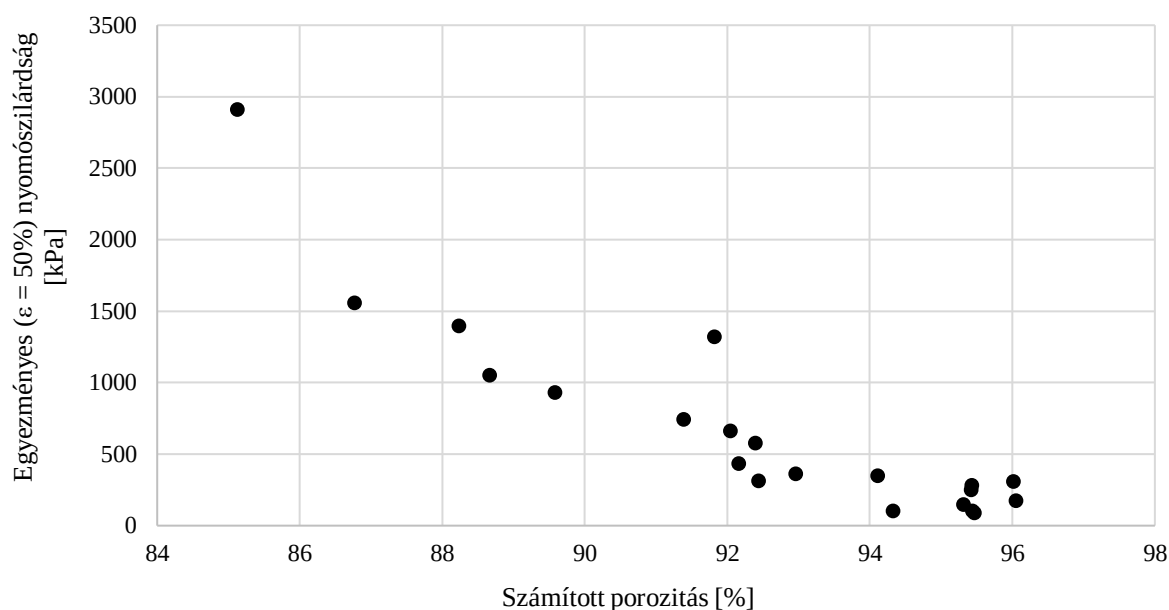
A nyomóvizsgálat eredményeit a **20. ábra** mutatja be, a mérés során felvett erő – elmozdulás diagramokat az **1. melléklet** tartalmazza. Időbeli korlátok következtében ezen dolgozat a 71 – 100 μm szemcsenagyságú töltőanyagot tartalmazó minták nyomószilárdság értékeit nem tartalmazza.



20. ábra: PUR-hab minták egyezményes nyomószilárdságának változása a vizsgált faktorok függvényében

Megfigyelhető a diagramon, hogy a három különböző minőségű töltetlen PUR-hab nyomószilárdság értékeiben rendkívül jelentős, nagyságrendi eltérések vannak jelen. Ezek a különbségek jól összeegyeztethetőek a habminták látszólagos sűrűség és porozitás értékeinek (az előző fejezetben bemutatott) eltéréseivel. A legkisebb sűrűséggel (45 kg/m^3) és legnagyobb porozitással (96%) rendelkező FOAMIT - 3 esetén volt mérhető a legalacsonyabb nyomószilárdság (309 kPa). Ellenben a legnagyobb sűrűségű (169 kg/m^3) és legkisebb porozitású (85%) FOAMIT - 15 nyomószilárdsága ezen értéknek közel tízszerese volt (2911

kPa). A köztes sűrűség (93 kg/m^3) és porozitás (92%) értékekkel rendelkező FOAMIT - 5 nyomószilárdsága is hasonlóképpen a két másik alapmátrix között helyezkedett el (1321 kPa). Az eredmények jól bizonyítják az alapvető szakirodalmi tényállást, miszerint a gázfázis által elfoglalt térfogathányad növelésével egyre kisebb nyomószilárdság értékek érhetőek el PUR-habok esetén [15]. A töltött és töltetlen minták eredményei alapján egyaránt kijelenthető, hogy egy viszonylag erős korreláció mutatkozik a nagyobb porozitás és kisebb nyomószilárdság között (**21. ábra**)



21. ábra: PUR-hab minták összetartozó nyomószilárdság – porozitás értékei

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a receptúra vizsgált tényezőitől függetlenül (alpmátrix minősége, holdpor-szimuláns minősége, holdpor-szimuláns szemcsemérete) a töltőanyag hozzáadásával csökkent a habok nyomószilárdsága. Korábban is kifejtettem már, hogy a PUR-hab kompozitok nyomószilárdságának alakulása egy meglehetősen összetett témakör, amelyet több tényező is befolyásol. Először is mindenképpen figyelembe kell venni a hozzáadott holdpor-szimuláns porozításra gyakorolt hatását: az előző fejezetben meghatározásra került, hogy egyes receptúrák esetén a gáznemű térfogathányad jelentősen emelkedett a töltőanyag beépítésével. Pont ahogy a töltetlen referencia minták esetén, úgy a töltött haboknál is a nyomószilárdság csökkenéséhez járul hozzá a porozitás ezen növekedése. Miután azonban a nyomószilárdság azon esetekben is csökkenő tendenciát mutat, ahol a holdpor-szimuláns hozzáadásával a porozitás állandónak tekinthető vagy akár enyhén csökkent, más faktorok is biztosan hozzájárultak ezen eredményhez. Ide tartozik például, hogy az

