

# Lignit pernye alapú geopolimerek mechanikai tulajdonságainak szabályozása vibrációs tömörítéssel

SZABÓ Roland

A Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolájának doktorjelöltje 2018. februárjától. Előkészítéstechnikai mérnöki MSc diplomáját 2013-ban szerezte a Miskolci Egyetemen. Jelenlegi kutatási témája a speciális tulajdonságú geopolimerek fejlesztése, különös tekintettel a habszerkezetű geopolimer termékekre, elsősorban ipari hulladékokat felhasználva.

SZABÓ ROLAND • Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet  
Erkezett: 2019. 01. 17. • Received: 17. 01. 2019. • <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.12>

## Kivonat

A geopolimerek tömörítése a betontechnológiában alkalmazott módszerekkel történhet, úgymint döngölés, csömöszölés, vibrációs tömörítés, kompaktálás. Jelen tanulmány a lignitpernye alapú geopolimerek vibrációs úton történő tömörítésével foglalkozik. A pernye főbb tulajdonságainak (szemcseméret-eloszlás, fajlagos felület, nedvességtartalom, ásványos és kémiai összetétel) meghatározása után a tömörítési paraméterek változtatásának (motor excentricitás (amplitúdó), frekvencia, tömörítési idő) a geopolimer próbatestek mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgáltam. A próbatestek egytengelyű nyomószilárdságának és testsűrűségének meghatározása 7 napos vizsgálati korban történt. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a tömörítési paraméterek változtatása a próbatestek testsűrűségében nem okozott jelentős eltérést, az értékek 1,4-1,45 g/cm<sup>3</sup> között változtak. A szilárdságvizsgálati eredményeknél azonban kimutatható volt a paraméterek módosításának hatása (az értékek 7,9-12,8 MPa között változtak). A vizsgálatok eredményei alapján tömörség és nyomószilárdság szempontjából optimális tömörítési paraméterek a következők voltak: excentricitás 10%, motorfrekvencia 50 Hz, tömörítési idő 1 perc.

Kulcsszavak: lignit pernye, geopolimer, vibrációs tömörítés, nyomószilárdság, testsűrűség

## 1. Bevezetés

A geopolimerek olyan új típusú, félig-kristályos, háromdimenziós szerkezettel rendelkező szerves-polimerek, amelyek szilárd aluminoszilikátok vagy alkáli szilikát tartalmú anyagok lúgos (NaOH, KOH, Na-szilikát, K-szilikát) vagy savas (foszforsav) aktiváló oldatban való oldásával és reakciójával állíthatók elő. Alapanyagként természetes vagy mesterséges aluminoszilikát ásványi anyagok, illetve ipari aluminoszilikát melléktermékek/hulladékok (úgymint erómi pernye, salak, agyag, vörösiszap, metakaolin, perlit, üveg vagy ezek keverékei) használhatók [1-6]. A geopolimerek tulajdonságait az alapanyag összetétele és reaktivitása, valamint az aktiváló oldat összetétele [6-10] mellett a kezelési hőmérséklet és idő [11-13], továbbá az alkalmazott tömörítési módszer is nagymértékben befolyásolja [13, 14].

A geopolimerek (illetve geopolimer betonok) tömörítése a betontechnológiában alkalmazott módszerekkel valósítható meg, melyek a következők lehetnek: vibrációs tömörítés, csömöszölés, döngölés valamint nagy nyomáson történő tömörítés (kompaktálás) [2, 8, 12-15]. A durva és/vagy finom aggregátumot nem tartalmazó geopolimerek esetén elsősorban vibrációs tömörítés az elterjedt.

Chindrprasirt és mtsai [12] lignit pernye alapú geopolimerek bedolgozhatóságát és szilárdságát vizsgálták különböző koncentrációjú NaOH (10, 15, 20 M) és Na-szilikát oldat eltérő arányú keverékét alkalmazva. A próbatestek tömörítését vibrációs asztalon végezték 10 s-ig. Az eredmények alapján megállapították, hogy a NaOH mennyiségének és koncentrációjának növelésével csökkent a geopolimer paszta bedolgozhatósága és ezáltal a próbatestek szilárdságértékei is.

Živica és mtsai [14] nagy nyomáson (300 MPa) kompaktált metakaolin alapú geopolimerek és kézi tömörítéssel

előállított referenciatestek tulajdonságait hasonlították össze. Eredményeik alapján arra a megállapításra jutottak, hogy a nagy nyomáson tömörített próbatestekben megnőtt az azonos méretű pórusok mennyisége, és egy sokkal finomabb pórusszerkezet (átlagos pórusméret 59 nm) alakult ki bennük, mint a referencia mintákban (átlagos pórusméret 814 nm). Továbbá azt is megfigyelték, hogy a tömörítés homogénebb szemcseszerkezetet eredményezett, melyet a szemcsék felületének oldásával és ezáltal nagyobb fokú geopolimerizációs folyamattal magyaráztak.

