

Speciális tulajdonságú geopolimerek fejlesztése, különös tekintettel a habszerkezetű termékekre

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Készítette:

Szabó Roland

okl. előkészítéstechnikai mérnök

Tudományos témavezető:

Dr. habil. Mucsi Gábor

egyetemi docens

Társ témavezető:

Dr. Nagy Sándor Márton

egyetemi docens

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője:

Prof. Dr. Szűcs Péter

egyetemi tanár, MTA doktora

Miskolc, 2020

1. Az értekezés tudományos előzményei, célja

A primer ásványi nyersanyagok mennyiségének folyamatos csökkenése, és azok árának emelkedése világszerte arra ösztönzi a szakembereket, hogy olyan megoldásokat találjanak, amelyek a környezetkímélőbb bányászati tevékenységek mellett a nyersanyagok hasznosítását takarékosabban valósítják meg, és a keletkezett melléktermékek - mint másodlagos nyersanyagok - újrahasznosítása minél szélesebb körben megtörténjen. A bányászat, a kohászat és az építőipar is hatalmas mennyiségben termel hulladékokat, ill. melléktermékeket, amelyek ásványi összetételüket tekintve az aluminoszilikátok közé sorolhatók. Ilyenek például a bányászati meddők, kohászati salakok, erőműi pernyék és salakok, amely anyagok nagymértékű újrahasznosítása azonban egyáltalán nem megoldott, gyakran még tárolásuk is nehézséget jelent (*Komnitsas és Zaharaki 2007, Kumar et al. 2007, Mucsi 2016*). Egyes források szerint széntüzelési melléktermékek évente keletkező mennyisége világviszonylatban eléri az 1100 millió tonnát (*Feuerborn et al. 2019*). A fentebb említett ipari melléktermékek nagyobb részét jelenleg deponálják, ami azonban több szempontból is hátrányos megoldás. Egyrészt a tározók csökkentik az értékes mezőgazdasági és ipari területeket, továbbá a nem megfelelő deponálás során környezeti kockázatot (víz, talaj- és levegőszennyezést) is jelentenek (*Komnitsas és Zaharaki 2007*). Ezzel szemben a szóban forgó melléktermékek nyersanyagként való hasznosítása az általuk kiváltott primer nyersanyagkészlettel történő fenntartható gazdálkodást is lehetővé teszi.

Az utóbbi években világszerte jelentős kutatás indult meg újfajta, környezetbarát építőanyagok kifejlesztésére, amellyel a Föld légkörében található, üvegházhatásért felelős gázok (többek között a portlandcement előállításánál képződő szén-dioxid) kibocsátásának csökkentése érhető el. A cement előállításakor - beleértve a kemence-hőmérséklet biztosításához szükséges tüzelőanyag elégetését, a mészkő kalcinálását, illetve a gyártási folyamatok (pl. őrlés) során felhasznált villamos energia előállítását - CO₂ keletkezik. Minden tonna cement előállítása kb. 0,815 tonna CO₂ kibocsátásával jár (*Gartner 2004*).

Az aluminoszilikát tartalmú melléktermékek egyik hasznosítási módja lehet az geopolimerként történő alkalmazásuk. A geopolimerek gyártása során alkalmazott alacsonyabb hőmérséklet és a kalcináció hiánya miatt a hagyományos portlandcement előállításakor keletkezett CO₂ csupán 10...20 %-a keletkezik (*Davidovits 2002*).

A geopolimer kifejezést a magyar felmenőkkel rendelkező francia tudós, Joseph Davidovits használta először 1972-ben, amely olyan ásványi jellegű anyagok osztályát jelenti, ami a zeolithoz hasonló kémiai összetétellel, de vegyes mikroszerkezettel (amorftól a félig kristályos

szerkezetig) rendelkezik (*Davidovits 1991*). Geopolimernek nevezte a háromdimenziós aluminoszilikátokat, melyek alacsony hőmérsékleten és nyomáson képződnek természetes aluminoszilikátokból (*Davidovits 1988*). A geopolimerek energiahatékony, környezetbarát előállításuknak, és speciális tulajdonságaiknak (pl. kiváló mechanikai tulajdonság, hő- és tűzállóság, alacsony kötési hőmérséklet és idő, formába önthetőség stb.) köszönhetően alternatív alapanyagot jelentenek nem csak az építőipar számos területén, hanem a csúcstechnológiai alkalmazásokig egyaránt. Az eltérő alkalmazási módok azonban különböző anyagtulajdonságokat követelnek meg: pl. a radioaktív hulladékok beágyazásakor nagy tömörség, kis szivárgási tényező szükséges, ezzel szemben a hőszigetelő anyagok esetében a nagy porozitású, könnyű szerkezet az elvárt. Ezen tulajdonságok hipotézisem szerint eljárástechnikai műveletekkel – őrlés, tömörítés, keverés, hőkezelés - szabályozhatók.

Fentiekkel összefüggésben kutatómunkám célkitűzése olyan pernyealapú geopolimerek és technológiák fejlesztése, amelyek fizikai tulajdonságai (tömörség, porozitás, szilárdság) eljárástechnikai műveletekkel tudatosan befolyásolhatók.

A szakirodalmi kutatás alapján a következő megállapítások tehetők:

- Geopolimerek és geopolimer habok készítésére különböző elsődleges nyersanyagok (pl. kaolin), ipari melléktermékek (pl. erőműi pernye, salak), és kalcinált agyagásványok (pl. metakaolin) egyaránt alkalmasak (*Komnitsas és Zaharaki 2007, Bai és Colombo 2018*).
- A geopolimer kötőanyag és geopolimer beton tömörítésére a betontechnológiában alkalmazott módszerek használhatók, úgymint csömöszölés, döngölés, vibrációs tömörítés (*Hardjito és Rangan 2005, Wallah és Rangan 2006*). Ugyanakkor a geopolimer tömörségének növelése kompaktálással is megoldható (*Živica et al. 2011*).
- A geopolimerek előállítása során használt alapanyagok reakcióképessége mechanikai aktiválással fokozható, ezáltal a kapott geopolimer termékek szilárdsága növelhető (*Kumar et al 2007, Singh et al. 2018, Mucsi et al. 2015*).
- Geopolimer hab előállítására számos habosítási eljárás ismert, úgymint kémiai habosítás (habosítószer -elsősorban fémpor, illetve hidrogén-peroxid- alkalmazása) és fizikai habosítás (geopolimer pasztába történő levegő bevezetése keveréssel és felületaktív anyagok használata a hab stabilizálására) (*Bai és Colombo 2018*).
- A geopolimer habok porózus szerkezetének kialakulását az alkalmazott habosítási eljárás (*Bai és Colombo 2018*), a habosítószer mennyisége (*Hlaváček et al. 2015*) és a geopolimer paszta reológiája (*Franchin et al. 2017*) egyaránt befolyásolják.

