

építőanyag

A Szilikátipari Tudományos Egyesület lapja

Journal of Silicate Based and Composite Materials

A TARTALOMBÓL:

- Rheological investigation of SBR/CW/CB tricomposite used to create a sustainable procedure for idler rollers production
- The effect of mechanical activation on the compressive strength of landfilled fly ash geopolymers
- Rheological properties of blended metakaolin self-compacting concrete containing recycled CRT funnel glass aggregate
- Rheological characterization of the curing process for a water-based epoxy added with polythiol crosslinking agent
- Student hostel for Turkish students
- Two approaches to the modelling of chip formation: rheological models and finite element analysis

2019/5



TARTALOM

- 144** Feszítőgörgők fenntartható előállítására szolgáló SBR/CW/CB háromkomponensű rendszer reológiai vizsgálata

Mohammed H. AL-MAAMORI ■ Abbass A. HASHIM
■ Ali I. AL-MOSAWI ■ Shaymaa Abbas ABDULSADA
■ MAROSSY Kálmán

- 148** Mechanikai aktiválás hatása deponált pernye alapú geopolimerek nyomószilárdságára

AMBRUS Mária

- 154** Újrahasznosított CRT tölszerűveg adalékanyag és metakaolin kiegészítő anyag tartalmú öntőmördő beton reológiai tulajdonságai

Younes OULDKHAOUA ■ Benchaa BENABED ■
Rajab ABOUSNINA ■ El-Hadj KADRI

- 162** Politiol térhálósító szert tartalmazó vízbázisú epoxi utókezelési folyamatának reológiai jellemzése

Maria Myrelle S. QUIAMBAO ■ Danilo D. LAPLANA
■ Miguel Ibarra D. ABOBO ■ Angelica G. JANCON
■ Sonia D. SALVADOR ■ Henry C. SIY ■ David P. PENALOZA Jr.

- 168** Kollégium török diákok számára

MIKLÓS Gábor

- 173** Két eljárás a forgácsképződés modellezésére: reológiai modellek és véges elemes analízis

Jüri OLT ■ Olga LIIVAPUU

CONTENT

- 144** Rheological investigation of SBR/CW/CB tricomposite used to create a sustainable procedure for idler rollers production

Mohammed H. AL-MAAMORI ■ Abbass A. HASHIM
■ Ali I. AL-MOSAWI ■ Shaymaa Abbas ABDULSADA
■ Kálmán MAROSSY

- 148** The effect of mechanical activation on the compressive strength of landfilled fly ash geopolymers

AMBRUS Mária

- 154** Rheological properties of blended metakaolin self-compacting concrete containing recycled CRT funnel glass aggregate

Younes OULDKHAOUA ■ Benchaa BENABED ■
Rajab ABOUSNINA ■ El-Hadj KADRI

- 162** Rheological characterization of the curing process for a water-based epoxy added with polythiol crosslinking agent

Maria Myrelle S. QUIAMBAO ■ Danilo D. LAPLANA
■ Miguel Ibarra D. ABOBO ■ Angelica G. JANCON
■ Sonia D. SALVADOR ■ Henry C. SIY ■ David P. PENALOZA Jr.

- 168** Student hostel for Turkish students

Gábor MIKLÓS

- 173** Two approaches to the modelling of chip formation: rheological models and finite element analysis

Jüri OLT ■ Olga LIIVAPUU

A finomkerámia-, üveg-, cement-, mész-, beton-, téglá- és cserép-, kő- és kavics-, tűzállóanyag-, szigetelőanyag-iparágak szakmai lapja
Scientific journal of ceramics, glass, cement, concrete, clay products, stone and gravel, insulating and fireproof materials and composites

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG • EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. GÖMZE A. László – elnök/president
GYURKÓ Zoltán – főszerkesztő/editor-in-chief
Dr. habil. BOROSNYÓI Adorján – vezető szerkesztő/
senior editor
WOJNÁROVITSNÉ Dr. HRAPKA Ilona – örökös
tisztelteteli felelős szerkesztő/honorary editor-in-chief
TÓTH-ASZTALOS Réka – tervezőszerkesztő/design editor

TAGOK • MEMBERS

Prof. Dr. Parvin ALIZADEH, Dr. BENCHAA BENABED,
BOCSKAY Balázs, Prof. Dr. CSÓKE Barnabás,
Prof. Dr. Emad M. M. EWAIS, Prof. Dr. Katherine T. FABER,
Prof. Dr. Saverio FIORE, Prof. Dr. David HUI,
Prof. Dr. GÁLOS Miklós, Dr. Viktor GRIBNIAK,
Prof. Dr. Kozo ISHIZAKI, Dr. JÓZSA Zsuzsanna,
KÁRPÁTI László, Dr. KOCSEHER István,
Dr. KOVÁCS Kristóf, Prof. Dr. Sergey N. KULKOV,
Dr. habil. LUBLÓY Éva, MATTYASOVSKY ZSOLNAY
Eszter, Dr. MUCSI Gábor, Dr. Salem G. NEHME,
Dr. PÁLVÖLGYI Tamás, Dr. RÉVAY Miklós,
Prof. Dr. Tomasz SADOWSKI, Prof. Dr. Tohru SEKINO,
Prof. Dr. David S. SMITH, Prof. Dr. Bojja SREEDHAR,
Prof. Dr. SZÉPVÖLGYI János, Prof. Dr. SZÚCS István,
Prof. Dr. Yasunori TAGA, Dr. Zhifang ZHANG

