

Lignitpernye-alapú geopolimer habok mechanikai tulajdonságainak szabályozása az alapanyag őrlésével

NÉMETH Noémi

A Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karának harmadéves, nyersanyag-előkészítés specializáción tanuló BSc hallgatója. A 36. OTDK Műszaki Tudományi Szekció - Környezetmérnöki Tudomány 3. Tagozat - első helyezettje. Pályamunkájának címe: Hulladékok alapú szilárósított geopolimer kompozitok eljárás-technikai vizsgálata.

SZABÓ Roland

A Miskolci Egyetem Nyersanyag-előkészítés és Környezettudományi Karának doktori iskolájának munkatársa, okl. előkészítéstechnikai mérnök. PhD fokozatát 2020-ban szerezte a Miskolci Egyetemen. Fő kutatási területe: szilárdalapú ipari hulladékok hasznosítási lehetőségeinek vizsgálata geopolimerek előállítására, különös tekintettel a habszerkezetű termékek fejlesztésére.

DEBRECZENI Ákos

A Miskolci Egyetem Bányászati és Geotechnikai Intézeti Tanszék vezetője (2010-), egyetemi docens, okleveles bányamérnök. Fő szakmai kompetenciái: bányászat, bányagépészet, geotechnika, közetmechanika. 2012-től az MTA Bányászati Tudományos Bizottság, Bányászati, Geotechnikai és Nyersanyag-előkészítési Albizottság elnöke.

MUCSI Gábor

20 éve foglalkozik a környezetipari, fenntarthatóság kérdéseivel kapcsolódó oktatási, valamint kutatás-fejlesztési és innovációs feladatokkal. Kutatási területe a szilárd hulladékok előkészítése és hasznosítása, az ipari hulladékok (salakok, pernyék, építési hulladék) mechanikai aktiválása reaktivitásuk szabályozása érdekében, geopolimerek fejlesztése, hulladékok szingergikus hasznosítása. 2020-tól a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karának dékánja. Szilikátipari Tudományos Egyesület Cement Szakosztályának elnöke.

NÉMETH Noémi • Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyag-előkészítés és Környezettudományi Intézet • neno20010702@gmail.com

SZABÓ ROLAND • Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyag-előkészítés és Környezettudományi Intézet • roland.szabo@uni-miskolc.hu

DEBRECZENI Ákos • Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Bányászat és Energia Intézet • akos.debreczeni@uni-miskolc.hu

MUCSI GÁBOR • Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyag-előkészítés és Környezettudományi Intézet • gabor.mucsi@uni-miskolc.hu

Érkezett: 2024. 07. 02. • Received: 02. 07. 2024. • <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2024.12>

Abstract

The present study investigates the mechanical properties (compressive and flexural strength), density, and porosity of environmental-friendly, porous geopolimer composites or geopolimer foams. Geopolimer foams can be obtained by several different foaming methods, the most common being direct foaming. During the process of direct foaming a so-called foaming/blowing agent is introduced to the geopolimer slurry which creates gas bubbles, and pores. The properties of geopolimer foams generally depend on their pore structure, which is defined by several factors - grinding fineness, L/S ratio, and foaming agent. To optimise these factors the authors of this paper carried out a systematic experiment on geopolimer foam specimens made of lignite fly ash (milled for 15, 30, and 60 minutes in a laboratory ball mill) and metakaolin, with H₂O₂ as a chemical foaming agent. The most homogeneous pore structure could be achieved with 2 wt.% H₂O₂ and 15 minutes of mechanical activation. Even though the 60-minute milling time caused large, inhomogeneous pores it resulted in the maximum compressive (12,90 MPa) and flexural strength (4,88 MPa), and the lowest porosity value (26,2 v/v%).