A disszertációban bemutatott eredmények alapján az alábbi hiányterületeket tártam fel:

- A geopolimer kötőanyag és geopolimer beton tömörítésére irányuló szakirodalmi kutatás eredményeként megállapítható, hogy az nem foglalkozik kellő mélységgel az alkalmazott tömörítési módszer termék tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálatával.
- Továbbá a fellelhető szakirodalom nem tesz említést vibrációs tömörítési paraméterek változtatásával a geopolimerek mechanikai tulajdonságaiban és anyagszerkezetében bekövetkező változások nyomon követéséről.
- A fellelhető szakirodalom nem foglalkozik különböző származású és összetételű (mésztartalmú) lignit és barnaszén erőműi pernye alapú geopolimer hab fejlesztésének összehasonlító vizsgálatával.
- Szakirodalom a habszerkezetű geopolimerek tulajdonságait befolyásoló tényezők közül – a habosítószer mennyisége mellett - elsősorban a geopolimer paszta bedolgozhatóságát befolyásoló folyadék/szilárd anyag arányát vizsgálja. Ugyanakkor nem foglalkozik az alapanyag őrlésének hatására a geopolimer pasztában bekövetkező folyási (reológiai) tulajdonságok megváltozásával.
- Továbbá a rendelkezésre álló adatok szerint nem követi nyomon a habképződés (gázfejlődés) során a pernyealapú geopolimer anyagszerkezetében létrejövő változásokat sem. Elsősorban a kész hab mikro- és makroszerkezetét vizsgálják.

2. A kutatómunka célja

A fentiekkel összefüggésben kutatómunkám fő célkitűzése olyan speciális tulajdonságú pernyealapú geopolimerek (nagy tömörségű, illetve habszerkezetű termékek) fejlesztése, amelyek tulajdonságai (tömörsége, szilárdsága, porozitása stb.) különböző eljárásokkal (pl. alapanyag őrlésével, tömörítési paraméterek változtatásával) tudatosan szabályozhatók legyenek.

Kutatásom során az alábbi részcélokat kívánom megvalósítani:

- Az alkalmazott geopolimer-tömörítési módszer termék tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata.
- Különböző származású, összetételű (mésztartalmú) lignit és barnaszén alapú pernyék alkalmazhatóságának kutatása geopolimer hab előállításának céljából.

- Geopolimer paszta bedolgozhatóságának (folyási tulajdonságainak) és a hab képződésének szabályozása az alapanyag őrlésével.
- Az alapanyag mechanikai aktiválásának a geopolimer hab mikroszerkezetére, mechanikai tulajdonságaira (nyomószilárdság, testsűrűség, porozitás) gyakorolt hatásának kutatása.
- A habosodás során kialakult geopolimer anyagszerkezeti változásainak nyomon követése.
- A geopolimerek és geopolimer habok nyomószilárdsága és testsűrűsége közötti kapcsolat változó mértékének vizsgálata.

3. Alapanyagok ismertetése, kísérleti berendezések, alkalmazott mérési módszerek bemutatása

Alapanyagok

A kísérletek elvégzéséhez kétféle erőműi pernyét használtam, úgymint lignittüzelésből származó és barnaszéntüzelés során keletkező (F-típusú) pernyéket. A lignit pernye közvetlenül a Mátrai Erőmű elektrosztatikus porleválasztó rendszeréből származott, míg a barnaszén pernye a Tiszaújváros melletti pernyehányóról került mintavételezésre. A pernyék XRF elemzéssel megállapított kémiai összetétele igen eltérő volt. A barnaszén pernyének magas volt a SiO_2 és Al_2O_3 tartalma, összmenyiségük a pernye 88,03%-át tette ki, míg a $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ arány 2,3 volt. Ezzel szemben a lignit pernye kisebb mennyiségben tartalmazta e két komponenst (62,52%), amelyek aránya $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,34$. Továbbá a lignit pernye relatíve magas CaO tartalommal rendelkezett (11,76 %), szemben a barnaszén pernyével, amely csupán 1,5%-ban tartalmazta azt. A szemcseméret-eloszlásuk is igen eltérő volt. A barnaszén pernye medián szemcsemérete $x_{50}=78 \mu\text{m}$, míg a lignit pernyéé $x_{50}=48,4 \mu\text{m}$ volt.

Az aktiválószer NaOH oldat és vízüveg (kálium, ill. nátrium-szilikát oldat) keverékéből állt. A geopolimer hab előállítására Al port és H_2O_2 oldatot használtam habosítószerként.

Kísérleti berendezések, mérési módszerek

A Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetben végzett kísérleteim során egy 305 mm belső átmérővel és 305 mm hosszal rendelkező laboratóriumi golyósmalmot használtam a pernyék őrléséhez. Az alapanyagok (nyers, illetve őrlt pernye) szemcseméret eloszlásának és számított fajlagos felület értékének meghatározásához Horiba LA950 típusú

lézeres szemcseméret elemző készüléket alkalmaztam, a vizsgálatot nedves közegben végeztem.

A különböző szemcsefinomságú pernyéből és aktiváló szerből előállított keverék (geopolimer paszta) folyási tulajdonságainak meghatározására Anton Paar Physica MCR 51 típusú rotációs reométert használtam. Mérési elve szerint a mérendő folyadékot (vagy szuszpenziót) két koaxiális hengerfelület (Couette-áramlás) között helyezik el. A forgatott henger szögsebessége a nyírási sebességgel (γ), az álló hengerre ható forgatónyomaték pedig a folyadékban (vagy szuszpenzióban) ébredő nyírófeszültséggel (τ) arányos.