Cheng és mtsai [15] szénmeddő alapú geopolimerek előállítási körülményeit és tulajdonságait vizsgálták. A kísérleteik során az aktiváló oldat/szilárd anyag arány mellett a NaOH koncentráció és NaOH/Na-szilikát arány hatását vizsgálták. A geopolimer paszta tömörítését vibrációs asztalon végezték 60 s-ig a kötőanyagban lévő levegő eltávolítása érdekében.

Jelen tanulmány a pernyealapú geopolimer tömörségének vibrációs úton történő szabályozásával foglalkozik. Az elvégzett vizsgálatok kiterjedtek a vibrációs asztal motorjának excentricitás és frekvenciamódosításával, illetve a tömörítési idő változtatásával a mintatestek nyomószilárdságában és testsűrűségében bekövetkező változások detektálására. Emellett vizsgáltam tömörítés hatására a geopolimer anyagszerkezetében bekövetkező változásokat is.

## 2. Anyagok, vizsgálati módszerek

Kísérletek során lignittüzelésből származó nyers erómi pernyét használtam, amely főbb jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza. A pernye kémiai összetételének meghatározása röntgenfluoreszcens spektroszkópia elemzéssel (XRF) történt, amelynek eredményét a 2. táblázat mutatja.

Származás	Mátrai Erőmű (Visonta, Magyarország)
Nedvességtartalom (%)	0,27
Halmazsűrűség (g/cm <sup>3</sup> )	0,72
Szemcsesűrűség (g/cm <sup>3</sup> )	1,93
x <sub>10</sub> (μm)	10,8
x <sub>50</sub> (μm)	52
x <sub>80</sub> (μm)	119,3
Fajlagos felület (cm <sup>2</sup> /g)	1152

1. táblázat Lignit pernye jellemzői  
Table 1. Properties of lignite fly ash

Komponens	Pernye alkotó mennyisége, m/m%
SiO <sub>2</sub>	48,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,97
Na <sub>2</sub> O	0,37
K <sub>2</sub> O	1,66
CaO	11,76
MgO	3,34
TiO <sub>2</sub>	0,492
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,264
MnO	0,171
SO <sub>3</sub>	0,575
LOI*	2,2
egyéb	5,678

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

2. táblázat Lignitpernye kémiai összetétele (XRF vizsgálat alapján)  
Table 2. Chemical composition of lignite fly ash (XRF measurement)

Az elemzés alapján megállapítható, hogy a pernyében lévő SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aránya 3,34, valamint a SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> és Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tartalom a pernye mintegy 73,49 m/m%-át adja. Emellett a mintaanyag relatíve magas CaO tartalommal (11,76 %) is rendelkezett.

A mintaanyag ásványos összetételének meghatározása röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálati módszerrel (XRD) történt. A pernye fő ásványos összetevői a következők voltak: kvarc (20,34%), maghemit (4,22), hematit (3,91%), anhidrit (7,08%), albit (4,71%), albit K0.16 (5,58%), CaO (1,61%) és amorf rész (52,5%).

Asztal hasznos felülete	700 × 900 mm (0,63 m <sup>2</sup> )
Motor típusa	Italvibras MVS1 10/310-890-I
Motor teljesítménye (50 Hz)	0,35 kW
Motor fordulatszáma (50 Hz-en)	1000 1/perc (frekvenciaváltóval szabályozható)
Excenter súlyok	a bezárt szög állítható (0-180°)
Centrifugális erő (50 Hz)	3,14 kN

3. táblázat Vibrációs asztal műszaki jellemzői  
Table 3. Technical characteristics of vibrating table

A geopolimerek előállításához használt aktiváló szer 8 M-os NaOH és vízüveg (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) oldatok keverékéből állt. A NaOH oldatot 99,99% tisztaságú szilárd NaOH granulátumok desztillált vízben való oldásával készítettem, míg a vízüveg 2,7% K<sub>2</sub>O-ot, 13,7% Na<sub>2</sub>O-ot, 25,3% SiO<sub>2</sub>-ot és 58,3% H<sub>2</sub>O-ot tartalmazott.

A geopolimer próbatestek tömörítésére szolgáló vibrációs asztal főbb műszaki jellemzői a 3. táblázatban találhatóak.