TANÁCSADÓ TESTÜLET • ADVISORY BOARD

FINTA Ferenc, KISS Róbert, Dr. MIZSER János

A folyóiratot referálja • The journal is referred by:



A folyóiratban lektorált cikkek jelennek meg.
All published papers are peer-reviewed.
Kiadó • Publisher: Szilikátipari Tudományos Egyesület (SZTE)
Elnök • President: ASZTALOS István
1034 Budapest, Bécsi út 122-124.
Tel.: +36-1/201-9360 • E-mail: epitoanyag@szte.org.hu
Tördelő szerkesztő • Layout editor: NÉMETH Hajnalka
Címlapfotó • Cover photo: GYURKÓ Zoltán

HIRDETÉSI ÁRAK 2019 • ADVERTISING RATES 2019:

B2 borító színes • cover colour	76 000 Ft	304 EUR
B3 borító színes • cover colour	70 000 Ft	280 EUR
B4 borító színes • cover colour	85 000 Ft	340 EUR
1/1 oldal színes • page colour	64 000 Ft	256 EUR
1/1 oldal fekete-fehér • page b&w	32 000 Ft	128 EUR
1/2 oldal színes • page colour	32 000 Ft	128 EUR
1/2 oldal fekete-fehér • page b&w	16 000 Ft	64 EUR
1/4 oldal színes • page colour	16 000 Ft	64 EUR
1/4 oldal fekete-fehér • page b&w	8 000 Ft	32 EUR

Az árak az áfát nem tartalmazzák. • Without VAT.

A hirdetés megrendelő letölthető a folyóirat honlapjáról.
Order-form for advertisement is available on the website of the journal.

WWW.EPITOANYAG.ORG.HU
EN.EPITOANYAG.ORG.HU

Online ISSN: 2064-4477
Print ISSN: 0013-970x
INDEX: 2 52 50 • 71 (2019) 143-178



AZ SZTE TÁMOGATÓ TAGVÁLLALATAI SUPPORTING COMPANIES OF SZTE

3B Hungária Kft. • Akadémiai Kiadó Zrt. • ANZO Kft.
Baranya-Tégla Kft. • Berényi Téglaiipari Kft.
Beton Technológia Centrum Kft. • Budai Tégla Zrt.
Budapest Kerámia Kft. • CERLUX Kft.
COLAS-ÉSZAKKŐ Bányászati Kft. • Daniella Ipari Park Kft.
Electro-Coord Magyarország Nonprofit Kft.
Fátyolüveg Gyártó és Kereskedelmi Kft.
Fehérvári Téglaiipari Kft.
Geoterm Kutatási és Vállalkozási Kft.
Guardian Orosháza Kft. • Interkerám Kft.
KK Kavics Beton Kft. • KÖKA Kő- és Kavicsbányászati Kft.
KTI Nonprofit Kft. • Kvarc Ásvány Bányászati Ipari Kft.
Libaltec Kft. • Lighttech Lámpatechnológiai Kft.
Maltha Hungary Kft. • Messer Hungarogáz Kft.
MFL Hungária Ipari és Termelési Kft.
MINERALHOLDING Kft. • MOTIM Kádkő Kft.
MTA Természettudományi Kutatóközpont
O-I Hungary Kft. • Pápateszéri Téglaiipari Kft.
Perlit-92 Kft. • Q & L Tervező és Tanácsadó Kft.
QM System Kft. • Rákossy Glass Kft.
RATH Hungária Tűzálló Kft. • Rockwool Hungary Kft.
Speciálbau Kft. • SZIKKTI Labor Kft.
Taurus Techno Kft. • Tungsram Operations Kft.
Witeg-Kőpor Kft. • Zalakerámia Zrt.

Mechanikai aktiválás hatása deponált pernye alapú geopolimerek nyomószilárdságára

AMBRUS MÁRIA • Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet
• maria.ambrus@uni-miskolc.hu

Érkezett: 2019. 07. 30. • Received: 30. 07. 2019. • <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.26>

Kivonat

Az elsődleges nyersanyagforrások növekvő felhasználása és folyamatos csökkenése miatt a pernye napjaink egyik meghatározó nyersanyagává vált többek között cement- és betonipari, mezőgazdasági stb. felhasználásra. A pernye geopolimer alapanyagként való felhasználása már évtizedek óta foglalkoztatja a kutatókat. Jó reakcióképessége és a termékek kiváló mechanikai tulajdonságai mellett alkalmazása környezeti szempontból is előnyös. Kísérleteim során tatabányai, deponált barnaszén pernye őrlésének hatását vizsgáltam az ezekből készült geopolimerek nyomószilárdságára. A pernye főbb tulajdonságainak meghatározása után 5, 10, 20, 30, 60 és 120 perces őrleményeket készítettem, melyekből geopolimer próbatesteket állítottam elő. Az őrlési idő növelésének hatására nőtt a próbatestek testsűrűségének értéke, azonban az egytengelyű nyomószilárdság esetén nem volt megfigyelhető egyértelmű trend: kezdeti növekedés után a geopolimerek nyomószilárdsága csökkent, majd ismét megnövekedett. Annak érdekében, hogy feltárjam a változások okát az alapanyag és a próbatestek vizsgálata mellett eredményeimet összehasonlítottam korábbi deponált pernyéből (tiszaújvárosi) előállított geopolimerek tulajdonságaival. Az eddig elvégzett vizsgálatok alapján látható, hogy minden pernye esetében van egy optimális őrlési finomság.