Keywords: Lignite fly ash, mechanical activation, geopolimer foam, compressive strength, flexural strength, density, porosity

Kulcsszavak: Lignitpernye, mechanikai aktiválás, geopolimer hab, nyomószilárdság, hajlítószilárdság, testsűrűség, porozitás

1. Bevezetés

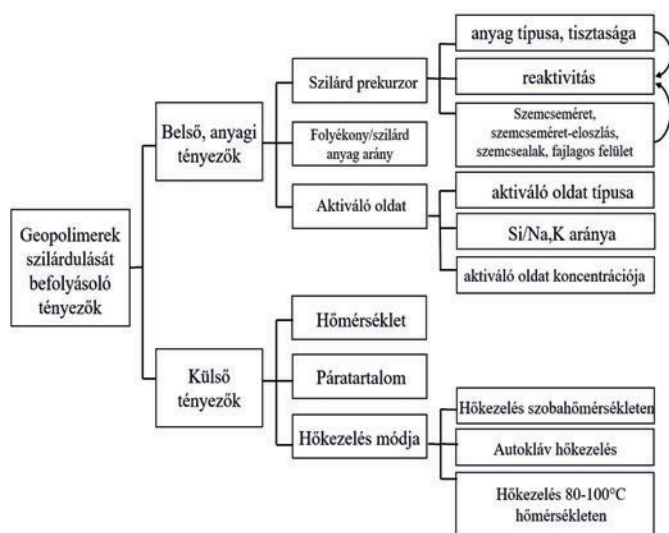
A beton előállításához elengedhetetlen cement gyártásának világszintű CO₂-kibocsátása 2021-ben 2,9 milliárd tonna volt – ez a teljes globális CO₂ emisszió körülbelül 7%-át jelentette. A cement iránti folyton növekvő kereslet kielégítése, ugyanakkor a cementipar jelentős karbonlábnyomának csökkentése az eddigi tendenciák szerint nem tűnik effektíven összeegyeztethetőnek. Az Európai Unió a European Green Deal-ben („Európai Zöld Megállapodás”) megfogalmazta klímasemlegességi irányelveit és célkitűzéseit, a European Climate Law („Európai Klímarendelet”) pedig jogi szintre emelte ezeket. Ennek értelmében az EU és tagállamai kötelezettséget vállaltak az üvegházhatású gázok kibocsátásának legalább 50%-kal történő csökkentésére 2030-ig (1990-es értékekhez képest), illetve a nulla nettó kibocsátás („net zero emission”) elérésére 2050-ig [1, 2, 3].

A cementgyártás során kibocsátott CO₂ 50-60%-a a mészkő kalcinálása, a klinker előállítása során, 30-40% a kalcináláshoz, termikus reakciókhoz szükséges hőenergia előállítása során, 10%-a pedig az villamosenergia felhasználása, valamint a cement szállítása során keletkezik [2, 3]. Ebből az következik, hogy a CO₂ emisszió effektív redukálása egyrészt a cementben található klinker egy részének például kohósalakkal, pernyével, természetes puccolánnal történő helyettesítésével (CEM II,

CEM III), a gyártási folyamathoz szükséges magas hőmérséklet (1200-1450 °C) csökkentésével, a hőenergia-veszteség minimalizálásával és a hulladék-hő visszanyerésével (waste heat recovery), a hőenergia környezetbarát/megújuló energiahordozókból történő előállításával, a szén-dioxid leválasztás-, hasznosítás-, és tárolás (Carbon capture, utilization and stabilization) technológia alkalmazásával, illetve alacsony karbonkibocsátású alternatív cementek/kötőanyagok széleskörű elterjedésével lehetséges, amelyek életciklusuk során több szén-dioxidot kötnek meg, mint amennyi előállításuk során keletkezik [2].

A geopolimerek szervesen polimer-szerkezetű alternatív, környezetbarát kötőanyagok, amelyek szilárd-aluminoszilikátok lúgos (ritkábban savas) közegben végbemenő reakciója, az ún. geopolimer szintézis során keletkeznek alacsony hőmérsékleten (30-100 °C) [4, 5, 6]. A geopolimerek előállításához alkalmazható szilárd, magas alumínium-, és szilíciumtartalmú prekursorok többek között a kaolin, metakaolin, zeolitok, szilikapor, erőműi pernye, vörösiszap, kohósalak, rizshéj hamu, betontörmelék, bányászati meddő és téglatörmelék [4, 5, 6, 7]. A felsorolt alapanyagok túlnyomó része olyan nagy mennyiségben keletkező ipari hulladék, amelyek biztonságos tárolása komoly költségekkel és környezeti kockázatokkal jár. A leggyakrabban alkalmazott lúgos kémhatású aktiváló oldatok a NaOH, Na₂SiO₃, KOH, K₂SiO₃ [8], a ritkábban használt savas kémhatású aktiváló oldatok a H₃PO₄, AlPO₄, illetve a természe-