### 3. Kísérletek

A tömörítési vizsgálatok során először a geopolimer pasztát állítottam elő, amely a lignit pernye és az aktiváló oldat 2 percig történő keverésével történt. Az aktiváló szer/pernye aránya (L/S arány) 0,82 volt. A geopolimer paszta összetételének és hőkezelési körülményeinek (hőmérséklet, kezelési idő) megválasztása korábbi kísérletek eredményei [9] alapján történt. A kapott pasztát előre kiolajozott, 35 mm átmérőjű és 65 mm magasságú műanyag hengeres formákba töltöttem, majd vibrációs asztalon különböző paraméter beállítások mellett (motor excentricitás, frekvencia) egy percig tömörítettem. Tömörítés után a próbatestek hőkezelése történt, amelyet két lépcsőben hajtottam végre. Először a geopolimereket 24 órán keresztül levegőtől elzárva, kondicionáló kamrában 23 °C-on tároltam, majd elektromos kemencében 6 órán keresztül 30 °C-on hőkezelttem. Hőkezelést követően a próbatestek tárolása a nyomószilárdság-vizsgálat elvégzéséig kondicionáló kamrában történt 23 °C-on és 90%-os páratartalom beállítása mellett. A szilárdságvizsgálatra 7 napos korbán került sor. Minden esetben 5 db próbatestet vizsgáltam, és a kapott eredmények átlagértékét diagramon ábrázoltam. A vibrációs asztal üzemi paraméterváltoztatása mellett a tömörítési idő hatását is vizsgáltam. A kísérlet során 0,5; 1; 2; 3; 5 és 10 perces tömörítést alkalmaztam. A próbatestek nyomószilárdsága mellett meghatároztam azok testsűrűségét, valamint Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FT-IR) elemzéssel a szerkezetükben - tömörítés hatására- bekövetkező változásokat.

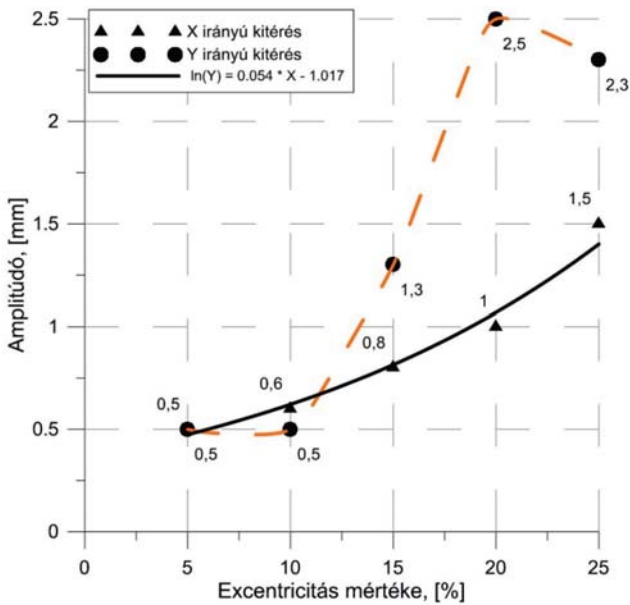
## 4. Eredmények

### 4.1. Motor excentricitás (amplitúdó-kitérés) változtatásának hatása

A motor excentricitásának változtatásával a vibrációs asztallap x és y irányú kitérésének mértékét (amplitúdóját) tudjuk módosítani. Az 1. ábra jól szemlélteti, hogy a vibromotoron található excentersúlyok pozíciójának módosításával hogyan változott az asztallap helyzete vibráció során. Az excentricitás mértékének növelésével az asztallap horizontális (x irányú) és vertikális (y irányú) kitérése 20%-os excentricitás értékig növekedett, majd ezt követően az y irányú kitérésben kismértékű csökkenés mutatkozott. Ezzel szemben az asztallap x irányú kitérése az excentricitás mértékének változtatásával növekedett. Ez a változás az

$$\ln(Y) = 0,054 \cdot X - 1,017 \quad (1)$$

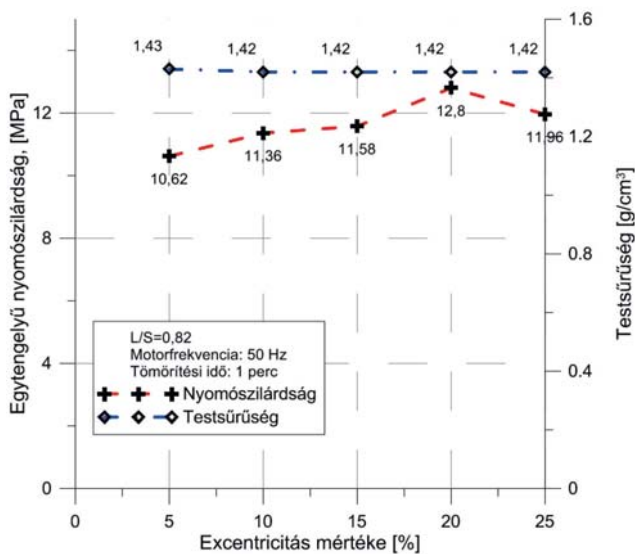
exponenciális függvénnyel jól jellemezhető, ahol a determinációs együttható értéke R<sup>2</sup>=0,982.