Kulcsszavak: deponált pernye, geopolimer, mechanikai aktiválás, nyomószilárdság

Keywords: compressive strength, geopolymer, landfilled fly ash, mechanical activation

AMBRUS Mária

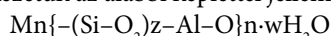
Tanszéki mérnök a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézeténél 2018 óta. Angol nyelvű környezetmérnöki MSc tanulmányait 2019 februárjában kezdte. Eddig összesen 9 folyóirat cikkel és konferencia kiadványban megjelent tanulmánnyal rendelkezik, amelyek többnyire angol nyelven kerültek kiadásra. Több jelenleg futó kutatási projektben közreműködik az ipari hulladékok geopolimerizációja témakörében.

Mária AMBRUS

She is a research engineer at the Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing at the University of Miskolc since 2018. She started her Environmental Engineering MSc studies in February 2019. So far, she has 9 articles published in journals and conference proceedings, mostly in English. Currently, she is involved in several research projects in the field of the geopolimerisation of industrial wastes.

1. Bevezetés

Világviszonylatban a cement az egyik legnagyobb mennyiségben használt alapanyag. Felhasználása a társadalmi-gazdasági fejlődés elengedhetetlen velejárója, azonban előállítás nagy mennyiségű CO₂ kibocsátással jár (pl. kemencefűtés, mész kalcinálás, alapanyag szállítás stb.), ezért az utóbbi évtizedek során világszerte kutatásokat végeznek környezetbarát, alternatív építőanyagok kifejlesztésére [1, 2]. A geopolimerek szerves, polimer szerkezetű anyagok, melyek szilárd alumino-szilikát-oxidok és alkáli-szilikátok lúgos vagy savas közegben történő aktiválásával állíthatók elő. Energiahatékony és környezetbarát előállításuk, kiváló mechanikai tulajdonságaik, bizonyított sav- és tűzállóképességük miatt ideális építőipari alapanyagként bizonyultak. Szerkezetük az alábbi képlettel jellemezhető:



ahol „M” a töltéskiegyenlítéshez szükséges kation, leggyakrabban Na⁺, K⁺, az „n” a polikondenzációs fok, „z” jelöli a Si/Al moláris arányt, ami 1, 2 vagy 3 lehet, illetve „w” a kapcsolódó vízmolekulák számára utal [2-4].

A pernye a széntüzelésű erőművekben keletkező, finom szemcseméretű, világszerte nagy mennyiségben fellelhető ipari melléktermék. Miután a szén elégetése után a füstgázzal távozik a kazánból, a pernyét különböző porleválasztók segítségével (elektrosztatikus porleválasztó, mechanikai szűrő, vagy ciklon) eltávolítják a rendszerből. Ezt követően hasznosítható pl. talajjavítóként vagy cement- és betonipari alapanyagként, de legnagyobb mennyiségbe lerakásra/tárolásra kerül. Kémiai és ásványos összetétele alapján megfelelő geopolimerizációs alapanyag, felhasználása környezeti és gazdasági szempontból is előnyös [1, 5, 6].

Az elmúlt évtizedekben elvégzett, pernye-alapú geopolimer gyártásra irányuló kísérletek során kezeletlen, osztályozott (pl. szitálással, légosztályozóval) és mechanikailag aktivált pernye alkalmazását is vizsgálták [7, 8, 9], azonban a szakirodalom kis hányada foglalkozik a deponált pernye felhasználásának lehetőségeivel.

Kusnierová és szerzőtársai deponált feketeszen pernye amorf fázis tartalmának változását vizsgálták az eltelt idő függvényében és megállapították, hogy a pernye jelentős devitrifikáción ment keresztül, azaz csökkent az üveges fázis aránya [10]. Yehevis et al. kutatásuk során a deponált pernye kémiai, ásványtani és geokémiai változásait elemezték. A minták eltérő ideig, különböző mélységekben voltak deponálva, így az erózió hatását is megfigyelhették. Eredményeik alapján elmondható, hogy a pernye ásványos összetétele és mikroszerkezete megváltozott a deponálás hatására [11]. Peterová et al. deponált és friss pernye anyagtulajdonságait hasonlították össze, hogy megállapítsák, alkalmas-e a több évtizede tárolt pernye betonipari hasznosításra. Vizsgálataikkal kimutatták, hogy a különböző mélységben vett deponált pernye minták szemcseméret-eloszlásai tág határok közt mozogtak, így felhasználás előtt szükséges annak osztályozása vagy őrlése [12].

Tennakoon et al. ausztrál deponált és friss barnaszén pernye felhasználási lehetőségeit vizsgálták. Megállapították, hogy a pernyék önmagukban nem alkalmazhatók jó minőségű geopolimer előállítására az alacsony SiO₂/Al₂O₃ arányuk miatt, viszont feketeszen pernye és salak hozzáadásával akár 30 MPa feletti 7 napos nyomószilárdság is elérhető (maximum 40% barnaszén pernye használatával). Ezen keverékek esetén a deponált barnaszén pernyét tartalmazó próbatestek

mikroszerkezeti vizsgálatai során kevesebb szabad pernye és salak szemcse volt megfigyelhető, mint friss pernye használata esetén [13]. Saxena et al. kísérleteik során arra következtetett, hogy a deponált pernye alkalmas jó minőségű geopolimer előállítására, továbbá megállapították, hogy 1 órás mikrohullámú hőkezelést alkalmazva magasabb szilárdságú geopolimerek állíthatók elő, mint amit kemencében 80 °C-os, 12 órás hőkezeléssel tudtak elérni [14].