A kiindulási alapanyagok kémiai (oxidos) összetételének meghatározása WD-XRF RIGAKU gyártmányú Supermini 200 típusú WDXRF berendezéssel történt.

Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FT-IR) elemzéssel a molekulákban vagy kristályos anyagokban lévő kötések (kötött atomcsoportok) rezgései, periodikus oszcillációi vizsgálhatók, így közvetetten kémiai és lokális szerkezeti információkat képes kimutatni (*Hegman et al. 2011*). A méréseket Jasco FT-IR 4200 berendezéssel hajtottam végre reflexiós módban gyémánt ATR használatával.

Az alapanyagok, illetve geopolimer habok összetételének meghatározása röntgenpordiffrakciós ásványtani vizsgálattal történt, a berendezés főbb paraméterei a következők: XRD, Bruker D8 Advance készülék, Cu-K α sugárzás, 40kV és 40mA generátor-üzem, párhuzamos nyaláb geometria Göbel tükörrel, Vantec-1 helyzetértékelő detektor 1° ablaknyílással, 0,007°(2 Θ)/24 másodpercnél megfelelő mérési idővel.

A geopolimerek előállítása során törekedni kell az alapanyagok minél nagyobb fokú kevertségi állapotának elérésére, azaz a geopolimer paszta homogén jellegére. Az alapanyagok keverésére laboratóriumi habarcskeverőt használtam.

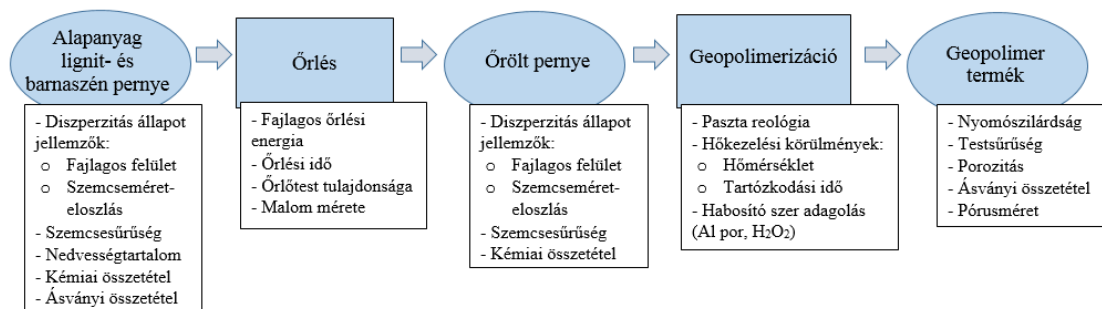
A geopolimerek tömörítési vizsgálatainak elvégzésére laboratóriumi vibrációs asztal szolgált, amelyen megoldható a hengeres és egyéb formák rögzítése a beépített menetes szárokra helyezhető keresztpánt segítségével.

A geopolimer és geopolimer hab próbatestek hőkezelésére Nabertherm L(T)3 típusú laboratóriumi statikus kemencét használtam, míg a próbatestek szilárdságvizsgálatának elvégzéséig adott hőmérsékleti (23 °C) és páratartalom (90%) értéken történő tárolására egy SDL Atlas G212-D1 típusú kondicionáló kamra szolgált.

A próbatestek nyomószilárdságának meghatározása egytengelyű nyomókísérlettel történt. A szilárdságvizsgálat egy SZF-1 típusú 25 kN (azaz 2,5 tonna) maximális terhelhetőségű hidraulikus törőgéppel történt.

4. Vizsgálati terv

Az 1. ábra a komplex vizsgálati tervet mutatja kezdve a kiindulási alapanyag tulajdonságainak megismerésétől, az abból készült geopolimer termék jellemzőinek meghatározásáig.