tes eredetű humin sav [4]. A geopolimerek rendkívül gyorsan kötnek, a bekeveréstől számított 4 órát követően képesek végleges szilárdságuk 70%-át elérni [8]. A geopolimerek ezen kívül kiváló termikus stabilitással rendelkeznek, térfogati- és lineáris zsugorodásuk kisebb, mint a portlandcement esetén; hő- és tűzállóak, valamint a kémia korrózióval szemben is ellenállónak bizonyultak [8, 9]. A geopolimerek nyomó-, valamint hajlítószilárdsága képes felvenni a versenyt a hagyományos cementek szilárdságával, amennyiben optimalizáljuk az anyagi-, és külső környezeti paramétereket, amelyeket az 1. ábra szemléltet [9]. Ezen tulajdonságoknak köszönhetően a geopolimerek ígéretesek lehetnek az építőiparban (cementek, út- és járdarétegek, falazó- és szigetelő téglák, különleges hő- és tűzálló bevonatok, burkolatok), és a környezetvédelemben (nehézfémekkel szennyezett vizek szűrése, adszorbensek) [4, 7].



1. ábra A geopolimereket szilárdságát befolyásoló külső és belső, anyagi tényezők [9]
Fig 1. Internal and external factors of the hardening properties of geopolymers [9]

A geopolimerekből a legkülönbözőbb fizikai és kémiai habképző eljárásokkal állíthatunk elő porózus, habszerkezetű geopolimer kompozitokat. A leggyakrabban alkalmazott habosítási módszerek a közvetlen, vagy direkt habosítás („direct foaming”), a replikációs módszer („replica method”), az ideiglenes töltőanyag módszer („sacrificial filler method”), és az additív gyártási technológia („additive manufacturing”) [10, 11, 12]. A felsorolt eljárások között a legelterjedtebb a közvetlen habosítás, mely lényege, hogy a folyékony, homogén geopolimer zagyba az ún. habképző reagensek bomlásával gázt (például H_2 , O_2) juttatunk. Az így keletkező nedves hab megszilárdul; a folyamat végterméke a porózus szerkezetű, szilárd geopolimer hab [12]. A habképző reagensek lehetnek különböző fémporok (például: alumínium-, cink por [12, 13]), fémötvözetek (például: szilícium-karbid, ferroszilícium [12]), továbbá lehet nátrium-hipoklorit ($NaOCl$), nátrium-perborát és hidrogén-peroxid (H_2O_2) [12, 13]. Az egyes habképző reagensek eltérő reakciói, eltérő méretű, alakú pórusokat, pórusszerkezetet eredményeznek, amely meghatározza a geopolimer hab tulajdonságait (szilárdság, sűrűség, porozitás) [14]. Számos kutatás rámutatott, hogy a hidrogén-peroxid például inhomogén, gyakran nyílt pórusszerkezetet eredményez, mert bomlása lúgos környezetben instabil, és a keletkező gázbuborékok