A termikus kezelés mellett fontos az alapanyagok mechanikai előkészítése. Mechanikai aktiválás hatására csökken a szemcseméret és megváltozik szemcsék morfológiája, ezáltal nő a pernye reakcióképessége és nő az előállított geopolimer nyomószilárdsága [7, 9, 15]. Kwasny et al. nedves, szárított és szitált, szárított és örlött deponált, valamint silóban tárolt pernye alapú geopolimerek nyomószilárdságát hasonlították össze. Szárított és örlött deponált pernye használatával közel azonos nyomószilárdságú geopolimereket sikerült készíteniük, mint a silóban tárolt pernye alkalmazásával, azonban előkezelés nélkül a reakcióképessége nem volt megfelelő [16]. A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében már 10 éve folynak deponált pernye mechanikai aktiválására és hasznosítására irányuló kutatások. Tiszaújvárosi deponált pernye keverőmalommal történő őrléseik során Molnár et al. (2014) az őrlési idő növelésével a szemcsék agglomerálódását és a fajlagos felület csökkenését, a szubmikronos szemcsék alakjának változását tapasztalták [17]. Mucsi et al. tiszaújvárosi deponált pernyével folytatott kísérleteik során szintén a szemcsék finomodását, majd agglomerálódását figyelték meg az őrlési idő növelésével, ami a fajlagos felület kezdeti növekedését, majd csökkenését eredményezte. Ez a geopolimer próbatestek testsűrűség és nyomószilárdság értékeinél is megfigyelhető volt: kezdeti növekedés után az optimális őrlési időt túllépve mind a nyomószilárdság, mint a testsűrűség csökkenni kezdett. Kísérleteik során több malomtípussal is kísérleteztek, ezek közül keverőmalmi őrléssel sikerült a legfinomabb szemcseméretű pernyét előállítaniuk [18, 19]. Szabó et al. a pernye őrlés geopolimer habokra gyakorolt hatását vizsgálták, tiszaújvárosi pernye használatával. Kutatásaik során sikerült összefüggést felállítaniuk a geopolimer paszta folyási tulajdonsága és a pernye szemcsefinomsága között. Az előállított geopolimer habok nyomószilárdsága és testsűrűsége eleinte nőtt az őrlési idő növelésével, majd csökkenni kezdett [20].

Kísérleteim során golyósmalmi őrlés hatását vizsgáltam tatabányai deponált barnaszén pernyéből készült geopolimerek nyomószilárdságára.

2. Anyagok, vizsgálati módszerek

A geopolimerizációs kísérletekhez tatabányai deponált barnaszén pernyét (FA1) használtam, és az elért eredményeket hasonló körülmények közt örlött, tiszaújvárosi deponált barnaszén pernye (FA2) geopolimerek vizsgálati eredményeivel vettem össze.

A pernyék kémiai összetételének meghatározása röntgenfluoreszcens spektroszkópia segítségével (XRF) történt, mely eredményét az 1. táblázat foglalja össze. Az XRF eredmények alapján megállapítható, hogy FA2 SiO₂ tartalma

közel 15%-kal magasabb, azonban Al₂O₃ tartalma közel azonos, mint az FA1 mintáé. Ebből adódóan az FA1 minta esetén a SiO₂/Al₂O₃ arány jóval alacsonyabb (1,69), mint az FA2 minta esetén (2,3). Összetételük alapján FA1 és FA2 is F típusú pernye, azonban FA1 lényegesen magasabb CaO tartalommal rendelkezett, mint FA2.

Komponens	FA1	FA2
Alkotó mennyisége, m/m%		
SiO ₂	46,40	61,32
Al ₂ O ₃	27,40	26,71
CaO	7,04	1,50
Fe ₂ O ₃	6,96	4,27
MgO	2,23	0,89
K ₂ O	1,65	1,72
Egyéb	8,32	3,59
LOI*	0,75	1,92

*Izzítási veszteség 950 °C-on (Loss on ignition at 950 °C).

1. táblázat A pernyék kémiai összetétele

Table 1 The chemical composition of the fly ash samples, FA1=Tatabánya fly ash, FA2=Tiszaújváros fly ash

A pernyék izzítási vesztesége fontos tulajdonság geopolimer előállítás szempontjából. Ha magas a pernye szervesanyag-tartalma, nagyobb mennyiségű aktiváló oldat használata szükséges, ami a geopolimer alacsonyabb nyomószilárdságát eredményezi. A két deponált pernyminta LOI értéke igen alacsony, az FA1 értéke 1% alatti, míg az FA2 értéke közel 2%.

A pernyék mechanikai aktiválása a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet sima falú pánccal ellátott, Ø305×305 mm-es golyósmalmában történt. FA1 esetén 5, 10, 20, 30, 60 és 120 perces őrlést alkalmaztam. Az FA2 minták esetén az őrlés 5, 10, 20, 30 és 60 perces volt [19]. Az FA1 őrlése során acél őrlőtesteket használtam, melyek össztömege 36 kg volt 30%-os töltési fok mellett, a maximális golyóméret pedig 40 mm volt. A pernyét 110% anyagtöltési fok és 70 l/min fordulatszám alkalmazásával örltem. az FA2 minta őrlése azonos körülmények között történt.