1. ábra Vibrációs asztal amplitúdójának változása az excentricitás függvényében  
Fig. 1. Variation of amplitude of the vibrating table as function of the eccentricity

A 2. ábra a próbatestek egytengelyű nyomószilárdság és testsűrűség értékeit ábrázolja a motor excentricitás változásának függvényében. Az ábra alapján elmondható, hogy a vibrációs asztal amplitúdó változásának mértéke hatással volt a geopolimerek nyomószilárdságára, míg a testsűrűségükben nem történt jelentős változás, azok átlagosan 1,42-1,43 g/cm<sup>3</sup> közötti értéket vettek fel. Az excentricitás mértékének növelésével a geopolimerek nyomószilárdságában növekedés tapasztalható egy bizonyos értékig, majd csökkenés figyelhető meg. A legnagyobb szilárdságú geopolimer (12,8 MPa) 20% excentricitás beállításánál készült.

Fontos megjegyezni, hogy az irodalom alapján a pernye alapú geopolimerek szilárdsága a nyersanyag őrléssel megvalósított mechanikai aktiválásával fokozható [16-18].



2. ábra Geopolimer nyomószilárdságának és testsűrűségének változása az excentricitás függvényében  
Fig. 2. Compressive strength and specimen density of geopolymers as function of the eccentricity

A további vizsgálatot 10%-os beállítás mellett végeztem, mivel magasabb excentricitásnál (20 és 25%) az asztal az irányú kitérésében bekövetkező ugrásszerű növekedés (1. ábra) a vibrációs asztal rögzítését hosszabb üzemeltetés esetén károsította volna. Továbbá a nyomószilárdság értékek relatív szórása (4. táblázat) is ennél a beállításnál volt a legkisebb (9,4%), míg a szilárdság értékek közötti legnagyobb eltérés 15%-os beállításnál mutatkozott (23,1%).

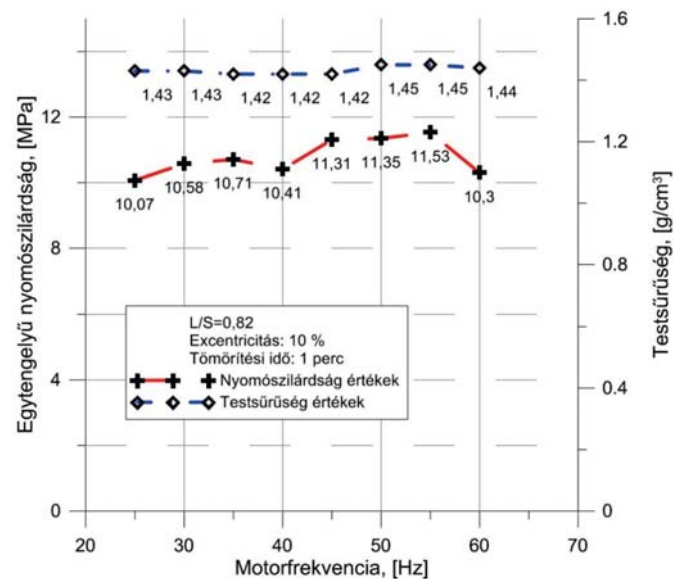
Motorexc. [%]	Nyomószil. relatív szórása [%]	Testsűrűség relatív szórása [%]
5	13,7	0,8
10	9,4	0,4
15	23,1	0,3
20	11,9	0,4
25	16,5	0,60

4. táblázat Geopolimer nyomószilárdságának és testsűrűségének relatív szórása az excentricitás változtatásával

Table 4. Coefficient of variation of compressive strength and density of geopolymers as function of the eccentricity

#### 4.2 Motorfrekvencia változás hatása

Adott excentricitás (10%) és különböző motorfrekvencia beállítás mellett tömörített geopolimerek nyomószilárdságában és testsűrűségében bekövetkező változásokat a 3. ábra szemlélteti. Az ábra alapján megfigyelhető, hogy a rezgésszám (frekvencia) növelésével a geopolimerek átlagos nyomószilárdsága is növekedett. Ugyanakkor az is megállapítható, hogy a vibrációs asztal túl alacsony (<40 Hz) és túl magas (60 Hz) rezgésszámon való üzemeltetése a geopolimerek mechanikai stabilitására már kedvezőtlenül hatott. Ezekben az esetben a geopolimerek 10,07-10,71 MPa közötti nyomószilárdsággal rendelkeztek. Ezzel szemben 45-55 Hz között készült próbatestek szilárdságértékei 11,31-11,53 MPa tartományban mozogtak.