anyagok kémiai jellegéből adódóan nem megfelelő erősségű adhézió alakulhatott ki a regolit-polimer határfelületeken, ami a szilárdság csökkenését eredményezi. Továbbá miután meglehetősen nagy volt a felhasznált holdpor-szimuláns koncentrációja (100 poliol tömegszázalék = ~32 össtsömegszázalék), a szemcsék könnyen összeállhattak nemkívánatos agglomerátumokká, amelyek szintén negatívan befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat. Továbbá fontos figyelembe venni, hogy a habok cellaszerkezete is fontos tényező, amely hatással van a nyomószilárdság alakulására. A regolit szimuláns ezen a téren is fejthet ki negatív befolyást: korábbi cikkek beszámolnak róla, hogy a PUR-habhoz adott nagy mennyiségű szemcsés töltőanyag képes gátolni a szabályos zárt cellaszerkezet kialakulását, elősegíti az inhomogén és nyílt cellák létrejöttét [41,44,48,49]. A szakirodalmi áttekintés során hivatkoztam rá, hogy emellett a nyomószilárdság növekedését kiváltó hatások is bekövetkezhetnek a töltőanyag hozzáadásával. Ahogy azonban az eredményeim mutatják, a vizsgált receptúrák szerint elkészített PUR-hab / holdpor-szimuláns kompozitok mind kisebb nyomószilárdsággal rendelkeztek a töltetlen alapmátrixhoz képest, vagyis az előbb felsorolt negatív jelenségek valamely kombinációja volt jelen nagyobb fajsúllyal. Ebben mindenképpen közrejátszhatott a holdpor-szimuláns viszonylag nagy koncentrációja a töltött minták esetén: a jövőben indokoltnak tartom a vizsgálatok elvégzését kisebb mennyiségű töltőanyagot tartalmazó mintákkal is ezen hatás felderítése végett.

Bár a nyomószilárdság romló tendenciája a holdpor-szimuláns hozzáadásának hatására egy általánosan megjelenő hatás, a vizsgált tényezők függvényében láthatóak bizonyos különbségek az egyes PUR-hab minták között. Átlagolva az egyes nyomószilárdság csökkenések értékét, FOAMIT - 5 és FOAMIT - 15 alapmátrixok esetén nem csak abszolút feszültségben, de százalékosan is nagyobb volt a romlás mértéke, mint FOAMIT - 3 esetén. Továbbá a FOAMIT - 5 és FOAMIT - 15 mátrixokkal készült mintáknál minden esetben kimutatható volt, hogy a kisebb (<71 μm) szemcseméretű töltőanyagot, illetve EAC-1A típusú holdpor-szimulánst tartalmazó habok nyomószilárdsága volt a legkisebb. Figyelemre méltó, hogy ezen trendek korrelálnak a habtérfogat növekedésével: amely minták esetén százalékosan jelentősebb volt a térfogatnövekedés az alapmátrixhoz viszonyítva (vagyis erőteljesebben érvényesült a göcképző hatás), ott átlagosan kisebb volt a nyomószilárdság. Emellett a szisztematikus eltérésekben egyrésről közrejátszhat a holdpor-szimulánsok tulajdonságainak enyhe különbségei, miután nem teljes mértékben egyezik az egyes töltőanyagok kémiai felépítése. Másrésről a felhasznált töltőanyag szemcsemérete befolyásolja az agglomerációs

hajlamot és a létrejövő mátrix – szemcse határfelület nagyságát, ezáltal is hatást kifejtve a mechanikai jellemzők változására.

A nyomószilárdság csökkenő jellege a holdpor-szimulánsok beépítésével a PUR-habba mindenképpen negatív eredményként értékelhető a kompozit anyagok gyakorlati felhasználhatóságát illetően. Mint leendő épületszerkezeti-hőszigetelő anyag, a nyomószilárdság minél nagyobb értéken tartása a cél, hogy képes legyen felvenni és tönkremenetel nélkül elviselni a fellépő terheléseket. Érdeemes azonban néhány ténnyt figyelembe venni a nyomószilárdság alakulásának minősítésekor. Ahogy *Chow et al.* cikkükben leírják [2], a holdfelszínen a gravitációs gyorsulás nagyjából egyhatoda a földi értéknek. Ez azért jelentős, mivel egy építőanyag számára az elviselendő nyomóterhelés elsősorban a gravitációs erőhatás következménye: így a szilárdság szempontjából akár egy, a Földön nem megfelelő teljesítményt nyújtó anyag is felhasználható lehet holdi struktúrákban. Másrészt a holdbázisok kivitelezését illetően több, egymástól rendkívül eltérő lehetséges koncepció megtalálható a szakirodalomban [1,3]. Így a jelenlegi körülmények között nehéz megállapítást tenni arra vonatkozóan, hogy egy holdfelszínen létrehozott épületstruktúra esetén mégis milyen mértékűek és prioritásúak a követelmények a mechanikai jellemzők terén.