Az FA1 geopolimer keverékek szilárd anyag/aktiváló oldat aránya 0,82 volt. Az aktiváló oldat 75 m/m% Betol SB típusú vízüveget (25,3% SiO₂; 13,7% Na₂O; 2,7% K₂O) és 25 m/m% 8M-os NaOH-t tartalmazott. Az FA2 próbatestek 0,65 szilárd anyag/aktiváló oldat (NaOH oldat) aránnyal készültek [19].

A geopolimer próbatestek előállításához először összekevertem a pernyét és az aktiváló oldatot, amit 35 mm belső átmérőjű, formaelválasztó olajjal bekent, hengeres sablonokba töltöttem. Ezután a próbatesteket vibrációs asztal segítségével 1 percig tömörítettem. A tömörített próbatesteket 24 órán át levegőtől elzártan, állandó hőmérsékleten pihentettem, majd a 24 óra eltelte után következett a próbatestek hőkezelése 1 órás felfűtési idővel, 50 °C-on, 6 órán keresztül. Ezt követően a hőkezelt geopolimereket lehűlés után további 5 napig levegőtől elzártan, állandó hőmérsékleten pihentettem. A próbatestek tömegének, magasságának és átmérőjének mérésével meghatároztam az átlagos testsűrűség értékeket, majd ezután történt a próbatestek egytengelyű nyomószilárdság-vizsgálata.

A nyers és örlött pernyék szemcseméret-eloszlás méréséhez laboratóriumi HORIBA LA950-V2 típusú lézeres szemcseméret-

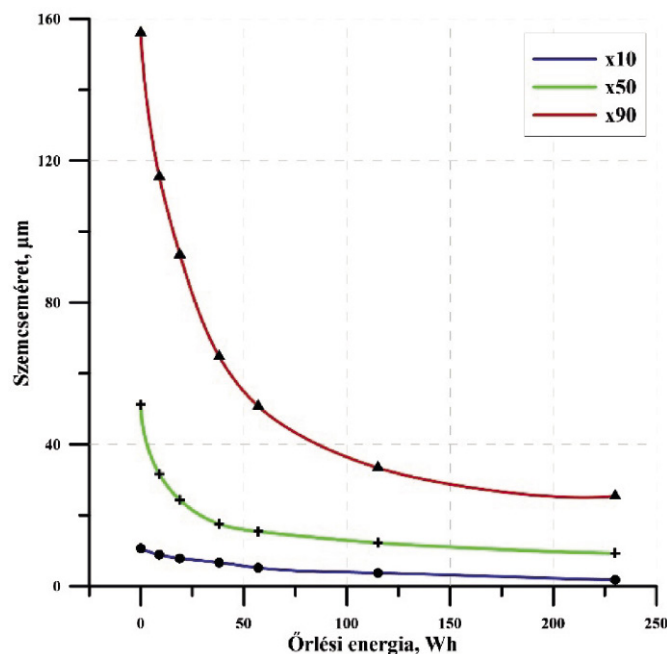
elemző készüléket használtam, nedves közegű diszpergálással. A szemcseméret eloszlás meghatározása mellett a szoftver segítségével lehetséges a mért anyag fajlagos felületének (geometriai), darab-, ill. felületi eloszlásának a meghatározása is. A fajlagos felület számítása 1,75-ös alakítványozóval történt.

A geopolimerek szerkezetének vizsgálatához Jasco FT-IR 4200 típusú Fourier transzformációs infravörös spektrométert használtam.

3. Eredmények

3.1 Pernye őrlés

Az őrlések során az őrlési energia mérésére is sor került, mely egyenes arányosságban nőtt az őrlés időtartamával. Az FA1 minta 5, 10, 20, 30, 60 és 120 perces őrlése után mért nevezetes szemcseméreteket (x_{10} , x_{50} , x_{90} : azok a szemcseméreteket, amelynél a szemcsék 10, 50, illetve 90 %-a kisebb) változását az 1. ábra mutatja. Az őrlmények x_{10} értéke kis mértékben folyamatosan csökkent az őrlés hatására, a 120 perces őrlés végére 1,76 μm -re csökkent. A medián szemcseméret 20 perc után jelentősen csökkent (51,12 μm -ról 17,5 μm -re), majd további őrlés hatására ~10 μm -re csökken. Az x_{90} szemcseméret 156,03 μm -ról 25,38 μm -re csökkent a 120 perces őrlés végére. A szemcseméret-elemzés során a szemcsék agglomerálódása nem volt megfigyelhető.



1. ábra Az FA1 őrlmények nevezetes szemcseméret értékei
Fig. 1 Characteristic particle size data of the ground FA1 samples

Az őrlmények geometriai fajlagos felület értéke az őrlési idő függvényében exponenciálisan növekedett. A fajlagos felület változása $R^2=0,985$ korrelációs együtthatóval az alábbi függvénnyel jellemezhető:

$$\ln(Y) = 0,0161 X + 7,821 \quad (1)$$

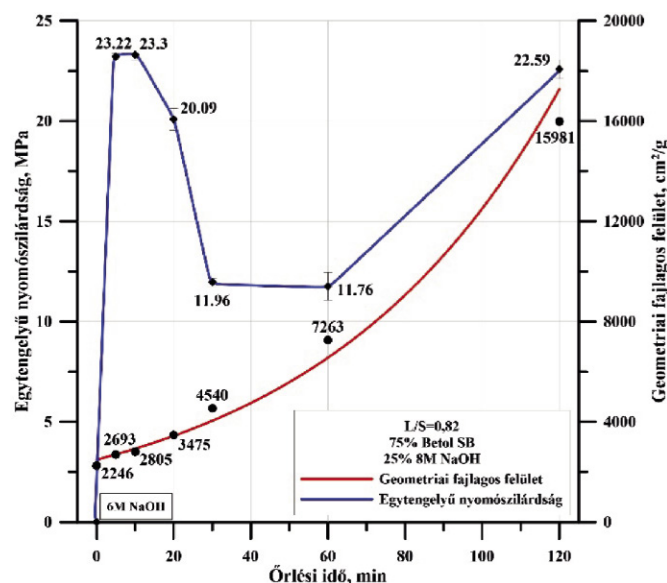
3.2 Geopolimerek nyomószilárdsága, testsűrűsége