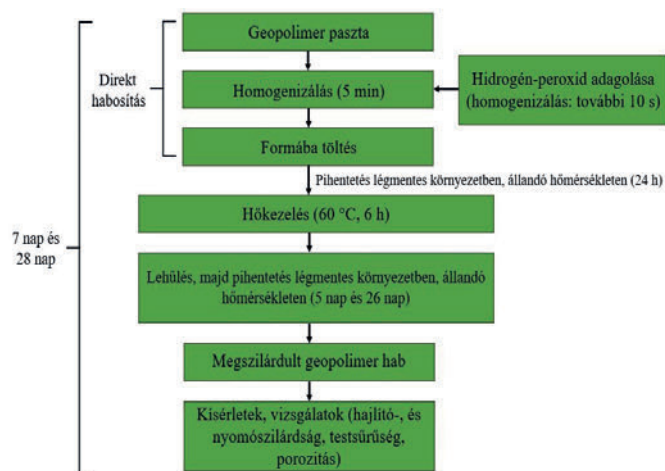
mérete a koaleszcencia következtében megnő [11, 12, 14, 15]. Ez a jelenség a megnöveli a geopolimer habok porozitását, ám sűrűségét csökkenti, és ezáltal rontja mechanikai tulajdonságait [16]. A geopolimer hab pórusszerkezetét meghatározza továbbá a geopolimer paszta reológiája és viszkozitása, amelyeket legfőképpen a folyékony/szilárd anyag arány (L/S arány) és az aluminoszilikát prekursor őrlési finomsága befolyásol [13, 17].

Jelen kutatás célja a közvetlen habosítással előállított, lignit-pernye-alapú habszerkezetű geopolimerek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata, valamint optimalizálása a pernye őrlési finomságának és a habosítószer (H_2O_2) adagolásának változtatásával. A kutatás kezdeti-, előkísérleti fázisában elvégeztünk egy kétlépcsős kísérletsorozatot, amelyben az előbb felsorolt két paraméter geopolimer paszta, és hab tulajdonságaira – bedolgozhatóság, folyási tulajdonság, kötési idő, pórusméret, pórusszerkezet – gyakorolt hatásait vizsgáltuk hengeres próbatesteken. Elsőként az őrlési finomság, majd a H_2O_2 mennyisége által előidézett változásokra fókuszáltunk. Ezután az előkísérletek tapasztalatai alapján megválasztott keverési paraméterekkel elkészített szabványos méretű ($160 \times 40 \times 40$ mm) próbatestek hajlító-, és nyomószilárdságát, testsűrűségét, illetve porozitását vizsgáltuk.

2. Anyagok és módszerek

A geopolimer próbatestek előállításához metakaolint (MK), valamint a MVM Mátra Energia Zrt.-nél keletkező lignit pernyét alkalmaztunk. A nyers pernye fő oxidos komponenseinek tömegszázalékos mennyiségei a következők voltak: SiO_2 (47,90%), Al_2O_3 (16,53%), Fe_2O_3 (11,15%), CaO (11,41%), MgO (2,87%), S (3,38%). A pernye izzítási vesztesége 3,66% volt. A pernyét 15, 30, illetve 60 perces mechanikai aktiválásnak vetettük alá laboratóriumi golyósmalomban ($\varnothing 305 \times 305$ mm).

A szilárd anyag 85 m/m%-ban tartalmazta a különböző pernye-őrleményeket és 15 m/m%-ban a metakaolint. Aktiváló oldatként 8 M $NaOH$ -ot és Geosil 14517 típusú vízüveget alkalmaztunk 1:1 arányban. A geopolimerek habosításához 30 %-os H_2O_2 -ot használtunk. A geopolimer hab próbatestek tulajdonságait (nyomó- és hajlítószilárdság, testsűrűség, porozitás) 7, illetve 28 napos korban vizsgáltuk. A 2. ábra az elkészítés folyamatát mutatja be. Minden összetétel esetén 3 próbatest készült.



2. ábra A geopolimer hab próbatestek előállításának folyamata
Fig. 2 Preparation process of geopolymer foam specimens

3. Eredmények

3.1 Pernye mechanikai aktiválása

A nyers pernye, a pernye őrlményeinek és a metakaolin szemcseméret-eloszlásának meghatározására Horiba LA-950V2 típusú lézeres szemcseméret-elemzőt alkalmaztunk. A minták nevezetes szemcseméreteit (x_{10} , x_{50} , x_{80}), valamint fajlagos felületüket az 1. táblázat tartalmazza.