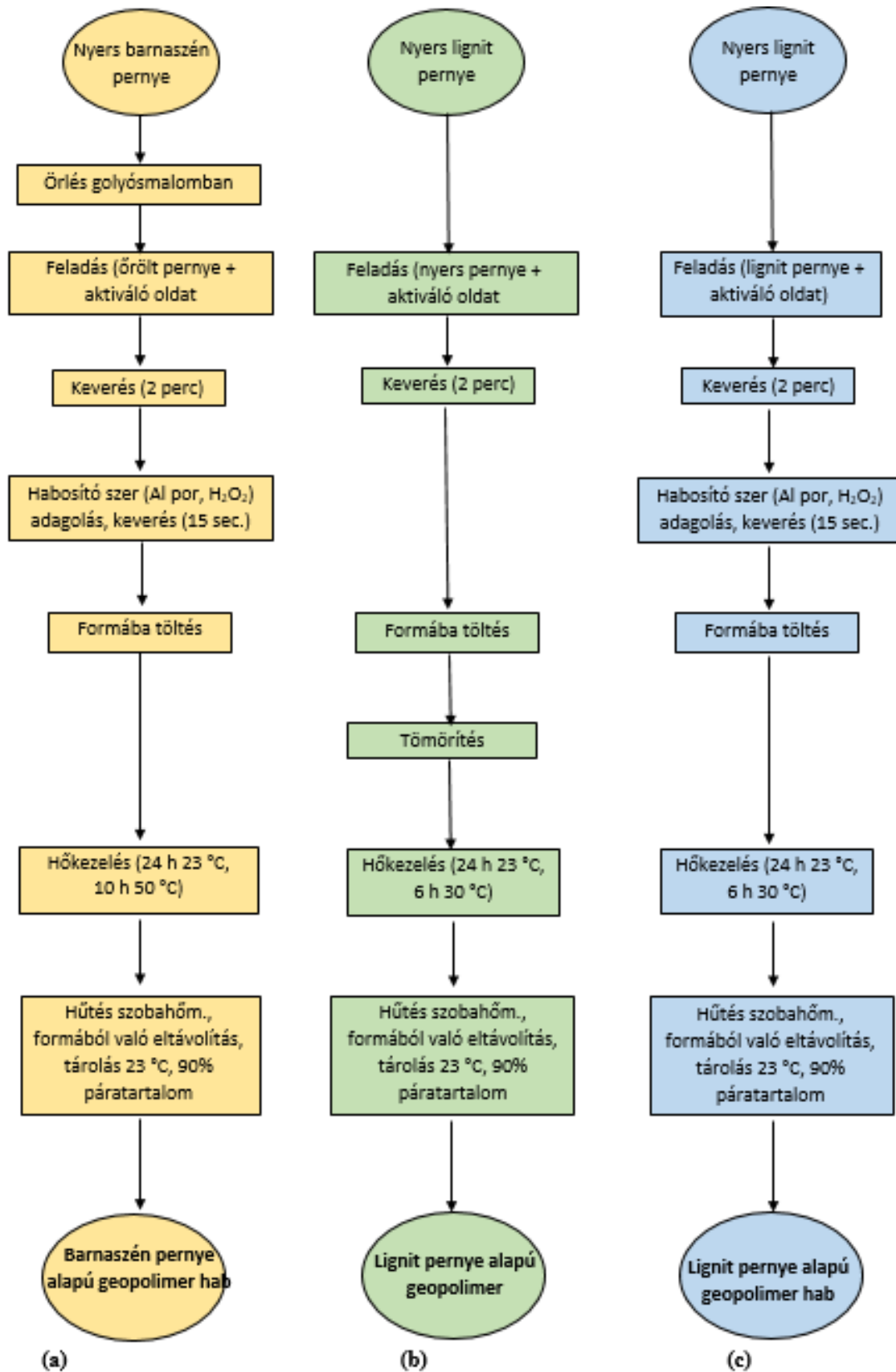


1. ábra Komplex vizsgálati terv

A vizsgálatok a kiindulási alapanyagok szemcsehalmaz tulajdonságainak meghatározásával kezdődtek, ezen belül a diszperzitás sajátságok közül a szemcseméret-eloszlás és geometriai (külső) fajlagos felület, valamint az anyagjellemzők, úgymint szemcsesűrűség, kémiai összetétel és ásványi összetétel meghatározásával. Az őrlés során az üzemeltetés paramétereit közül egyedül az őrlési időt változtattam. Az őrlés után kapott őrlemények a kiindulási alapanyaghoz hasonlóan a diszperzitás sajátságokkal, szemcsesűrűséggel jellemezhetők. A geopolimerizációs folyamatok első lépéseként előállított paszta reológiai tulajdonságaival jellemezhető. A geopolimerizációs folyamatra hatással vannak a hőkezelés körülményei (hőmérséklet, kezelési idő), mely paraméterek optimális megválasztása kulcsfontosságú geopolimer készítés során. A paszta folyási tulajdonságainak vizsgálata mellett a habosítószer adagolás hatását is vizsgáltam. A geopolimerizáció végén kapott termékek fizikai tulajdonságaival (nyomószilárdság, testsűrűség, porozitás), illetve anyagszerkezeti sajátságaival (ásványi összetétel) jellemezhetők.

Geopolimer és geopolimer hab gyártási technológia

A lignit és barnaszén pernye alapú geopolimerek és geopolimer habok előállításának módját a 2. ábrán látható technológiai folyamatára szemlélteti.



2. ábra Geopolimer (b) és geopolimer hab (a és c) gyártásának technológiai folyamatábrája

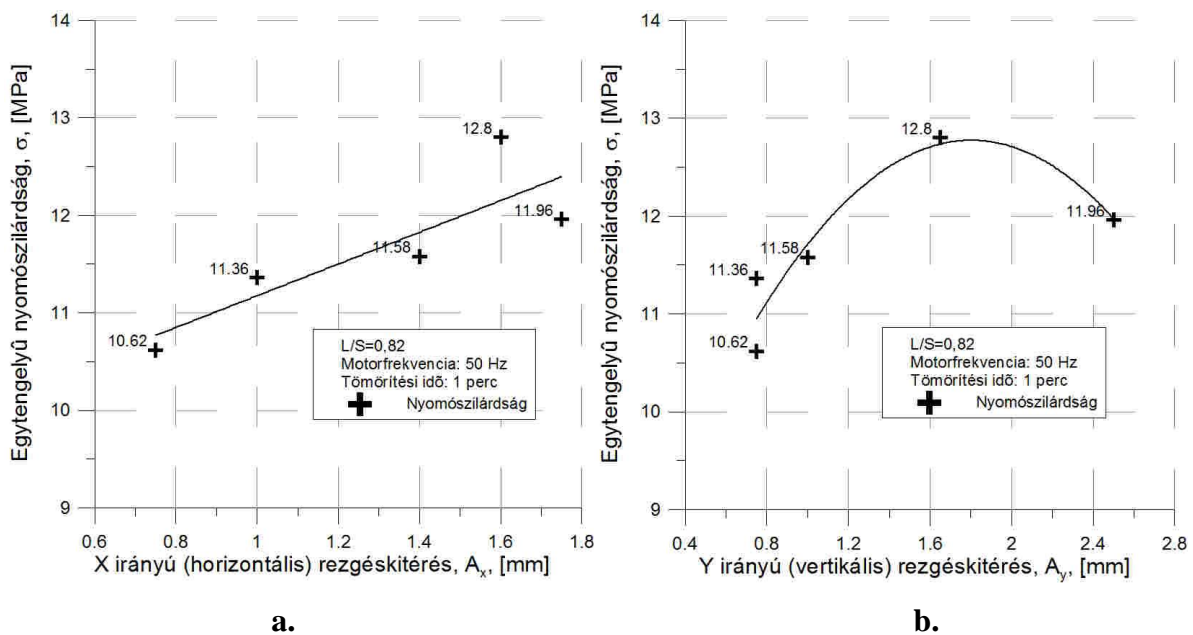
5. Tézisek

1. tézis

Vizsgálattal kimutattam, hogy a lignit pernye alapú geopolimerek nyomószilárdságát és testsűrűségét a vibrációs tömörítési paraméterek (rezgéskitérés, frekvencia, tömörítési idő) közül elsősorban a rezgéskitérés-amplitúdó és a tömörítési idő befolyásolták a vizsgált tartományban. Jól megválasztott tömörítési paraméterekkel a geopolimerek szilárdsága optimalizálható.

1/a.