3. ábra Geopolimer nyomószilárdságának és testsűrűségének változása a frekvencia függvényében  
Fig. 3. Compressive strength and specimen density of geopolymers as function of the motor frequency

A geopolimerek testsűrűségében nem történt jelentős változás, azok 1,42-1,45 g/cm<sup>3</sup> között változtak. Legnagyobb testsűrűsége (1,45 g/cm<sup>3</sup>) 50 és 55 Hz-en készült próbatesteknek volt. (Ezekben az esetekben mértük a legnagyobb nyomószilárdságokat is.)

Az eredmények alapján megállítható, hogy a legmagasabb nyomószilárdsággal rendelkező geopolimerek a vibrációs asztal 45-55 Hz frekvencia tartományban való üzemeltetésével állíthatók elő. Továbbá a próbatestek nyomószilárdságának relatív szórása ezekben a tartományokban nem haladta meg a 13 %-ot (5. táblázat).

Motorfrekvencia [Hz]	Nyomószil. relatív szórása [%]	Testsűrűség relatív szórása [%]
25	5,8	0,7
30	9,6	0,7
35	14,9	0,5
40	12,8	0,4
45	10,9	0,3
50	12,8	0,6
55	10,6	0,5
60	12,4	0,7

5. táblázat Geopolimer nyomószilárdságának és testsűrűségének relatív szórásának alakulása a motor frekvencia változtatásával

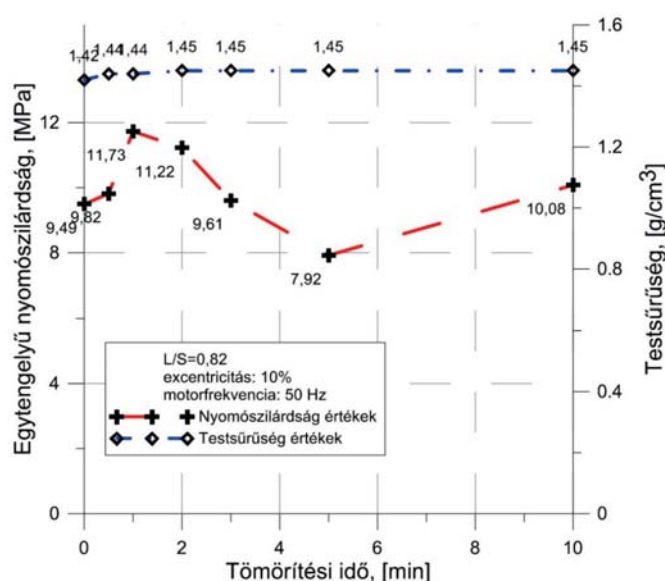
Table 5. Coefficient of variation of compressive strength and density of geopolimer as function of the motor frequency

### 4.3 Tömörítési idő

Mivel 50 és 55 Hz-en közel azonos tulajdonságú geopolimerek készíthetők, ezért a tömörítési idő változtatásának hatását 50 Hz (hálózati) frekvencia (és 10% excentricitás) beállításon vizsgáltam.

A vizsgálat eredményeit a 4. ábra szemlélteti, míg a nyomószilárdság és testsűrűség értékek relatív szórását a 6. táblázatban foglaltam össze. Az ábra alapján megfigyelhető, hogy a geopolimerek nyomószilárdsága egy adott tömörítési ideig (1 perc) növekedett, majd ezt követően 5 perces tömörítésig csökkenő tendenciát mutatott. Ezután ismét szilárdságnövekedés tapasztalható. Ez a fluktuáció vélhetően a hosszabb ideig tartó tömörítés hatására a keverékben bekövetkező aktiváló oldat- szilárd anyag bizonyos mértékű szétválásával magyarázható, ami rendezetlen geopolimer szerkezet kialakulásához vezethetett. A legnagyobb szilárdságot 1 perc tömörítési időnél mértem (11,73 MPa), míg legkisebb szilárdsággal az 5 perces tömörített próbatestek rendelkeztek (7,92 MPa). A geopolimerek testsűrűsége a tömörítési idő növelésével, 2 perces tömörítésnél érte el a maximumot (1,45 g/cm<sup>3</sup>), ezt követően az értékük nem változott. A nem tömörített geopolimerek testsűrűsége átlagosan 1,42 g/cm<sup>3</sup> volt.

A geopolimerek nyomószilárdság értékeinek relatív szórását megvizsgálva (6. táblázat), megállapítható, hogy az átlagtól való legnagyobb eltéréssel a tömörítetlen és az 5 perces tömörített geopolimerek rendelkeztek, mindkét esetben az eltérés 20% fölötti volt (21,1 illetve 29,6%). A többi esetben az eltérés 15% alatt maradt (6,7-14,2%).