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatomban keretében holdpor-szimuláns töltőanyagot tartalmazó merev PUR-habokat készítettem eltérő receptúrák alapján, az alapmátrix minőségének (FOAMIT - 3, FOAMIT - 5, FOAMIT - 15), regolit-szimuláns minőségének (DNA-1, DUST-Y, EAC-1A) és töltőanyag szemcseméretének (100-200 μm , 71-100 μm , <71 μm) különböző változatainak kombinációival. A eltérő szemcseméreteket önállóan, szitasorral történő frakcionálás során különítettem el, amely során a holdpor-szimuláns szemcseméret-eloszlását is meghatároztam. Ezen eredmény releváns a jövőben frakcionálatlan regolit-szimuláns töltőanyaggal készítendő minták szempontjából, illetve az egyes szimulánstípusok egymással, és a valódi holdporral való összehasonlítása miatt. A PUR-hab minták esetén vizsgáltam az alapvető habosodási karakterisztikáikat (maximális reakcióhőmérséklet, habosodási idő), habtérfogatukat és fizikai paramétereiket (látszólagos sűrűség, porozitás), valamint egyezményes nyomószilárdságukat. Az elsődleges cél a holdpor-szimuláns hozzáadásával bekövetkező változások meghatározása volt a töltetlen referenciamintákkal való összehasonlítás alapján, illetve a receptúra eltérő paramétereinek befolyásának vizsgálata az eredményekre.

Az elkészített PUR-hab / holdpor-szimuláns kompozitok azon anyagjellemzőket hivatottak reprezentálni, amiket a valódi holdi regolitot töltőanyagként felhasználva is tapasztalnánk. Az előzőekben bemutatott munka gyakorlati alapfeltevése ugyanis, hogy a merev PUR-hab tulajdonságai több szempontból előnyösek holdi épületstruktúrák szerkezeti-hőszigetelő építőanyagaként való felhasználásra. A dolgozat azt vizsgálta, hogy az alapmátrixba holdpor(-szimuláns) beépítésével tovább javítható-e az anyag teljesítménye e szempontból, egyrészt a felhasználás szerint releváns tulajdonságok, illetve a létrehozható habtérfogat terén is. Bár az előbbi jellemzők fontossága nyilvánvaló, az utóbbi is jelentős faktor: miután bármely tömegmennyiség Földről Holdra való átszállítása rendkívül költséges, a cél az épületek minél kisebb tömegű PUR-hab alapanyaggal való kivitelezése. Miután a regolit a Holdon helyileg kinyerhető (ami egyben elsődleges előnye bármely más töltő-/erősítőanyaggal szemben), ha hozzáadásával nő a keletkező habtérfogat, egységnyi térfogatú PUR-hab kevesebb Földről átszállított alapanyaggal előállítható.

Azonban már a jelenlegi kísérleti eredményeim alapján is látszik, hogy nem egyszerű eldönteni azt az alapvető kérdést, a holdpor(-szimuláns) valóban előnyös-e mint PUR-hab töltőanyag épületszerkezeti anyagként való felhasználásra. Ennek oka egyrészt az, hogy a habtérfogat és tulajdonságok változását tekintve ellentétes irányú tendenciák jelenhetnek meg

(tehát például a növekvő habtérfogat csökkenő nyomószilárdsággal jár együtt). Habár a habtérfogat-növekmény valóban továbbra is kevesebb földi alapanyagot feltételez egységnyi PUR-hab létrehozásához, ez immáron nem segíti elő egyértelműen a felhasználhatóságot. Specifikus tervezési / méretezési problémának tekinthető, hogy a holdi épületstruktúra a gyengébb tulajdonságú kompozitokkal is kivitelezhető-e, és ha igen, az mekkora anyag többlettel járna. Egyszerű elméleti szemléltető példa erre, hogy ha a holdi regolittal töltött PUR-hab kevésbé előnyös mechanikai jellemzőkkel rendelkezik, az vastagabb falelemek előállítását teszi-e szükségessé, ezzel növelve a Földről átszállítandó anyagszükségletet, akár ellensúlyozva az elért habtérfogat-növekedés által „megtakarítható” tömegmennyiséget.

Továbbá több szempontból is meghatározó, hogy a mérési eredményekben szisztematikus eltérések voltak láthatóak a receptúrák egyes vizsgált tényezői szerint. Egyrészt igen jelentős, hogy maga a konkrét PUR-hab alapmátrix minősége nem csak az anyagjellemzők változásának mértékét, de akár irányát (például a sűrűség terén) is meghatározza a töltetlen esethez viszonyítva. Ezen eredmény általánosan fontos jelenséget vet fel a PUR-habok kompozitok témakörében. Azt mutatja ugyanis, hogy egy adott kutatás tapasztalatai valójában csakis a konkrét felhasznált alapmátrixra tekinthetőek érvényesnek, eltérő minőségű PUR-habhoz adva ugyanazon erősítőanyagot akár rendkívül eltérő következtetések vonhatóak le. Ezen mátrixspecifikusság még inkább bonyolultabbá teszi egy, adott „ideális” receptúra kijelölését.