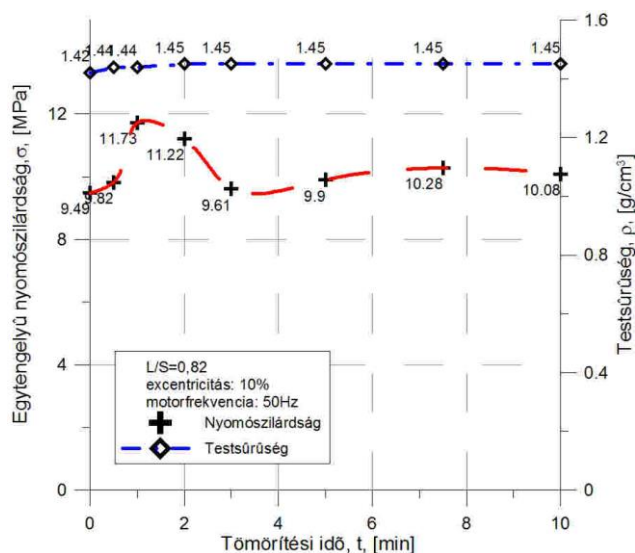
Vizsgálatok során megállapítottam, hogy a geopolimerek nyomószilárdsága mind az x (horizontális) mind az y irányú (vertikális) rezgéskitérés növelésével változott. Továbbá nagyobb y irányú kitérés kedvezett a nagyobb szilárdságú geopolimer kialakulásához.



3. ábra Rezgéskitérés hatása a geopolimerek egytengelyű nyomószilárdságára. a - Horizontális (x irányú), b - vertikális (y irányú) rezgéskitérés hatása

1/b.

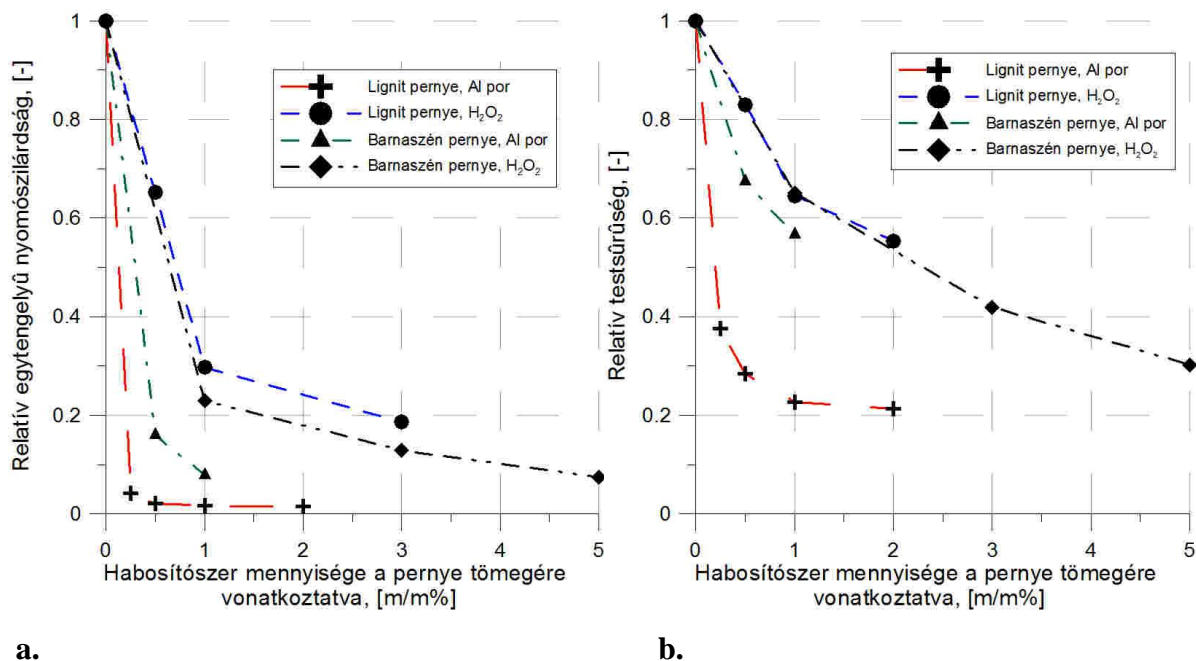
A kísérleti eredmények alapján megadható egy optimális tömörítési idő, ahol a geopolimerek szilárdsága maximális értéket vesz fel.



4. ábra Tömörítési idő hatása a geopolimer nyomószilárdságára és testsűrűségére

2. tézis

Kísérleti eredmények alapján megállapítottam, hogy a lignit és barnaszén pernye alapú geopolimer habok nyomószilárdság és testsűrűség változása a habosítószer adagolás során jellemzően hasonló trendet követ, azonban pernyetípustól és habosítószer típusától függően eltérő intenzitású változással jellemezhető.



5. ábra Alkalmazott habosítószer hatása a geopolimer habok egytengelyű nyomószilárdságára (a) és testsűrűségére (b)

3. tézis

Röntgendiffrakciós mérési eredmények alapján megállapítottam, hogy az alkalmazott habosítószer (Al por, H₂O₂) mind a lignit pernye, mind a barnaszén pernye alapú geopolimer habokban fázisváltozásokat idéztek elő. Lignit pernye alapú geopolimer habok (LGPH) esetén mindkét habosítószer adagolás hatására thénardit (Na₂SO₄), míg barnaszén pernye alapú geopolimer haboknál (BGPH) Al por adagolás hatására gibbsit [γ -Al(OH)₃] képződött.