	Fajlagos felület (cm ² /cm ³)	x_{10} (μm)	x_{50} (μm)	x_{80} (μm)
Nyers pernye	1249,7	20,02	96,43	173,85
15 min	2523,5	9,73	47,69	94,97
30 min	5201,3	5,40	17,04	36,04
60 min	10833,0	3,40	14,56	30,69
MK	39051,0	0,33	6,09	8,73

1. táblázat Az alapanyagok fajlagos felülete és nevezetes szemcseméreteik
Table 1. Specific surface area and characteristic particle size values of the raw materials

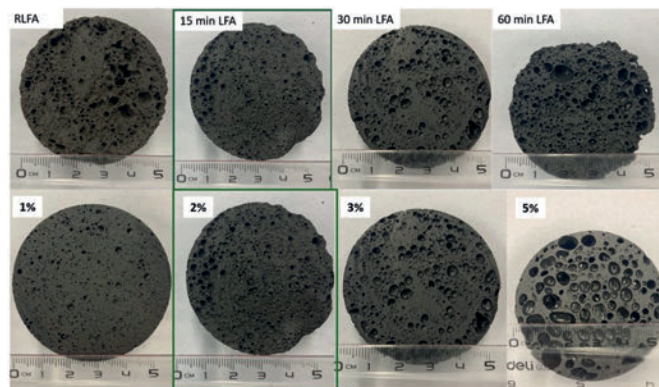
Az őrlési idő növelésével jelentősen lecsökkent az őrlmények szemcsemérete, és növekedett az őrlmények fajlagos felülete. Már 15 perc őrlést követően a felére csökkent a pernye medián szemcsemérete (x_{50}) – 96,43 μm-ről 47,69 μm-re. 30 perc őrlés után már nem történt jelentős szemcseméret-csökkenés, azonban a 60 percig őrlött pernye fajlagos felülete (10833,0 cm²/cm³) a 30 perces őrlmény kétszerese (5201,3 cm²/cm³) volt. Ez a jelenség a szubmikronos mérettartományú finomszemcsék megjelenésével és megnövekedett mennyiségével magyarázható.

3.2 Előkísérletek eredményei

Az előkísérletek első fázisában a pernye őrlési finomságának hatását vizsgáltuk L/S=0,74 arány (42,5% aktiváló oldat/57,5% szilárd anyag) mellett 3 m/m%-os H₂O₂ [13] habosítószer adagolásával. A geopolimer pasztákat minden esetben megfelelően be lehetett keverni ám a 30, illetve 60 perces pernyeőrlményekből előállított paszták bedolgozhatósága csökkent, ugyanis a kötés már a formába töltés során megkezdődött. Ebből adódóan a teljesen megszilárdult próbatestek egy részén az anyag rétegződését figyeltük meg. A 30 és 60 perces őrlményekből készült keverékek rendkívül hevesen reagáltak a H₂O₂-dal. A habosodás azonnal, még a H₂O₂ bekeverése (amely mindössze 10 másodperc volt) közben megkezdődött, erős gázfejlődés kíséretében, és a formába töltés során teljesen végbement – ez gyártástechnológiai szempontból rendkívül előnytelen. Ezt a jelenséget a nyers pernye, valamint a 15 perces őrlmény használata során nem tapasztaltuk, itt a habosodás ideálisan, a formába töltés után kezdődött meg és ment végbe. Az intenzív habosodás oka feltételezhetően a pernye összetételével és az őrlés hatására megnövekedett fajlagos felülettel hozható kapcsolatba, azonban ennek megállapítására mélyrehatóbb vizsgálatok szükségesek. A 30 és 60 perces őrlményt tartalmazó próbatestek pórusainak mérete rendkívül széles tartományban változott, a mikro-, és makropórusok egyaránt jellemezték a hab pórusszerkezetét. A leghomogénebb pórusszerkezetet a 15 perces pernyeőrlményből készült próbatestek esetén tapasztaltuk (3. ábra).

A második előkísérlet során a H₂O₂ pórusszerkezetre gyako-

rolt hatását vizsgáltuk a habosítószer 1, 2, 3, illetve 5 m/m%-ban való adagolása mellett. A H₂O₂ mennyisége a keletkező pórusok méretével és a pórusszerkezet inhomogenitásával egyenes arányosságot mutatott. A vizsgált koncentrációk közül a 2 m/m%-os H₂O₂ tartalmat találtuk optimálisnak, mind a pórusméretet, mind a pórusszerkezet homogenitását figyelembe véve (3. ábra), továbbá az első kísérletben 3m/m% mellett megfigyelt heves gázfejlődés is mérséklődött.