4. ábra Tömörítési idő hatása a geopolimer nyomószilárdságára és testsűrűségére  
Figure 4. Effect of compression time on the compressive strength and specimen density of geopolimer

Tömörítési idő [min]	Nyomószil. relatív szórása [%]	Testsűrűség relatív szórása [%]
0	21,1	0,3
0,5	12,6	0,8
1	14,2	0,3
2	9,8	0,6
3	14,2	0,3
5	29,6	0,4
10	6,7	0,6

6. táblázat Geopolimer nyomószilárdságának és testsűrűségének relatív szórása változása a tömörítési idő függvényében

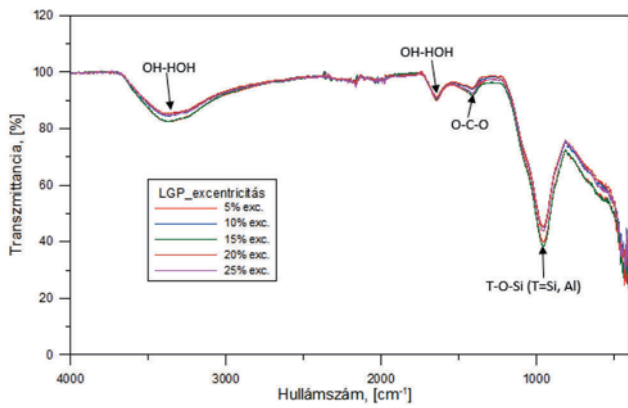
Table 6. Coefficient of variation of compressive strength and density as function of the compression time

### 4.4 FT-IR eredmények

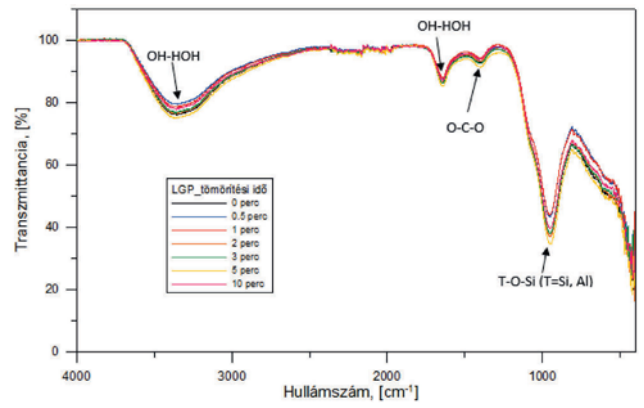
#### 4.4.1 Excentricitás

Az 5. ábra különböző excentricitáson tömörített geopolimerek FT-IR spektrumát mutatja. Az ábrán látható, hogy az egyes spektrumok közel azonos lefutásúak. Eltérés leginkább az 1415 cm<sup>-1</sup>-nél jelentkező sávokban (csúcsokban) mutatkozik, amely karbonát jelenlétére (O-C-O kötések nyújtó rezgéseire) utal [19]. E sávok intenzitása 10 és 20% excentricitáshoz tartozó geopolimereknél volt a legkisebb, amely magyarázatul szolgálhat a magasabb nyomószilárdság értékekre (10% exc.-nál 11,4 MPa, míg 20% exc.-nál 12,8 MPa). A geopolimerek 15% excentricitásnál is még átlagosan 11,5 MPa nyomószilárdsággal rendelkeztek, viszont az értékek ebben az esetben igen nagy relatív szórást mutattak (23%), ami az egyes próbatestekben fellépő karbonát képződés okozta szilárdságcsökkenés miatt következhetett be.





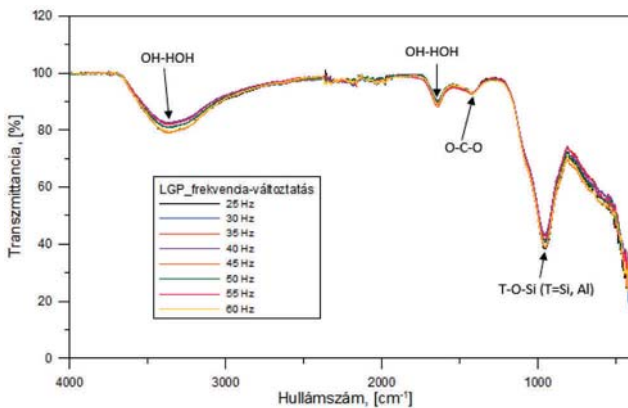
5. ábra Különböző excentricitáson tömörített geopolimerek FT-IR spektrumai  
Fig. 5. FT-IR spectra of geopolymers (compression on various eccentricity)