1. táblázat Lignit pernye alapú geopolimer habok ásványi fázisai különböző habosítószer esetén

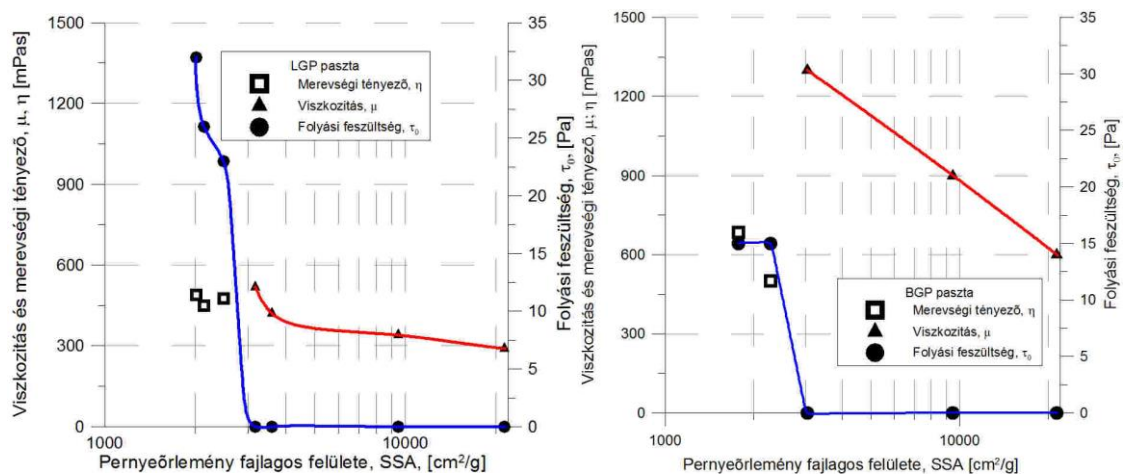
| Fázis neve | LGP | LGPH 0,25% Al | LGPH 2% Al | LGPH 0,5% H ₂ O ₂ | LGPH 3% H ₂ O ₂ |
|--------------------|-------|------------------|---------------|--|--|
| | m/m% | | | | |
| Kvarc | 15,1 | 12,8 | 13,5 | 14,5 | 11,3 |
| Mullit 2:1 | 1,1 | 0,3 | 0,2 | 0,9 | 0,8 |
| Maghemit | 4,9 | 4,3 | 3,9 | 5,3 | 3,7 |
| Albit | 1,7 | 2,2 | 2,4 | 0,0 | 1,5 |
| Kalcit | 4,0 | 7,5 | 5,3 | 4,1 | 7,5 |
| Akermanit | 3,9 | 4,0 | 3,6 | 4,5 | 3,3 |
| Hematit | 3,7 | 3,7 | 2,8 | 3,4 | 2,8 |
| Oligoklász An16 | 7,6 | 8,3 | 6,1 | 11,7 | 5,4 |
| Thénardit | - | - | 3,3 | 0,6 | 1,8 |
| Anhidrit | - | - | 0,2 | - | - |
| Rutil | - | - | 0,8 | - | - |
| Amorf | 58,0 | 57,0 | 58,0 | 55,0 | 62,0 |
| | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

2. táblázat Barnaszén pernye alapú geopolimer habok ásványi fázisai különböző habosítószer esetén

| Fázis neve | BGPH | BGPH 0,5 % Al | BGPH 1% Al | BGPH 1% H ₂ O ₂ | BGPH 3% H ₂ O ₂ |
|------------------------------|------|------------------|---------------|--|--|
| | m/m% | | | | |
| Kvarc | 2,0 | 2,6 | 2,3 | 2,5 | 1,9 |
| Mullit 2:1 | 11,2 | 13,1 | 12,4 | 12,6 | 10,5 |
| Cristobalit alacsony hőm. | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 0,5 |
| Maghemit | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,4 |
| Cristobalit magas hőm. | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Gibbsit | - | 1,4 | 2,7 | - | - |
| Termonátrit | - | - | - | - | 0,5 |
| amorf | 85,0 | 81,0 | 81,0 | 83,0 | 86,0 |
| szum | 100 | 100 | 100 | 100 | 100,0 |

4. tézis

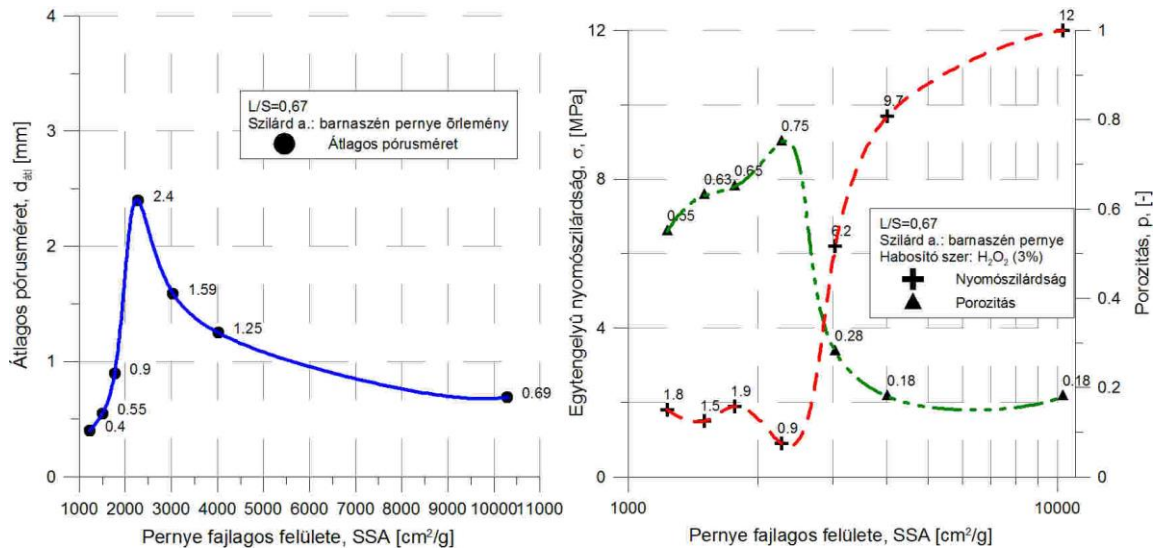
Megállapítottam, hogy adott pernyekoncentrációjú (55 m/m%), eredetileg nem-newtoni (Bingham-plasztikus) viselkedésű geopolimer paszta a pernyefinomság növelésének hatására - a pernye típusától (barnaszén vagy lignit alapú) függetlenül - newtoni reológiai viselkedésűvé válik egy adott pernye fajlagos felület (kb. 3000 cm²/g) elérése után. Ily módon a paszta reológiájából becsülhetők a geopolimer hab jellemzői, úgymint testsűrűség, porozitás.



