

Geopolimer alapú kompozit fejlesztése melléktermékekből

SZABÓ ROLAND • Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola
 ▪ ejtszabor@uni-miskolc.hu

MOLNÁR ZOLTÁN • Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola
 ▪ molnarz87@gmail.com

BALOGH TAMÁS • Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar
 ▪ tamas.balogh22@gmail.com

MÉSZÁROS RICHÁRD • Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar
 ▪ ricsi.meszáros92@gmail.com

Érkezett: 2015. 12. 22. • Received: 22. 12. 2015. • <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.5>

Development of geopolymer based composite from secondaries

This paper is focused on the development of geopolymer-glass foam composite, which can be produced by encapsulation of glass waste based lightweight aggregate in geopolymer matrix. The aim of the investigation was to produce glass foam with the optimum pore size and the most homogeneous particle size distribution and to examine the encapsulation of these materials in geopolymer. The glass foam was manufactured by calcination of green pellets which contained mixture of waste glass, bentonite and dolomite powder as raw materials. The appropriate porosity was achieved at 850 °C calcination temperature and 7.5 min residence time. Significant coalescence of the cells was appeared when the glass foam particles were heat-treated at higher temperature (900 °C). On the other hand, lower temperature (800 °C) generated only small amount and small size of pores. Additionally, the compressive strength and specimen density of geopolymer-glass foam composite was investigated as well as function of dosage and size of glass foam granulates. Increasing amount and size of glass foam decreased the specimen density as well as the compressive strength of the composite. The highest compressive strength (4.7 MPa) was reached by addition of 2-4 mm glass foam aggregate in the portion of 40 V/V %. The optical microscope images showed that the cementation between the glass foam particles and geopolymer matrix was uniform in the cross section, without inclusions. Based on the experimental results it can be concluded that the geopolymer-glass foam composite may be an alternative solution for the innovative utilization of glass waste and fly ash, which can be used in the construction industry.

Keywords: glass foam, geopolymer, grinding, composite, heat insulation material.

Kulcsszavak: üveghab, geopolimer, őrlés, kompozit, hőszigetelő anyag.

1. Bevezetés

Kutatási területünk összetett jellegéből adódóan több, jelenleg is fejlesztés alatt álló iparág és terméktípus jellemzéséről kell bevezetést adnunk, hogy az eredményeink komplexitását kellőképpen ismertetni tudjuk. Így elsőként az üveghulladékokról és azok kalcinálás vagy olvasztás útján történő újrahasznosításáról, majd az erőműi pernyékről és geopolimer kötőanyag előállítására történő felhasználásáról nyújtunk rövid összefoglalót.

Magyarországon évente 200-250 ezer tonna üveghulladék keletkezik, melynek szeparálása után a színes üveget lerakják, a szintelen üveg 5-15 %-át pedig különböző technológiákkal újrahasznosítják, ami kis hasznosítási arány. Erre a problémára nyújthat megoldást az üveghab alapú habkavics előállítása. Ez a habkavics egy olyan, magas üvegtartalmú anyag, amelynél az üveget megfelelő szemcseméretűre őrlve és összetételétől függően különböző mennyiségű gázképző anyaggal homogenizálva, az üveg lágyulási pontjáig melegítve a gázképzők okozta gázfelszabadulás (pl. CO₂) egy kis halmazsűrűségű anyagot eredményez. A keletkező terméket kötőanyagba ágyazva (beton, gyanta) töltőanyagként lehet hasznosítani [1].

König és szerzőtársai [9] katódugárcső panelüveget és habképző anyagként CaCO₃-ot felhasználva készítettek üvegha-

bot. A 63 µm alá őrlött üvegorhoz 1-10 m/m%-ban adagoltak CaCO₃-ot. Vizsgálták a hozzáadott CaCO₃ mennyiségének, a habosodási hőmérsékletnek és időnek a termék sűrűségére, porozítására és homogenitására gyakorolt hatását. Az eredmények azt mutatták, hogy a CaCO₃ bomlási kinetikája – a fejlődő CO₂ által meghatározva – erősen befolyásolja a habosodási eljárást. Az optimális beállítások mellett készített termék sűrűsége 260 kg/m³, míg a hővezetési tényezője 50-53 mW/m K volt.

Benhaoua és szerzőtársai [10] hulladék üveg és CaCO₃ habképző anyag felhasználásával készítettek az építőanyagoknál könnyebb, jó hő- és hangszigetelő tulajdonságokkal rendelkező üveghabot. Vizsgálataik eredményei alapján megállapították, hogy a CaCO₃ mennyiségének növelése nagyobb porozítású és kisebb hővezető-képességgel rendelkező termék állítható elő, mely az építőiparban hasznosítható lehet.