Mindenképpen kiemelkedő fontosságú, hogy a holdpor-szimulánsok minőségét illetően is felléptek rendszerszintű eltérések a vizsgálati eredményekben, különösen az EAC-1A típusú töltőanyag esetén. Ez jól mutatja az ehhez hasonló, holdi regolit szimulánsokat felhasználó *ISRU* kutatások korlátait. A tényleges holdpor elérhetetlensége következtében kénytelenek vagyunk szimulánsokra támaszkodni, amelyek nemcsak hogy bizonyos hiányosságokkal képesek reprodukálni annak tulajdonságait, de rengeteg különböző típus is elérhető belőlük. A holdpor-szimulánsok terén megjelenő standardizáció hiánya miatt megkérdőjelezhető, hogy például két különböző típust alkalmazó kutatás eredményei mennyire hasonlíthatók össze egymással. Ez nem egy teljesen új felismerés, található már hasonló gondolatokat megfogalmazó tudományos publikáció [64]. A helyzetet csak még inkább komplikálttá teszi, hogy (ahogy korábban hivatkoztam már rá) a tényleges holdpor is meglehetősen inhomogén, területi és lokális eltérésekkel szemcseméret, és kémiai összetétel terén. Meglátásom szerint bármely holdi regolittal kapcsolatos kutatás egy fontos eleme kell hogy legyen egyfajta minőségbiztosítási rendszer kidolgozása, amely képes garantálni, hogy egy adott kinyert

(tényleges) holdi regolit mennyiséget felhasználva valóban a földi kísérletek során, szimulánsokkal meghatározott eredményeket tapasztaljuk.

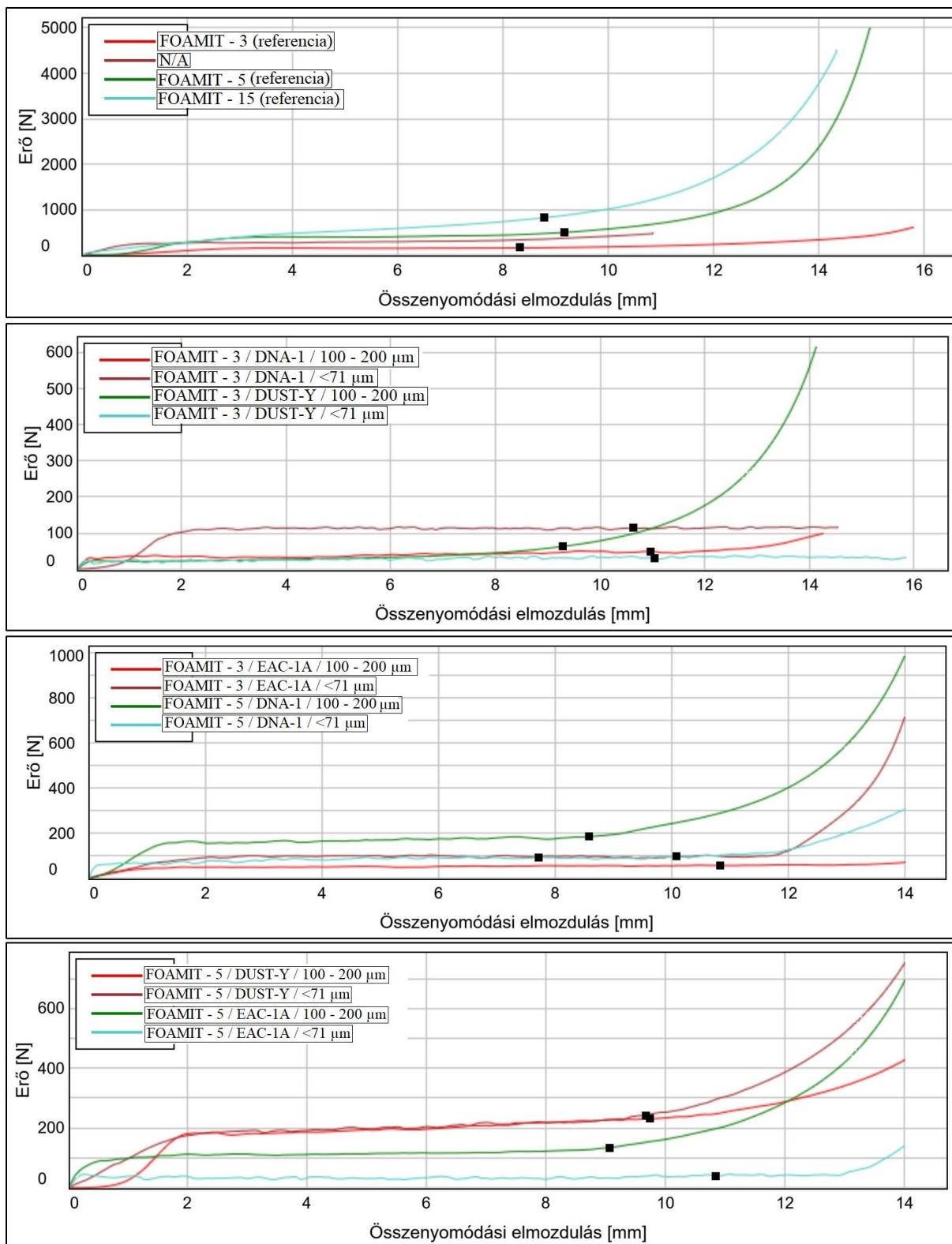
A vizsgált faktorok szempontjából talán a holdpor-szimulánsok szemcsemérete által okozott eltérések okozzák a legkevesebb problémát. A csökkentett gravitációs körülményektől függetlenül a tényleges holdi regolit frakcionálása a gyakorlatban is viszonylag gondtalanul kivitelezhetőnek tűnik. Összefoglalásképpen kijelenthető, hogy az előzőekben megemlített három tényező mindegyike változtatásával rögzíthetőek voltak bizonyos rendszerszintűnek tekinthető eltérések az eredmények terén. Emiatt mindhárman a PUR-hab kompozit receptúra jelentős elemének tekinthetőek, amelyeket fontos megfelelően definiálni és kontrollálni a kívánt tulajdonságok reprodukálása érdekében.