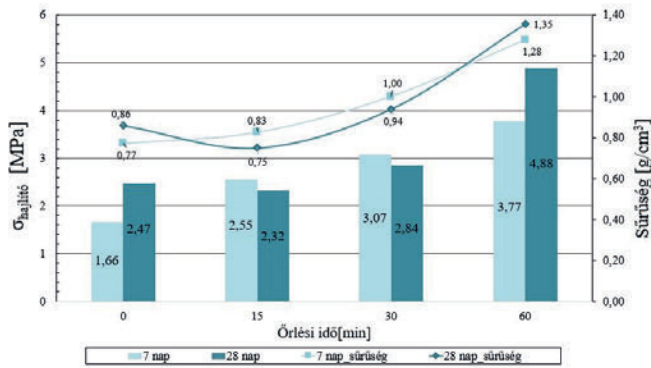


3. ábra Az őrlési finomság (felső sor) és a H₂O₂ adagolásának (alsó sor) hatása
Fig. 3 The effect of grinding fineness (upper row) and the addition of H₂O₂ (lower row)

3.3 Hajlítószilárdság vizsgálat eredményei

A geopolimer hab próbatestek hajlítószilárdság-testűrűség diagramját a 4. ábra mutatja be. Az ábra alapján megállapítható, hogy a mechanikai aktiválás által jelentősen megnövelt őrlési finomság és fajlagos felület a próbatestek hajlítószilárdságára kedvezően hatottak. A 60 percig őrlött pernyéből készült próbatestek hajlítószilárdsága 7 napos korban 127%-kal (3,77 MPa), míg 28 napos korban 98%-kal (4,88 MPa) nagyobb értéket mutatott, mint a nyers pernyéből készült próbatesteké (1,66 és 2,47 MPa 7 és 28 napos korban).

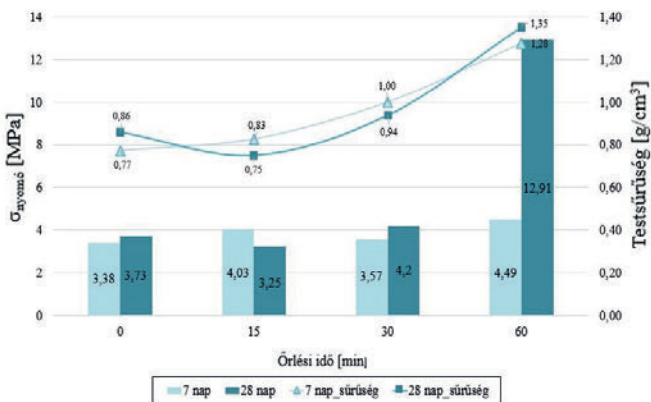
A nagyobb őrlési finomság alapvetően tömörebb geopolimer szerkezetet, mátrixot eredményezett, így a nagyméretű pórusok és az inhomogén pórusszerkezet ellenére is nagyobb sűrűségű próbatestek készültek a finomabb szemcsézetű pernyeőrlményekből. Szabó és mtsai. szerint [13] ez azzal magyarázható, hogy a pernye őrlési finomságának növelése csökkenti a geopolimer paszta viszkozitását, és egy adott L/S aránynál (0,82) és fajlagos felületérték (3000 cm²/g) fölött a paszta reológiát vált (Bingham-plasztikusból Newtoni folyási viselkedésűvé változik), amelynek eredményeként a habosodást okozó gázok könnyen eltávoznak a pasztából, tömörebb geopolimer habot eredményezve. Hasonló jelenség figyelhető meg a 4. ábrán is, melynél az látszik, hogy kezdetben az őrlési finomság növelése segítette a paszta habosodását (melyet a csökkenő sűrűség is alátámaszt). Ugyanakkor, 30 és 60 perces őrlmény használata során feltételezhetően a paszta megváltozott (Newtoni) folyási viselkedésének köszönhetően a sűrűség növekedése tapasztalható, amelynek eredményeként a hajlítószilárdság értéke is nőtt.