6. ábra Örlési finomság hatása a lignit (a) és a barnaszén pernye (b) alapú geopolimer paszta folyási viselkedésére

5. tézis

Kísérletek során megállapítottam, hogy a geopolimer paszta folyási viselkedése jelentősen befolyásolja a hidrogén-peroxid habosítószerrel előállított barnaszén pernye alapú geopolimer habok porozitását, a pórusok méretét és gyakoriságát, ezáltal a nyomószilárdságát is.



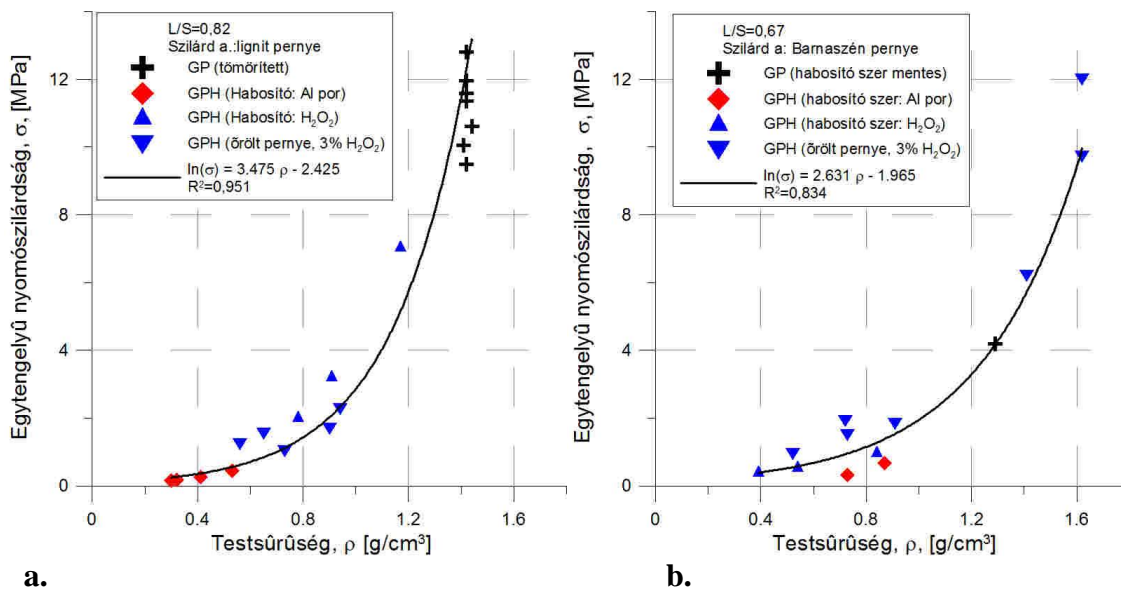
a.

b.

7. ábra Barnaszén pernye szemcsefinomságának hatása a geopolimer hab pórusméretére (a), illetve nyomószilárdságára és porozitására (b)

6. tézis

Megállapítottam, hogy azonos összetételű, de eltérő pernyefinomságú geopolimer pasztából készült geopolimer habok és geopolimerek egytengelyű nyomószilárdság és testsűrűség értékei közötti összefüggés exponenciális függvénnyel jellemezhető.



a.

b.

8. ábra Nyomószilárdság és testsűrűség közötti kapcsolat lignit pernye (a) és barnaszén pernye alapú geopolimereknél és haboknál (b)

3. táblázat Nyomószilárdság és testsűrűség közötti kapcsolat lignit és barnaszén pernye alapú geopolimereknél és haboknál

| Pernyetípus | Egyenlet | R ² |
|-------------|------------------------------------|----------------|
| lignit | $\ln(\sigma) = 3,475 \rho - 2,425$ | 0,951 |
| barnaszén | $\ln(\sigma) = 2,631 \rho - 1,965$ | 0,834 |

6. Az értekezés témakörében készült publikációk jegyzéke

Nemzetközi folyóiratban megjelent közlemények

1. Gábor Mucsi, Ádám Rácz, Zoltán Molnár, Roland Szabó, Imre Gombkötő, Ákos Debreczeni (2014): Synergetic use of lignite fly ash and metallurgical converter slag in geopolymer concrete. *Mining Science* 21 pp. 43-55.
2. Roland Szabó, Imre Gombkötő, Mária Svéda, Gábor Mucsi (2017): Effect of grinding fineness of fly ash on the properties of geopolymer foam. *Archives of Metallurgy and Materials* 62 (2B), pp. 1257-1261. (IF: 0.625 (2017))
3. Gábor Mucsi, Roland Szabó, Ádám Rácz, Ferenc Kristály, Sanjay Kumar (2019): Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolymers. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik - Mining Geological Petroleum Engineering Bulletin* 44 (1) pp. 27-36.

Hazai folyóiratban megjelent közlemények

1. János Lakatos, Roland Szabó, Ádám Rácz, Olivér Bánhidi, Gábor Mucsi (2016): Changing of fly ash leachability after grinding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 123 (1) Paper: 012023
2. Szabó Roland, Molnár Zoltán, Balogh Tamás, Mészáros Richárd (2016): Geopolimer alapú kompozit fejlesztése melléktermékekből. *Építőanyag* 68 (1) pp. 25-30.
3. Zoltán Molnár, Roland Szabó, Ádám Rácz, János Lakatos, Ákos Debreczeni, Gábor Mucsi (2017): Optimization of activator solution and heat treatment of ground lignite type fly ash geopolymers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 175, pp. 1-8.
4. Szabó Roland, Mucsi Gábor (2017): Lignittípusú, pernyealapú geopolimer habok előállítására és tulajdonságai. *Műszaki Földtudományi Közlemények* 86 (1), pp. 30-39.

5. Gábor Mucsi, Roland Szabó, Mária Ambrus, Balázs Kovács (2018): The development of fly ash – red mud based geopolymer. *Review of Faculty of Engineering Analecta Technica Szegedinensia* 12 (1) pp. 30-38.
6. Szabó Roland (2019): Lignit pernye alapú geopolimerek mechanikai tulajdonságainak szabályozása vibrációs tömörítéssel. *Építőanyag* 71 (2), pp. 66-71.