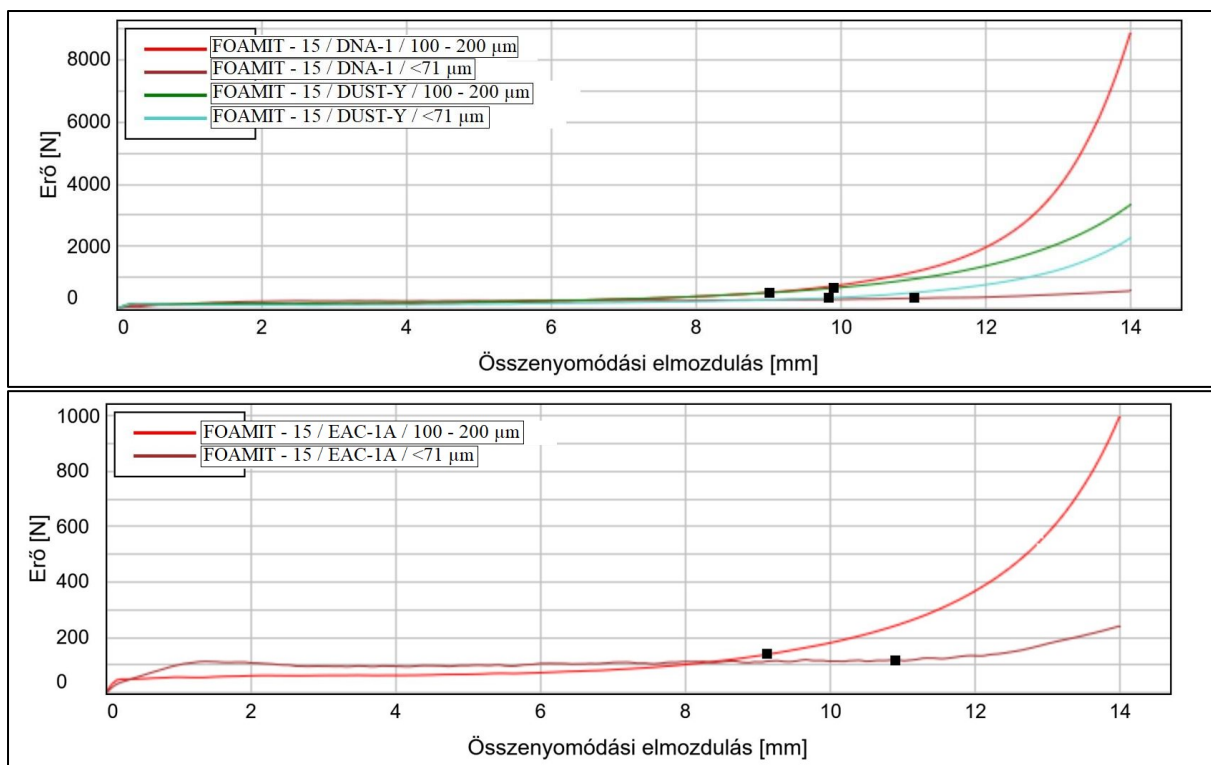
Végezetül muszáj megemlítenem, hogy nekem ezen dolgozat keretében a választott témakörömnek egy igen kis részét volt csak lehetőségem bemutatni. Egyrésztől számos olyan releváns anyagjellemző van, amelyeknek értékeit és változását az előbbieken még nem vizsgáltam, de létfontosságúak a megfelelő és teljeskörű következtetések levonása érdekében. Anyagtudományi szempontból érdemes vizsgálni a habok cellaszerkezetét (mikroszkópia), illetve kémiai szerkezetét (FTIR spektroszkópia). Igen fontos vizsgálni a habok hővezetőképességét, mivel a hőszigeteléshez való hozzájárulás is a megfogalmazott céljaik között található. Vizsgálandó jellemzők még a tűzállóság, termikus stabilitás, termikus tulajdonságok (üvegesedési hőmérséklet, stb...) illetve kiemelkedő fontosságú az extrém holdi környezetet figyelembe vevő öregedésállóság jellemzése (UV, ciklikus termikus terhelés, mikrometeoroidák, stb...). Továbbá a PUR-hab receptúra terén újabb tényezőket is érdemes bevezetni, amelyek függvényében a tulajdonságok meghatározása történik. Az egyik legnyilvánvalóbb ilyen faktor a holdpor töltőanyag koncentrációja, amely minden töltött minta esetén megegyezett ezen dolgozat keretében, illetve egy meglehetősen magas érték volt (~32 tömegszázalék). Különösen fontos előrelépési irány olyan receptúra kifejlesztése, amely az anyagjellemzők (például nyomószilárdság) terén is javulását tud elérni az alpmátrixhoz képest. Mindezen kutatások egyelőre elsősorban anyagtudományi, laboratóriumi körülmények között vizsgálnák a PUR-hab kompozitokat, az egyéb gyakorlati tényezőket (például előállítási technológia) mellőzve. Összegezve a bemutatott témakört túlságosan komplexnek ítélem meg, hogy az eddigi eredmények alapján korrekt végső következtetés legyen levonható. A bemutatott kezdetleges eredmények alapján azonban további kutatásra érdemesnek tartom a témát, a gyakorlati felhasználhatóság terén való potenciálja, illetve a PUR-habok anyagtudományi szempontból való mélyebb megértésének elősegítése következtében is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani a konzulenseimnek, Polyákné Kovács Annamáriának és dr. Tamási Kingának a mérések elvégzésében és a dolgozat elkészítésében nyújtott segítségükért. Továbbá köszönetet nyilvánítok az *Admatis Kft.*-nek és munkatársainak, akik a dolgozat témakörét, a minták elkészítéséhez szükséges alapanyagokat, illetve a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges eszközök egy részét szolgáltatták számomra.