4. ábra A geopolimer hab próbatetek hajlítószilárdság és testsűrűség értékei
Fig. 4 The flexural strength and density values of geopolymer foam specimens

3.4 Nyomószilárdság vizsgálat eredményei

A hajlítószilárdság vizsgálat során kettétört próbatesteken elvégzett nyomószilárdság vizsgálat eredményeit, illetve a geopolimer habok testsűrűségét az 5. ábra mutatja be. A nyomószilárdság eredmények is igazolják, hogy a nagyobb sűrűségű próbatetek mechanikai tulajdonságai jobbnak bizonyultak, mint a kisebb sűrűségű próbatesteké. A pernye mechanikai aktiválásának eredményeként a 60 perces örlemény használata kiugró nyomószilárdsághoz (12,91 MPa) vezetett 28 napos korban, amely még a 30 perces örleményből készült geopolimer hab szilárdságához képest is 207%-os növekedést mutat.



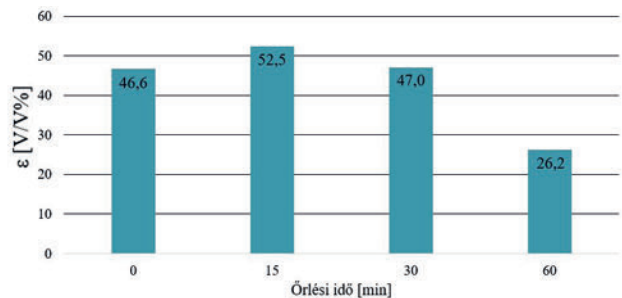
5. ábra A geopolimer hab próbatetek nyomószilárdság és testsűrűség értékei
Fig. 5 The compressive strength and density values of geopolymer foam specimens

3.5 Porozitás

A porozitás vizsgálat eredményei jól követik a próbatetek testsűrűség-változását. A 6. ábrán látható, hogy az optimálisnak ítélt 15 perces örleményből készült próbatetek porozitása mutatta a legnagyobb értéket (52,5 V/V%), míg a legjobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkező, 60 perces örleményből készült próbatetek porozitása 26,2 V/V%. Ez is alátámasztja Szabó és mtsai [13] azon megállapítását, miszerint egy adott L/S aránynál a pernye finomsága jelentős hatással van a geopolimer paszta habosodására, ezáltal a geopolimer porózus szerkezetének kialakulására, mivel a mechanikailag aktivált pernyéből – a megváltozott folyási viselkedés következtében – tömörebb, mikropórusoktól mentes geopolimer mátrixot lehet előállítani. Ugyanakkor a kisméretű pórusok egyesülve

nagyobb méretű pórusokat hoznak létre, amelyek főként a habosított geopolimer felső részén koncentrálódnak inhomogén pórusszerkezetet eredményezve.

A geopolimer hab próbatetek porozitás értékeit a 6. ábra mutatja be.



6. ábra Próbatetek porozitásának változása az örlési finomság növelésével
Fig. 6 Porosity of geopolymer foam specimens with increasing grinding fineness

4. Konklúzió

A lignitpernye mechanikai aktiválásával nagymértékben csökkenthető annak szemcsemérete és jelentősen növelhető fajlagos felülete. A mechanikai aktiválás eredményeként megnövekszik a pernye reaktivitása, ami a geopolimer szintézis szempontjából előnyös, hiszen az előállított geopolimer mátrixa tömörebb és kevesebb mikropórust tartalmaz. Ugyanakkor a habosított geopolimer előállításánál a habosító/habképző reagens – H_2O_2 – adagolása során ez a nagyfokú reaktivitás nem bizonyult előnyösnek, mivel a 30 és 60 percig örlött pernyéből készült habokban keletkező gázbuborékok koaleszcenciáját eredményezte, amely a megszilárdult habokban nagyméretű, inhomogén pórusokat eredményezett. A leghomogénebb pórusszerkezet a 15 perces pernyeörleményből készült próbateteknek volt, az optimalizált 2 m/m%-os H_2O_2 tartalom mellett.