A pernye mechanikai aktiválása előtt a nyers pernye reakcióképességének vizsgálata céljából geopolimer próbatesteket

állítottam elő 6 M koncentrációjú NaOH oldat használatával. A nyers pernye alkalmazásával a geopolimer próbatestek nem voltak alkalmasak a nyomószilárdsági kísérletek elvégzésére, mivel nem rendelkeztek megfelelő mechanikai stabilitással (kézzel könnyen morzsolhatók voltak).

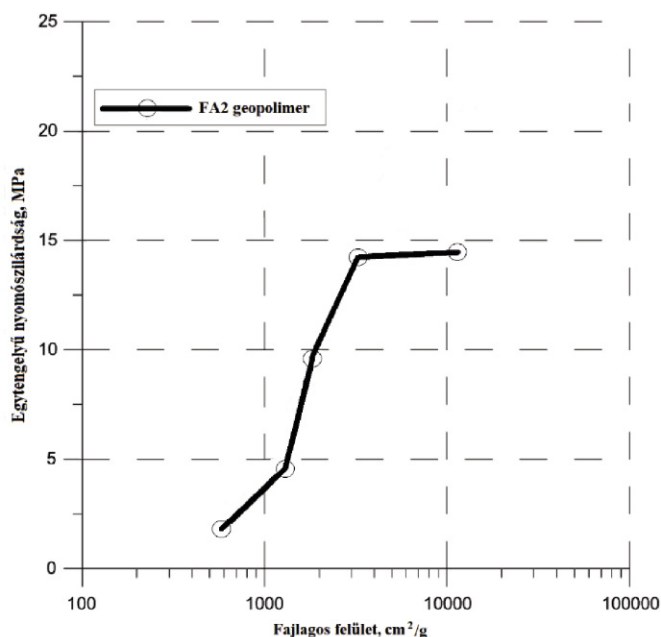
Az őrlt pernye finomságának és a fajlagos felület növekedésének hatására változik a keverék reológiai tulajdonsága [20], amely megfigyelhető volt a próbatestek előállítása során. A hosszabb őrlési idővel előállított őrleményekből készült geopolimer paszták hígán folyós állagúak voltak, ellentétben a rövidebb ideig őrlt pernyéből készült keverékek.

A próbatestek nyomószilárdság értékei és a kapcsolódó őrlmények fajlagos felületének változását összehasonlítva (2. ábra) eltérő trend figyelhető meg. Habár az FA1 őrlemény fajlagos felülete nőtt, az egytengelyű nyomószilárdság értéke 10 perc őrlés után drasztikusan lecsökkent, 23,3 MPa-ról 12 MPa alá, majd az őrlési idő 120 percre való növelésével ismét 22 MPa fölé nőtt a próbatestek szilárdsága. Az FA2 őrleményből előállított próbatestek esetén megállapítható, hogy a fajlagos felület emelkedésével kezdetben jelentős szilárdság növekedés volt tapasztalható, azonban a fajlagos felület 3000 cm^2/g fölé növelésével a nyomószilárdság értéke stagnált (3. ábra). Azonban a nagyobb fajlagos felület nem feltétlenül jár a geopolimer próbatestek nagyobb nyomószilárdságával [21, 22].



2. ábra Az FA1 próbatestek átlagos nyomószilárdság és fajlagos felület értékei
Fig. 2 The average compressive strength and specific surface area values of FA1 specimens

A próbatestek testsűrűségét megvizsgálva (2. táblázat) a kezdeti 1,63 g/cm^3 testsűrűség a 60 perces őrlés eredményeképp 1,71 g/cm^3 -re emelkedett, majd 120 perces őrlés hatására 1,68 g/cm^3 -re csökkent, tehát az elért nyomószilárdság és a testsűrűség értékek között sincs korreláció.

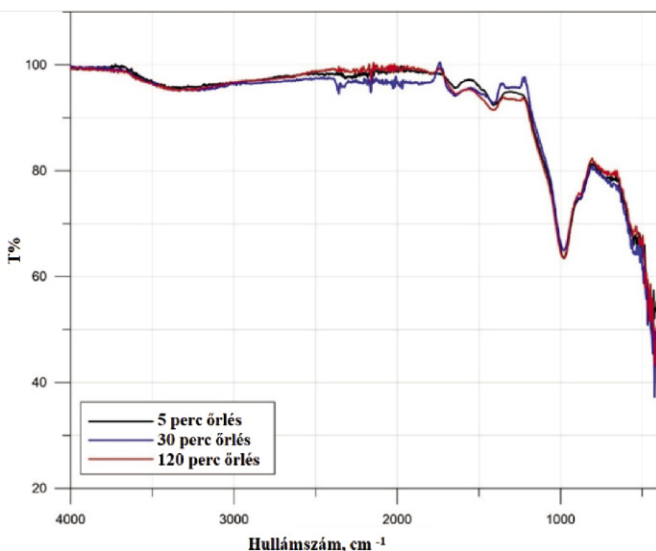


3. ábra Az FA2 próbatestek átlagos nyomószilárdsága a fajlagos felület függvényében [19]