MELLÉKLETEK





1. melléklet: Nyomóvizsgálatok erő – összenyomódás diagramjai

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Ellery A. Leveraging in situ resources for lunar base construction. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2022;49:657–74. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0098>.
- [2] Chow PY, Lin TY. Structural Engineer's Concept of Lunar Structures. *J Aerosp Eng* 1989;2:1–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(1989\)2:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1989)2:1(1)).
- [3] Benaroya H, Bernold L. Engineering of lunar bases. *Acta Astronaut* 2008;62:277–99. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.05.001>.
- [4] Singh H. Rigid Polyurethane Foam: A Versatile Energy Efficient Material. *Key Eng Mater* 2016;678:88–98. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.678.88>.
- [5] Malla RB, Brown KM. Determination of temperature variation on lunar surface and subsurface for habitat analysis and design. *Acta Astronaut* 2015;107:196–207. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.038>.
- [6] Somarathna HMCC, Raman SN, Mohotti D, Mutalib AA, Badri KH. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. *Constr Build Mater* 2018;190:995–1014. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.166>.
- [7] Petrović ZS, Ferguson J. Polyurethane elastomers. *Prog Polym Sci* 1991;16:695–836. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(91\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0079-6700(91)90011-9).
- [8] Wendels S, Avérous L. Biobased polyurethanes for biomedical applications. *Bioact Mater* 2021;6:1083–106. <https://doi.org/10.1016/J.BIOACTMAT.2020.10.002>.
- [9] Furtwengler P, Avérous L. Renewable polyols for advanced polyurethane foams from diverse biomass resources. *Polym Chem* 2018;9:4258–87. <https://doi.org/10.1039/C8PY00827B>.
- [10] Akindoyo JO, Beg MDH, Ghazali S, Islam MR, Jeyaratnam N, Yuvaraj AR. Polyurethane types, synthesis and applications – a review. *RSC Adv* 2016;6:114453–82. <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>.
- [11] Das A, Mahanwar P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 2020;3:93–101. <https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2020.07.002>.
- [12] Suleman S, Khan SM, Gull N, Aleem W, Shafiq M, Jamil T. A Comprehensive Short Review on Polyurethane Foam. *International Journal of Innovation and Scientific Research* 2014;12:165–9.
- [13] Singh I, Samal SK, Mohanty S, Nayak SK. Recent Advancement in Plant Oil Derived Polyol-Based Polyurethane Foam for Future Perspective: A Review. *European Journal of Lipid Science and Technology* 2020;122:1900225. <https://doi.org/10.1002/EJLT.201900225>.
- [14] Gama N V., Ferreira A, Barros-Timmons A. Polyurethane foams: Past, present, and future. *Materials* 2018;11:1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>.
- [15] Szycher M. Szycher's Handbook of Polyurethanes. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2012. <https://doi.org/10.1201/b12343>.
- [16] Cavaco LI. Polyurethane : Properties, Structure and Applications. Nova Science Publishers; 2012.
- [17] Christenson EM, Anderson JM, Hiltner A. Biodegradation mechanisms of polyurethane elastomers. *Corrosion Engineering Science and Technology* 2007;42:312–23. <https://doi.org/10.1179/174327807X238909>.
- [18] Kim SH, Kim BK, Lim H. Effect of isocyanate index on the properties of rigid polyurethane foams blown by HFC 365mfc. *Macromolecular Research* 2008 16:5 2008;16:467–72. <https://doi.org/10.1007/BF03218546>.
- [19] Hejna A, Haponiuk J, Piszczczyk Ł, Klein M, Formela K. Performance properties of rigid polyurethane-polyisocyanurate/brewers' spent grain foamed composites as function of isocyanate index. *E-Polymers* 2017;17:427–37. https://doi.org/10.1515/EPOLY-2017-0012/ASSET/GRAPHIC/J_EPOLY-2017-0012_FIG_008.JPG.
- [20] Park DH, Park GP, Kim SH, Kim WN. Effects of isocyanate index and environmentally-friendly blowing agents on the morphological, mechanical, and thermal insulating properties of polyisocyanurate-polyurethane foams. *Macromol Res* 2013;21:852–9. <https://doi.org/10.1007/S13233-013-1106-6>.
- [21] Placido E, Arduini-Schuster MC, Kuhn J. Thermal properties predictive model for insulating foams. *Infrared Phys Technol* 2005;46:219–31. <https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2004.04.001>.
- [22] Kim C, Youn JR. Environmentally friendly processing of polyurethane foam for thermal insulation. *Polymer - Plastics Technology and Engineering* 2000;39:163–85. <https://doi.org/10.1081/PPT-100100022>.
- [23] Yang C, Fischer L, Maranda S, Worlitschek J. Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: A state-of-the-art review and future research pathways. *Energy Build* 2015;87:25–36. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.10.075>.
- [24] Goods SH, Neuschwanger CL, Henderson CC, Skala DM. Mechanical properties of CRETE, a polyurethane foam. *J Appl Polym Sci* 1998;68:1045–55. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19980516\)68:7<1045::AID-APP2>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19980516)68:7<1045::AID-APP2>3.0.CO;2-F).
- [25] Curtin MM, Tyler FS, Wilkinson DL. Polymer Foam Cell Growth in Microgravity. *Journal of Cellular Plastics* 1992;28:536–56. <https://doi.org/10.1177/0021955X9202800602>.
- [26] Johnson SW, Chua KM. Properties and Mechanics of the Lunar Regolith. *Appl Mech Rev* 1993;46:285–300. <https://doi.org/10.1115/1.3120358>.
- [27] Langevin Y, Arnold JR. The Evolution of the Lunar Regolith. *Annu Rev Earth Planet Sci* 1977;5:449–89. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.05.050177.002313>.
- [28] Rasera JN, Cilliers JJ, Lamamy JA, Hadler K. The beneficiation of lunar regolith for space resource utilisation: A review. *Planet Space Sci* 2020;186:104879. <https://doi.org/10.1016/J.PSS.2020.104879>.