7. ábra Különböző ideig tömörített geopolimerek FT-IR spektrumai  
Fig. 7. FT-IR spectra of geopolymers (compression on various compression time)

#### 4.4.2 Frekvencia

Ha a különböző frekvencián tömörített geopolimerek FT-IR spektrumait megvizsgáljuk (6. ábra), megállapítható, hogy azokban nincs számottevő eltérés, a sávok szélessége és intenzitása is közel azonos volt. Mind a 3360  $\text{cm}^{-1}$ -nél és 1645  $\text{cm}^{-1}$ -nél jelentkező OH-HOH kötésekhez (víz), mind az 1416  $\text{cm}^{-1}$ -nél jelentkező O-C-O kötésekhez (karbonát) valamint a 955  $\text{cm}^{-1}$ -nél lévő T-O-Si (T=Si, Al) kötésekhez tartozó sávok (csúcsok) intenzitása és szélessége azonosnak tekinthető.



6. ábra Különböző frekvencián tömörített geopolimerek FT-IR spektrumai  
Fig. 6. FT-IR spectra of geopolymers (compression on various frequency)

#### 4.4.3 Tömörítési idő

A 7. ábra a különböző ideig tömörített geopolimerek FT-IR spektrumát mutatja. Az ábrán látható, hogy az egyes geopolimerek spektrumaiban itt sincs számottevő eltérés. Ez alól kivételt képez az 5 perces tömörített geopolimer spektruma, amely kissé elkülönül a többitől. Eltérés leginkább az 1401  $\text{cm}^{-1}$ -nél jelentkező csúcson mutatkozik, ami kissé nagyobb intenzitású, mint a többi próbatétel esetén. Fontos megjegyezni, hogy a geopolimer 5 perces tömörítésnél rendelkezett a legkisebb nyomószilárdsággal (7,9 MPa), ami vélhetően a jelentősebb karbonátképződés miatt következett be. További eltérés a 950  $\text{cm}^{-1}$  környékén jelentkező csúcsok intenzitásában mutatkozott, ami a T-O-Si (T=Si, Al) kötések aszimmetrikus nyújtó rezgéseire utal. Geopolimerizáció szempontjából ennek a csúcsonak a változása (csúcsmagasság és szélesség) jellemző a geopolimerizáció fokára [20].

### 5. Megállapítások

A kutatómunka során geopolimerek vibrációs úton történő szabályozásával foglalkoztam. Vizsgáltam különböző tömörítési paramétereknek (excentricitás, frekvencia, tömörítési idő) a geopolimerek mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását.

A kísérletek eredményei alapján megállapítható, hogy ezen paraméterek változtatása jelentős hatással volt a geopolimerek nyomószilárdságára, míg a testsűrűségben nem volt lényeges változás. Az excentricitás növelése a vibrációs asztallap nagyobb mértékű x és y irányú kitérését (amplitúdó változását) eredményezte, amely változás a geopolimerek nyomószilárdságában is növekedést mutatott.

A motorfrekvencia változtatása során megállapítottam, hogy a rezgésszám növelése a geopolimerek mechanikai stabilitását javította, ugyanakkor túl magas (60 Hz) frekvenciaértéknél szilárdságromlás következett be. Optimális tartomány 45-55 Hz között volt.

A tömörítési idő is jelentős hatást gyakorolt a geopolimerek tulajdonságaira. A túl rövid (<1 perc) és túl hosszú (>2 perc) ideig tartó tömörítés relatíve alacsony szilárdságú (<10 MPa) geopolimert eredményezett, viszont az optimális tömörítési idő (1 perc) megválasztásával 11,7 MPa szilárdságú geopolimert állítottam elő.

Az FTIR mérések eredményei alapján megállapítható, hogy a tömörítési paraméterek változtatása a geopolimerek szerkezetében nem okozott jelentős átalakulást. Geopolimerizáció szempontjából fontos sávok (csúcsok) mind intenzitásukban mind szélességükben azonosak (vagy közel azonosak) voltak. Új sávok nem jelentek meg egyik esetben sem.

Az eredmények alapján tömörség és nyomószilárdság szempontjából optimális tömörítési paraméterek a következők voltak: excentricitás 10%, motorfrekvencia 50 Hz, tömörítési idő 1 perc. Ezen paraméter-beállítások mellett átlagosan 11,73 MPa nyomószilárdságú geopolimer állítható elő, amely érték a tömörítetlen geopolimerek szilárdságához képest (9,49 MPa) 23,6%-os szilárdságnövekedést jelent. A geopolimerek testsűrűsége a fentebb említett beállításokkal átlagosan 1,44  $\text{g/cm}^3$ , ami kismértékű növekedést mutat a tömörítetlen geopolimerek sűrűségéhez képest (1,42  $\text{g/cm}^3$ ).