Nemzetközi konferencia kiadványokban megjelent közlemények:

1. Gábor Mucsi, Ákos Debreczeni, Roland Szabó, Zoltán Molnár (2014): Development of lignite based geopolymer. In: 28th microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Konferencia helye, ideje: Miskolc, Hungary, University of Miskolc, 2014. 04. 09.-10. paper A7.
2. Gábor Mucsi, János Lakatos, Zoltán Molnár, Roland Szabó (2014): Development of geopolymer using industrial waste materials. Book Series: International Conference on Environmental Engineering (ICEE), Konferencia helye, ideje: Vilnius Litvánia, 2014. 05. 22-23. paper 39.
3. Gábor Mucsi, Ádám Rácz, Zoltán Molnár, Roland Szabó, Ákos Debreczeni (2014): Effect of heat curing on lignite fly ash-based geopolymers. 18th International Conference on Waste Recycling, Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, University of Miskolc, 2014. 10. 09. pp. 1-7.
4. Roland Szabó, Gábor Mucsi (2015): Generally about geopolymer foams. In: 29th microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Konferencia helye, ideje: Miskolc, Hungary, University of Miskolc, 2015. 04. 09.-10. pp. 1-6.
5. Gábor Mucsi, Roland Szabó, Ádám Rácz, Zoltán Molnár, Ferenc, Kristály, Sanjay Kumar (2015): Influence of red mud on the properties of geopolymer derived from mechanically activated lignite fly ash. Bauxite Residue Valorization and Best Practices Conference, Konferencia helye, ideje: Leuven, Belgium 2015. 10. 05.-07. pp. 211-218.
6. Gábor Mucsi, Roland Szabó (2015): Properties of lignite fly ash based geopolymer foam. In: XIX. Waste Recycling Conference, Abstract, Konferencia helye, ideje: Krakkó, Lengyelország, 2015. 10. 22-23.
7. Roland Szabó, Imre Gombkötő, Mária Svéda, Gábor Mucsi (2016): Effect of grinding fineness of fly ash on the properties of geopolymer foam. Abstract in. 14th International Symposium on Novel and Nano Materials (ISNNM-2016), Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.07.03-2016.07.08. p. 115.

8. Szabó Roland, Nagy Sándor (2017): Geopolimerek mechanikai tulajdonságainak szabályozása tömörítéssel. In: Kékesi, Tamás (szerk.) MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, Miskolci Egyetem, 2017. 04. 20.-21. pp. 1-8.
9. Roland, Szabó, Gábor, Mucsi (2019): Effect of SiO₂/Al₂O₃ molar ratio on structure and mechanical properties of fly ash based geopolymer. In: Grozdanka, Bogdanovic; Milan, Trumic (szerk.) Proceedings IMPRC XIII International Mineral Processing and Recycling Conference. Konferencia helye, ideje: Belgrád, Szerbia, University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, 2019. 05. 08-10. pp. 452-458.

Hazai konferencia kiadványokban megjelent közlemények:

1. Mucsi Gábor, Rácz Ádám, Molnár Zoltán, Szabó Roland (2014): Ipari hulladékok építőipari hasznosításának lehetőségei. In: Török, Á; Puzder, T; Cserny, T (szerk.) Meddő? Hulladék? Nem! Haszonanyag! Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2014. 05. 15. pp. 33-41.
2. Mucsi Gábor, Szabó Roland, Kristály Ferenc, Gombkötő Imre (2018): Szilikát-tartalmú hulladékok együttes hasznosítása. In: Török, Ákos; Görög, Péter; Vásárhelyi, Balázs (szerk.) Mérnökgeológia - Kőzetmechanika 2018 = Engineering Geology - Rock Mechanics 2018 Budapest, Magyarország, BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, pp. 277-290.

Szakirodalmi jegyzék

- Bai, C., & Colombo, P., (2018). Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. *Ceramics International*, 44 (2018) pp. 16103–16118.
- Davidovits, J., 1988. Soft Mineralurgy and Geopolymers. In: Davidovits, J., Orlinski, J. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88*, 1, pp. 19–23.
- Davidovits, J., (1991). Geopolymers – Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- Davidovits, J., (2002). 30 years of successes and failures in geopolymer applications, Market trends and potential breakthroughs. In: *Geopolymer 2002 Conference*. Saint-Quentin (France), Melbourne (Australia): Geopolymer Institute
- Franchin, G., Scanferla, P., Zeffiro, L., et al., (2017). Direct ink writing of geopolymeric inks. *Journal of the European Ceramic Society*, 37 (6), pp. 2481–2489.
- Feuerborn H.J, Harris D., Heidrich, C. (2019). Global aspects on coal combustion products. *Eurocoalash Proceedings 2019*. Published by University of Dundee – Concrete Technology Unit, ISBN 978-0-9573263-2-3

- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*, 34 (9), pp. 1489-1498.
- Hardjito D. & Rangan B.V., (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Research report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth*
- Hegman, N., Pekker, P., Kristály, F., Váczi, T., (2011). Nanometrológia. *Váczi, T., ed., Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, ISBN: 9789636619817*
- Hlaváček, P., Šmilauer, V., Škvára, F., Kopecký, L., Šulc, R., (2015). Inorganic foams made from alkali-activated fly ash: Mechanical, chemical and physical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(2), pp. 703-709.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the mineral industry. *Mineral Engineering*, 20, pp. 1261-1277.
- Kumar, R., Kumar, S., Mehrotra, S.P. (2007). Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, pp. 157–159.
- Mucsi, G. (2016). Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review. *Építőanyag*, 68 (2) pp. 56-61.
- Mucsi, G., Kumar, S., Csőke, B., Kumar, R., Molnár, Z., Rácz, Á., Máday, F., Debreczeni, Á. (2015). Control of geopolymer properties by grinding of land filled fly ash. *International Journal of Mineral Processing*, 143, pp. 50–58.
- Singh, S., Aswath, M.U., Ranganath, R.V. (2018). Effect of mechanical activation of red mud on the strength of geopolymer binder. *Construction and Building Materials*, 177, pp. 91-101.
- Wallah, S. E., Rangan, B.V. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties, Research report GC2, *Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth*
- Živica, V., Balkovic, S., Drabik, M. (2011). Properties of metakaolin geopolymer hardened paste prepared by high-pressure compaction. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2206–2213.