- [29] Papike JJ, Simon SB, Laul JC. The lunar regolith: Chemistry, mineralogy, and petrology. *Reviews of Geophysics* 1982;20:761–826. <https://doi.org/10.1029/RG020i004P00761>.
- [30] McKay DS, Heiken G, Basu A, Blanford G, Simon S, Reedy R, et al. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. 1st ed. Cambridge University Press; 1991.
- [31] Taylor SR. *Lunar Science: a Post-Apollo View*. Pergamon Press; 1975.
- [32] Turkevich AL. Average chemical composition of the lunar surface. *The Moon* 1973;8:365–7. <https://doi.org/10.1007/BF00581730>.
- [33] *Geology of the Moon* - Wikipedia n.d. https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_the_Moon (accessed October 3, 2022).
- [34] Engelschiön VS, Eriksson SR, Cowley A, Fateri M, Meurisse A, Kueppers U, et al. EAC-1A: A novel large-volume lunar regolith simulant. *Scientific Reports* 2020 10:1 2020;10:1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62312-4>.
- [35] Cesaretti G, Dini E, De Kestelier X, Colla V, Pambaguian L. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronaut* 2014;93:430–50. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.
- [36] Exolith Lab - Regolith Simulants n.d. <https://exolithsimulants.com/> (accessed November 2, 2022).
- [37] In-Situ Resource Utilization (ISRU) n.d. <http://www.nasa.gov/isru> (accessed October 3, 2022).
- [38] Han W, Ding L, Cai L, Zhu J, Luo H, Tang T. Sintering of HUST-1 lunar regolith simulant. *Constr Build Mater* 2022;324:126655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126655>.
- [39] Gosau JM. Regolith stabilization and building materials for the lunar surface. *Earth and Space 2012 - Proceedings of the 13th ASCE Aerospace Division Conference and the 5th NASA/ASCE Workshop on Granular Materials in Space Exploration* 2012:243–9. <https://doi.org/10.1061/9780784412190.028>.
- [40] Dikshit R, Gupta N, Dey A, Viswanathan K, Kumar A. Microbial induced calcite precipitation can consolidate martian and lunar regolith simulants. *PLoS One* 2022;17:e0266415. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266415>.
- [41] Qi X, Zhang Y, Chang C, Luo X, Li Y. Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Rigid Crude Glycerol-Based Polyurethane Foams Reinforced With Nanoclay and Microcrystalline Cellulose. *European Journal of Lipid Science and Technology* 2018;120:1700413. <https://doi.org/10.1002/EJLT.201700413>.
- [42] Liang K, Shi SQ. Nanoclay filled soy-based polyurethane foam. *J Appl Polym Sci* 2011;119:1857–63. <https://doi.org/10.1002/APP.32901>.
- [43] Strakowska A, Członka S, Strzelec K. POSS compounds as modifiers for rigid polyurethane foams (Composites). *Polymers (Basel)* 2019;11. <https://doi.org/10.3390/polym11071092>.
- [44] Członka S, Strakowska A, Kairytė A. Effect of walnut shells and silanized walnut shells on the mechanical and thermal properties of rigid polyurethane foams. *Polym Test* 2020;87:106534. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106534>.
- [45] Kurańska M, Barczewski M, Uram K, Lewandowski K, Prociak A, Michałowski S. Basalt waste management in the production of highly effective porous polyurethane composites for thermal insulating applications. *Polym Test* 2019;76:90–100. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.008>.
- [46] Kim SH, Lee MC, Kim HD, Park HC, Jeong HM, Yoon KS, et al. Nanoclay reinforced rigid polyurethane foams. *J Appl Polym Sci* 2010;117:1992–7. <https://doi.org/10.1002/APP.32116>.
- [47] Sienkiewicz N, Członka S, Kairytė A, Vaitkus S. Curcumin as a natural compound in the synthesis of rigid polyurethane foams with enhanced mechanical, antibacterial and anti-ageing properties. *Polym Test* 2019;79:106046. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106046>.
- [48] Członka S, Bertino MF, Strzelec K, Strakowska A, Masłowski M. Rigid polyurethane foams reinforced with solid waste generated in leather industry. *Polym Test* 2018;69:225–37. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.013>.
- [49] Członka S, Strakowska A, Strzelec K, Kairytė A, Vaitkus S. Composites of rigid polyurethane foams and silica powder filler enhanced with ionic liquid. *Polym Test* 2019;75:12–25. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.021>.
- [50] Chuayjuljit S, Maungchareon A, Saravari O. Preparation and properties of palm oil-based rigid polyurethane nanocomposite foams. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2010;29:218–25. <https://doi.org/10.1177/0731684408096949>.
- [51] Paciorek-Sadowska J, Czupryński B, Borowicz M, Liszkowska J. Rigid polyurethane–polyisocyanurate foams modified with grain fraction of fly ashes. *Journal of Cellular Plastics* 2020;56:53–72. https://doi.org/10.1177/0021955X19864391/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0021955X19864391-FIG2.JPEG.
- [52] Zhou X, Sain MM, Oksman K. Semi-rigid biopolyurethane foams based on palm-oil polyol and reinforced with cellulose nanocrystals. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2016;83:56–62. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.008>.
- [53] Walkiewicz J; , Derkowski A, Mirski R, Dukarska D, Walkiewicz J, Derkowski A, et al. Properties of Rigid Polyurethane Foam Filled with Sawdust from Primary Wood Processing. *Materials* 2022;15:5361. <https://doi.org/10.3390/MA15155361>.
- [54] Leszczyńska M, Malewska E, Ryszkowska J, Kurańska M, Gloc M, Leszczyński MK, et al. Vegetable fillers and rapeseed oil-based polyol as natural raw materials for the production of rigid polyurethane foams. *Materials* 2021;14:1772. <https://doi.org/10.3390/MA14071772/S1>.
- [55] Mirski R, Dukarska D, Walkiewicz J, Derkowski A. Waste Wood Particles from Primary Wood Processing as a Filler of Insulation PUR Foams. *Materials* 2021;14:4781. <https://doi.org/10.3390/MA14174781>.
- [56] Kurańska M, Prociak A, Cabulis U, Kirpluks M, Ryszkowska J, Auguścik M. Innovative porous polyurethane-polyisocyanurate foams based on rapeseed oil and modified with expandable graphite. *Ind Crops Prod* 2017;95:316–23. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.039>.
- [57] Paciorek-Sadowska J, Borowicz M, Isbrandt M, Czupryński B, Apiecione L. The Use of Waste from the Production of Rapeseed Oil for Obtaining of New Polyurethane Composites. *Polymers (Basel)* 2019;11:1431. <https://doi.org/10.3390/POLYM11091431>.