Fig. 3 The average compressive strength of FA2 specimens in relation to specific surface area

Örlési idő, min	5	10	20	30	60	120
Testsűrűség, g/cm³	1,63	1,65	1,65	1,68	1,71	1,68

2. táblázat Örölt FA1 geopolimerek testsűrűség értékei
Table 2 Specimen densities of ground FA1 geopolymers



4. ábra Az 5, 30 és 120 perces FA1 őrlményből készült geopolimer próbatestek FT-IR spektrumai

Fig. 4 The FT-IR spectra of geopolymers from FA1 ground for 5, 30 and 120 minutes

3.3 FT-IR vizsgálatok

Az 5, 30 és 120 perces FA1 őrlményekből készült geopolimer próbatestek FT-IR spektrumait a 4. ábra mutatja.

A $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ hullámszámnál megfigyelhető széles csúcsok az -OH és HOH kötések nyújtó rezgései, míg az $1650\text{-}1630 \text{ cm}^{-1}$ hullámszámnál megjelenők a hajlító rezgései közel azo-

nosak, ezeket a felszínen vagy a pórusokban megkötött vízmolekulák okozhatják. Az 1400 cm^{-1} körül megjelenő csúcsok az O-C-O kötések nyújtó rezgései, melyek jelenléte a geopolimer szilárdságának csökkenését okozhatja [23, 24], azonban a vizsgált próbatestek esetén nem volt számottevő eltérés a csúcsok intenzitása között. A 990 cm^{-1} hullámszámnál látható csúcsok az Si-O-Si és Si-O-Al kötések aszimmetrikus nyújtó rezgései, melyek a geopolimerizáció fokára utalnak, azonban ezen csúcsok intenzitása is közel azonos [25, 26, 27].

A vizsgált próbatestek FT-IR spektrumai szinte azonos lefutásúak, így a szerkezeti vizsgálatok alapján nem mutatható ki számottevő eltérés, mely magyarázatot adna a nyomószilárdság abnormalis változására.

4. Megállapítások

Kísérleteim során deponált barnaszén pernye golyósmalmi őrlésével foglalkoztam. A 120 perces őrlés eltelte után sem volt megfigyelhető az őrlmények szemcseméretének növekedése, sem a fajlagos felület csökkenése, azaz a pernye szemcseméretének folyamatos csökkenését tapasztaltam. A minták őrlése után geopolimer próbatesteket készítettem, hogy az őrlés nyomószilárdságra gyakorolt hatását vizsgáljam. A próbatestek nyomószilárdság értéke és a testsűrűsége között nem állapítható meg egyértelmű kapcsolat, valamint a próbatestek FT-IR vizsgálata sem mutatott ki jelentős különbséget a geopolimerek szerkezetében. A próbatestek további vizsgálata szükséges (pl. XRD) a nyomószilárdság szabálytalan változásának megértéséhez.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A szerző köszönetét fejezi ki Dr. Debreczeni Ákosnak és Köteles Lászlónak (ME, Bányászati és Geotechnikai Intézet) az egytengelyű nyomószilárdsági mérések biztosításában és elvégzésében nyújtott segítségéért, Dr. Kristály Ferencnek (ME, Ásványtani - Földtani Intézet) az XRD vizsgálat elvégzéséért, valamint Dr. Mucsi Gábornak és Szabó Rolandnak (ME, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet) a témában való iránymutatásukért.

Irodalomjegyzék

- [1] Nath, S.K. – Kumar, S. (2019): Reaction kinetics of fly ash geopolymers: Role of particle size controlled by using ball mill. *Advanced Powder Technology* 30 (5), pp. 1079–1088. <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2019.02.003>
- [2] Mucsi, G. – Csöke, B. – Erdős, Gy. (2011): Erőműi pernyehasznosítás kutatási tapasztalatai: hidraulikus kötőanyag és geopolimer előállítása. *Bányászati és Kohászati Lapok – BANYÁSZAT* 144 (3), pp. 13–20.
- [3] Davidovits, J. (2011): Geopolymer chemistry and application. Institut Geopolimere, ISBN: 9782951482050 pp. 286.
- [4] Kumar, R. – Kumar, S. – Mehrotra, S. P. (2007): Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. *Resources, Conservation and Recycling* 52 (2), pp. 157–179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.007>