Hazai szerzők tanulmányaikban beszámolnak egy CRT üveghulladékból gyártott habkavics alapú könnyűbeton mechanikai tulajdonságairól saját kísérleti eredményeik alapján [11-12]. A hazai fejlesztésű anyag megfelelő nyomószilárdsággal és kedvezően kis vízfelvétellel rendelkezik, fagyállósága és kopásállósága a könnyű adalékanyagoktól elvárható mértéknek megfelel [13-14], az ezzel készülő könnyűbetonokban a betonacélok tapadása kedvező [15].

SZABÓ Roland

A Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolájának PhD hallgatója 2014. szeptemberétől. Előkészítéstechnikai mérnöki MSc diplomáját 2013-ban szerezte a Miskolci Egyetemen. 2013. júliusa és 2014. szeptembere között tanszéki mérnök a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében. Jelenlegi kutatási témája a speciális tulajdonságú geopolimerek fejlesztése, különös tekintettel a habszerkezetű geopolimer termékre.

MOLNÁR Zoltán

A Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolájának PhD hallgatója. Előkészítéstechnikai mérnöki MSc diplomáját 2012-ben szerezte a Miskolci Egyetemen. Kutatási témája a geopolimerek tulajdonságainak szabályozása mechanikai aktíválással.

BALOGH Tamás

2016-ban végzett a Miskolci Egyetemen Műszaki Földtudományi alapszakon, Nyersanyagelőkészítési szakirányon. A 2015-ös Országos Tudományos Diákköri Konferencián II. helyezést ért el.

MÉSZÁROS Richárd

2015-ben végzett a Miskolci Egyetemen Műszaki Földtudományi alapszakon, Nyersanyagelőkészítési szakirányon. A 2015-ös Országos Tudományos Diákköri Konferencián II. helyezést ért el.

Az üveghulladék mellett komoly probléma az erőműi pernye hasznosítása. A világ energiatermelésének jelentős részét (kb. 30%-át) a mai napig széntüzelésű erőművekkel látják el. Az itt keletkező pernye környezeti kockázatot jelent. Csak Magyarországon évente kb. 2 millió tonna pernye keletkezik, amelynek nagy részét tárolóban történő lerakással ártalmatlanítják, és mindössze 20%-át hasznosítják, leggyakrabban a cementiparban. Ezt az arányt növelendő megoldás lehet a másodnyersanyagként történő felhasználása, mint például beton adalékanyaga, hidraulikus kötőanyag, valamint geopolimer előállítására. A geopolimer olyan, mesterségesen előállított alumínium-szilikát alapú kötőanyag, amelynek mechanikai tulajdonságai hasonlóak a betonéhoz. Ezen hasonlóság miatt a jövőben több felhasználási területen is elképzelhető a hasznosításuk [2-6].

A fentiekkel összefüggésben a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás-technikai Intézetében vizsgálatokat végeztünk egy geopolimer-üveghab kompozit kifejlesztése céljából.

2. Anyagok és módszerek

A következőkben a kísérletek során felhasznált alapanyagok főbb tulajdonságait (szemcseméret-eloszlás, fajlagos felület, kémiai összetétel), és a vizsgálatokhoz használt berendezéseket mutatjuk be.

2.1 Alkalmazott vizsgálati módszerek

A méréseink során a megfelelő szemcseméret eléréséhez mind az üveghulladékot mind a pernyét őrlni kellett. Az üvegpors előállítása három aprítási lépcsőben valósult meg: 1. aprítás pofás törővel, 2. aprítás hengeres törővel, 3. őrlés golyósmalomban. A pernye mechanikai aktiválása szintén golyósmalomban történt, amelyet a kémiai összetétel meghatározása követett Rigaku Supermini 200 típusú hullámhossz diszperzív röntgen fluoreszcens spektrométer segítségével, CereOX cementű porpelleten.

A minták szemcseméret-eloszlását és fajlagos felületét Horiba LA-950V2 típusú lézeres szemcseméret elemző készülékkel mértük. A készülék egy lézergyűrű-elhajlással alapuló spektrométer. A mérőcellában keringetett közeg által a szemcsét érő fénysugár elhajlási szöge a szemcse méretével fordítottan arányos, erőssége pedig gyakoriságával hozható összefüggésbe. A berendezés a szemcseméret-eloszlási számításokat az úgynevezett Mie elmélet szerint hajtja végre. Ez a berendezés 10 nm-től 3 mm-ig terjedő tartományban képes a méréseket elvégezni.

Az üveghab pelleték előállítására pelletáló tányért alkalmaztunk. Az üveghab pelleték előállítására előtt kísérleti úton meghatároztuk a berendezés optimális üzemelési paramétereit. A tányér dőlésszögét 30°-ra választottuk, a kerületi sebességet pedig egy frekvenciaváltó segítségével 0,29 m/s-ra állítottuk be. A tányér átmérője 595 mm volt.

Az üveghab pelleték és a geopolimer-üveghab kompozit hőkezelése NaberthermL(T)3 típusú laboratóriumi statikus kemencében történt.