- [58] Ribeiro Da Silva V, Mosiewicki MA, Yoshida MI, Coelho Da Silva M, Stefani PM, Marcovich NE. Polyurethane foams based on modified tung oil and reinforced with rice husk ash II: Mechanical characterization. *Polym Test* 2013;32:665–72. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2013.03.010>.
- [59] Thirumal M, Khastgir D, Singha NK, Manjunath BS, Naik YP. Mechanical, morphological and thermal properties of rigid polyurethane foam: Effect of the fillers. *Cellular Polymers* 2007;26:245–59. <https://doi.org/10.1177/026248930702600402>.
- [60] Kairytė A, Członka S, Boris R, Vėjelis S. Evaluation of the Performance of Bio-Based Rigid Polyurethane Foam with High Amounts of Sunflower Press Cake Particles. *Materials* 2021;14:5475. <https://doi.org/10.3390/MA14195475>.
- [61] Marzulli V, Cafaro F. Geotechnical Properties of Uncompacted DNA-1A Lunar Simulant. *J Aerosp Eng* 2018;32:04018153. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000983](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000983).
- [62] Vladimír G. Testing and application of new phenomenological material model for foam materials. *Elektrotechnika* 2010:1–11.
- [63] Goga V, Hučko B. Phenomenological Material Model of Foam Solids. *Journal of Mechanical Engineering* 2016;65:5–20. <https://doi.org/10.1515/SCJME-2016-0001>.
- [64] Taylor LA, Liu Y. Important considerations for lunar soil simulants. *Proceedings of the 12th International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments - Earth and Space 2010* 2010:106–18. [https://doi.org/10.1061/41096\(366\)14](https://doi.org/10.1061/41096(366)14).