- [5] Bokányi L., Csőke B., Debreczeni Á., Gáspár L., Gombkötő I., Horváth R., Less Gy., Mucsi G., Molnár Z., Rácz Á. (2014): Erőművi pernye komplex hasznosítása (Milagrossa Kft., Miskolc, 2014).
- [6] Kumar Sharma, P. – Prasad Singh, J. – Kumar, A. (2019): Effect of Particle Size on Physical and Mechanical Properties of Fly Ash Based Geopolymers. Transactions of the Indian Institute of Metals. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01628-w>
- [7] Kumar, S. – Kristály, F. – Mucsi, G. (2014): Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash. Advanced Powder Technology 26 (1), pp. 24–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2014.09.001>
- [8] Temuujin, J. – Williams, R. P. – van Riessen, A. (2009): Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. Journal of Materials Processing Technology 209 (12–13), pp. 5276–5280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016>
- [9] Marjanović, N. – Komljenović, M. – Bašćarević, Z. – Nikolić, V. (2014): Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through mechanical activation, Construction and Building Materials 57, pp. 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.095>
- [10] Kusnierová, M. – Slesárová, A. – Prascáková, M. (2005): The significance of fly ash for their processing and utilization. In: Proc. Waste Recycling – IX. Krakow, pp. 17–19.
- [11] Yeheyis, M. B. – Shang, J. Q. – Yanful, E. K. (2009): Chemical and Mineralogical Transformations of Coal Fly Ash after Landfilling, Előadás, World of Coal Ash Conference (WOCA), May 4–7, 2009. Lexington, Kentucky, USA. <https://pdfs.semanticscholar.org/cbd5/45b35c33e8887885e26f9dcaec451b0ba036.pdf>
- [12] Peterová, A. – Škvára, F. – Šídllová, M. – Šulc, R. – Sokolová, K. – Snop, R. (2019): Can Czech Stockpiled Fly Ash be Used in the Production of Concrete? In: McCarthy, M. J. – Newlands, M. D. – Jones, M. R. – Dyer, T. D. – Csetenyi, L. J. – Zheng, L. (szerk.): EuroCoalAsh 2019 Proceedings, University of Dundee: Dundee, Egyesült Királyság/Skócia (2019), pp. 123–130.
- [13] Tennakoon, C. – Sagoe-Crentsil, K. – San Nicolas, R. – Sanjayan, J. G. (2015): Characteristics of Australian brown coal fly ash blended geopolymers. Construction and Building Materials 101, pp. 396–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.089>
- [14] Saxena, S. K. – Kumar, M. – Singh, N. B. (2018): Effect of Alccofine powder on the properties of Pond fly ash based Geopolymer mortar under different conditions. Environmental Technology & Innovation 9, pp. 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.12.010>
- [15] Diaz, E. I. – Allouche, E. N. – Eklund, S. (2010): Factors affecting the suitability of fly ash source material for geopolymers. Fuel 89, pp. 992–996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.012>
- [16] Kwasny, J. – McGrath, T. – Lawther, S. – Soutsos, M. – Sha, W. – Cox, S. – Chen, J. F. (2019): Lagoon Fly Ash: A Potential Source of the Precursor for Geopolymer. In: McCarthy, M. J. – Newlands, M. D. – Jones, M. R. – Dyer, T. D. – Csetenyi, L. J. – Zheng, L. (szerk.): EuroCoalAsh 2019 Proceedings, University of Dundee: Dundee, Egyesült Királyság/Skócia (2019), pp. 322–333.
- [17] Molnár, Z. – Kristály, F. – Mucsi, G. (2014): Mechanical activation of deposited brown coal fly ash in stirred media mill, Acta Physica Polonica A 126 (4), pp. 988–993. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.126.988>
- [18] Mucsi, G. – Gombkötő, I. – Molnár, Z. – Osváth, I. – Kumar, S. (2016): Effect of mechanical activation of fly ash on geopolymer properties, In: Finch, J. – O'Connor, C. – Leroux, D. – Stubina, N. – Polin, G. (szerk.): IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings, pp. 1–9.
- [19] Mucsi, G. – Kumar, S. – Csőke, B. – Kumar, R. – Molnár, Z. – Rácz, Á. – Máda, F. – Debreczeni, Á. (2015): Control of geopolymer properties by grinding of land filled fly ash. International Journal of Mineral Processing 143, pp. 50–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2015.08.010>
- [20] Szabó, R. – Gombkötő, I. – Svéda, M. – Mucsi, G. (2017): Effect of grinding fineness of fly ash on the properties of geopolymer foam, Arch. Metall. Mater 62 (2B), pp. 1257–1231. <http://dx.doi.org/10.1515/amm-2017-0188>
- [21] Kumar, S. – Kumar, R. – Alex, T. C. – Bandopadhyay, A. – Mehrotra, S. P. (2007): Influence of reactivity of fly ash on geopolymerisation. Advances in Applied Ceramics 106 (3), pp. 120–127. <http://dx.doi.org/10.1179/174367607X159293>
- [22] Máda, F. – Kristály, F. – Mucsi, G. (2015): Microstructure, mineralogy and physical properties of ground fly ash based geopolymers. Ceramics – Silikáty 59 (1), pp. 70–79. http://www.ceramics-silikaty.cz/2015/pdf/2015_01_70.pdf
- [23] Panias, D. – Giannopoulou, I. P. – Perraki, T. (2007): Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 301 (1–3), pp. 246–254. <http://doi:10.1016/j.colsurfa.2006.12.064>
- [24] Szabó, R. (2019): Lignit pernye alapú geopolimerek mechanikai tulajdonságainak szabályozása vibrációs tömörítéssel. Építő anyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, 71 (2), pp. 66–71. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.12>
- [25] Kumar, S. – Kumar, R. (2011): Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. Ceramics International, 37 (2), pp. 533–541. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.038>
- [26] Hamdi, N. – Messaoud, B. I. – Srasra, E. (2018): Production of geopolymer binders using clay minerals and industrial wastes. Comptes Rendus Chimie 22 (2–3), pp. 220–226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2018.11.010>
- [27] Yaseri, S. – Hajiaghei, G. – Mohammadi, F. – Mahdikhani, M. – Farokhzad, R. (2017): The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste, Construction and Building Materials, 157, 2017, pp 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.102>

Ref:

Ambrus, Mária: Mechanikai aktiválás hatása deponált pernye alapú geopolimerek nyomószilárdságára
Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials,
Vol. 71, No. 5 (2019), 148–152. p.
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.26>