A geopolimer habok mechanikai tulajdonságai (hajlító-, és nyomószilárdság) az örlési finomsággal és a testsűrűséggel egyenes arányosságban, míg a porozitással fordított arányosságban állnak. A legnagyobb hajlító-, és nyomószilárdság értékeket (4,88 MPa és 12,91 MPa), valamint a legkisebb porozitást (16,2 V/V%) a 60 perces örleményből előállított próbatetek mutatták.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatómunka a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválósági Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] United Nations Environment Programme (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi
- [2] Supriya, R. Chaudhury, U. Sharma, P.C. Thapliyal, L.P. Singh, (2023) Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector, Journal of Cleaner Production, Vol. 417, 137466, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137466>.
- [3] Marmier, A.(2023) Decarbonisation options for the cement industry, EUR 31378 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-61599-6, <https://doi.org/10.2760/174037>.

- [4] Krishna, R. S., Mishra, J., Zribi, M., Adeniyi, F., Saha, S., Baklouti, S., Gökçe, H. S. (2021). A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology. *Materialia*, 20, 101212, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101212>.
- [5] Matsimbe, J.; Dinka, M.; Olukanni, D.; Musonda, I. (2022). Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies. *Materials* 2022, 15, 6852, <https://doi.org/10.3390/ma15196852>.
- [6] Shehata, N., Ali, E. T. S., Abdelkareem, M. A. (2020). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*. Vol. 762, March 2021, 143166, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>.
- [7] Cong, P., Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. Vol. 8, June 2021, pp. 283-314, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>.
- [8] Burduhos Nergis, D. D., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., Tahir, M. F. M. (2018). Geopolymers and Their Uses: Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 374, 012019, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/374/1/012019>.
- [9] Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G., Zheng, Y. (2021). Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 307, July 2021, 127085, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127085>.
- [10] Zhang, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Jia, D., Li, H., Colombo, P. (2021). Porous geopolymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 150, November 2021, 106629, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106629>.
- [11] Li, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Yang, K., Colombo, P. (2022) Preparation, properties and applications of fly ash-based porous geopolymers: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 359, July 2022, 132043, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132043>.
- [12] Bai, C., Colombo, P. (2018) Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. *Ceramics International*, Vol. 44, pp. 16103-16118, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.219>.
- [13] Szabó, R., Gombkötő, I., Svěda, M., Mucsi, G. (2017). Effect of Grinding Fineness of Fly Ash on the Properties of Geopolymer Foam. *Archives of Metallurgy and Materials*. Vol. 62(2), pp. 1257-1261, <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0188>.
- [14] V. Ducman, L. Korat. (2016) Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents. *Materials Characterization*. Vol. 113, pp. 207-213, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.01.019>.
- [15] Boros, A., Korim, T. (2022) Development of Geopolymer Foams for Multifunctional Applications. *Crystals*. Vol. 12, No. 3, March 2022, 386, <https://doi.org/10.3390/cryst12030386>.
- [16] Rizal, F., Pratama, A. P., Khamistan, Fauzi, A., Syarwan, Azka, A. (2020). Effect of H₂O₂ as the Foaming Agent on the Geopolymer Mortar using Curing of Room Temperature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 854, 012022, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/854/1/012022>.
- [17] Szabó, R., Mucsi, G. (2015). Generally About Geopolymer Foams. <https://doi.org/10.26649/mucsi.2015.014>.

Ref:

Németh, Noémi – Szabó, Roland – Debreczeni, Ákos – Mucsi, Gábor: *Lignitpernye-alapú geopolimer habok mechanikai tulajdonságainak szabályozása az alapanyag őrlésével*
Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 76, No. 3 (2024), 108–112 p.
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2024.12>



**The XIXth Conference of the European Ceramic Society
will take place from August 31 to September 4, 2025
at the International Congress Center in Dresden, Germany.**

We are looking forward to seeing you in Dresden.

www.ecers2025.org