## 6. Köszönetnyilvánítás

A tanulmányban ismertetett kutatómunka 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 valósult meg. A szerző köszönetét fejezi ki Móricz Ferenc tanársegédnek és Dr. Kristály Ferenc tudományos főmunkatársnak a pernyeminta kémiai és ásványos összetételének meghatározásáért, Dr. Debreczeni Ákos egyetemi docensnek az egytengelyű nyomószilárdságvizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségével, továbbá Dr. Mucsi Gábor és Dr. Nagy Sándor egyetemi docensnek a témában való irányítatásukért.

### Irodalomjegyzék

- [1] Davidovits, J. (2011): Geopolymer chemistry and application. *Institut Geopolimère*, ISBN: 9782951482050 pp. 283, 286.
- [2] Mucsi G. – Lakatos J. – Molnár Z. – Szabó R. (2014): Development of geopolymer using industrial waste materials. ENVIRONMENTAL ENGINEERING, eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9
- [3] Komintsas, K. – Zaharaki, D. (2007): Geopolymerisation: A review and prospects for the mineral industry. *Mineral Engineering* 20, pp. 1261-1277. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>
- [4] Bai, C. – Colombo, P. (2018): Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. *Ceramics International* 44:(14), pp 16103-16118, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.219>
- [5] Vaou, V. – Panias D. (2010): Thermal insulating foamy geopolymers from perlite. *Minerals Engineering* 23 (14) 1146–1151. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.015>
- [6] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.096>
- [7] Davidovits, J. (1994): Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *J. Mater. Educ.* 16, pp. 91-139.
- [8] Kumar, S. – Kumar, R., (2011): Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International* 37, pp. 533–541. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.038>
- [9] Molnár, Z. – Szabó, R. – Rácz, Á. – Lakatos, J. – Debreczeni, Á. – Mucsi, G. (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. <https://doi:10.1088/1757-899X/175/1/012046>
- [10] Tchakouté, H. K. – Rüscher, C. H. – Kamseu, E. – Andreola, F. – Leonelli, C. (2017): Influence of the molar concentration of phosphoric acid solution on the properties of metakaolin-phosphate-based geopolymer cements. *Applied Clay Science* 147, pp. 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.036>
- [11] Palomo, A. – Grutzeck, M. W. – Blanco, M. T. (1999): Alkali activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research.* 29 pp. 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- [12] Chindaprasirt, P. – Chareerat, T. – Sirivivatnanon, V. (2007): Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29 (3); pp. 224-229. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>
- [13] 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,
- [14] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.004>
- [15] Cheng, Y. – Hongqiang, M. – Hongyu, C. – Jiabin, W. – Jing, S. – Zonghui, L. – Mingkai Y. (2018): Preparation and characterization of coal gangue geopolymers. *Construction and Building Materials* 187, pp. 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.220>
- [16] Mucsi, G. (2016):\_Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review. *Építőanyag* 68:(2) pp. 56-61. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>
- [17] Máday F. – Kristály F. – Mucsi G. (2015): Microstructure, mineralogy and physical properties of ground fly ash based geopolymers. *Ceramics-Silikaty* 59:(1) pp. 70-79.
- [18] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.007>
- [19] 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 Engineering Aspects* 301 (1-3), pp.:246-254. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.12.064>
- [20] Rattanasak, U. – Chindaprasirt, P. (2009): Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering* 22 (12), pp. 1073–1078. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>

### Control of mechanical properties of lignite fly ash based geopolymers by vibrating compression

The compression of geopolymer (and geopolymer concrete) can be performed by the usual methods used in the concrete technology, like compaction, tamping, and vibrating compression. This study focused on the vibrating compression of lignite fly ash based geopolymers. After the determination of the main properties of fly ash (like particle size distribution, specific surface area, moisture content, mineral and chemical composition) the effect of changing compression parameters (eccentricity, frequency and compression time) were investigated on the geopolymer properties. The uniaxial compressive strength and specimen density were measured at age of 7 days. Based on the results can be stated the changing of compression parameters resulted just a slight change on the specimen density (the values were between 1.4-1.45 g/cm<sup>3</sup>), but the compressive strength of geopolymer changed significantly (the values were between 7.9-12.8 MPa). Optimal compression parameters were the following: eccentricity of 10%, motor frequency of 50 Hz and the compression time of 1 minute. Keywords: lignite fly ash, geopolymer, vibrating compression, compressive strength, specimen density

#### Ref.:

Szabó Roland: *Lignit pernye alapú geopolimerek mechanikai tulajdonságainak szabályozása vibrációs tömörítéssel*  
Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 71, No. 2 (2019), 66–71. p.  
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.12>