A kiegészítő pelleték pórusainak és a geopolimer kompozitoknak a vizsgálatára Zeiss AxioImager M2m típusú

mikroszkópot használtunk, mely egy motoros, HBO 100 állvánnyal, illetve egy 5"-os TFT kijelzővel van felszerelve. Fizikai mérete: 390×721×505 mm. Többféle nagyítással rendelkezik, 5-szöröstől kezdve egészen a 100-szorosig. A mikroszkóphoz tartozik egy Zeiss AxioCam MRc5-ös nagy felbontású kamera, amelynek segítségével a mikroszkópban látható képet egy számítógépen is meg lehet vizsgálni majd a hozzá tartozó szoftver segítségével ki lehet elemezni azt.

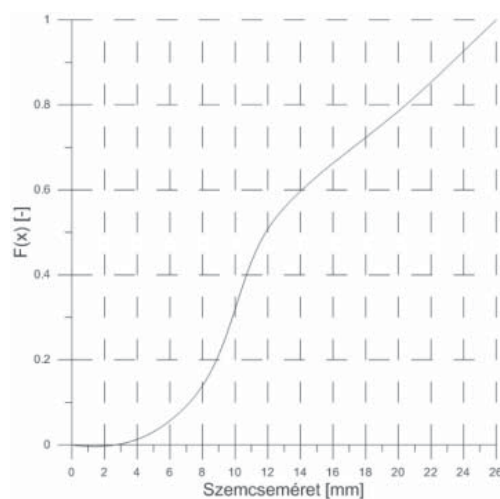
A kész geopolimer-üveghab kompozit nyomószilárdság-vizsgálatához egy 1000 kN maximális terhelőerő kifejtésére képes szilárdságvizsgáló berendezést használtunk. A berendezés húzó és nyomó igénybevételek létrehozására egyaránt alkalmas.

2.2 Alapanyagok jellemzése

A vizsgálatokhoz felhasznált anyagokat két részre oszthatjuk: az üveghab illetve a geopolimer összetevőire.

Üveghab nyersanyagai

Az üveghab készítésénél az egyik legfontosabb lépés az üvegpors előállítása. Az üveghab vegyes üveghulladék felhasználásával készült. A megfelelő szemcseméret elérése érdekében az üveget három lépcsőben aprítottuk. Az első aprítási lépcsőben a begyűjtött üveghulladék egy 15 mm-es résnyílású pofástörőre került. A pofástörő törését ezután egy 6 mm-es résnyílású hengeres törőre adtuk fel (2. aprítási lépcső). A törés után kapott szemcseméret-eloszlásokat az 1. és 2. ábra mutatja.

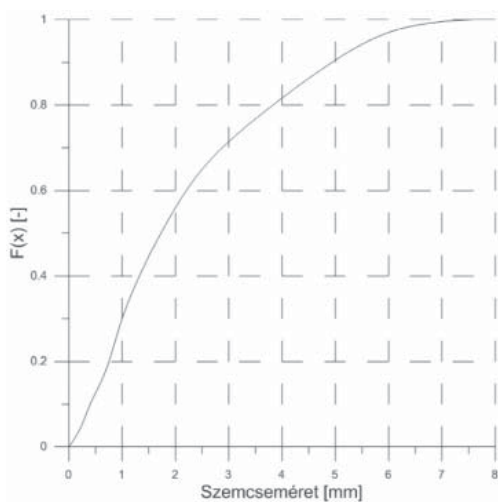


1. ábra Pofás törővel előállított üvegtörlet szemcseméret-eloszlása
Fig. 1. Particle size distribution of glass crushed by jaw crusher

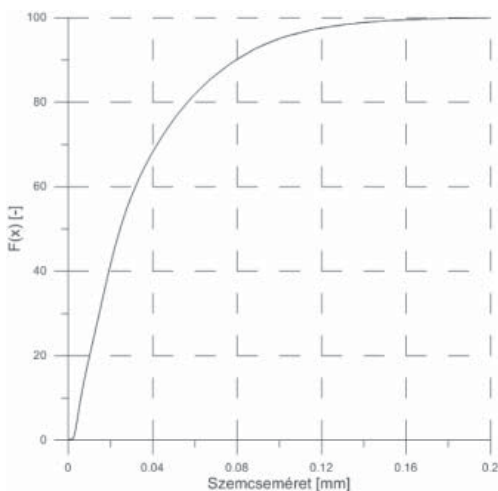
Az 1. ábra alapján megállapítható, hogy az üvegtörlet pofás törővel történő aprítása során elért 50 %-os szemcsemérete (medián) $x_{50}=11,5$ mm, és a 80 %-os szemcsemérete $x_{80}=21$ mm volt, míg a hengeres törővel történő további aprítása után az üvegtörlet szemcseméret eloszlásának (2. ábra) medián értéke $x_{50}=1,7$ mm, míg az $x_{80}=3,8$ mm-re változott. Ez a következő aprítási fokokat eredményezte a hengeres törőre vonatkozóan: $r_{50}=6,8$, és $r_{80}=5,5$.

Pelletálásnál a szemcsék között megfelelő kötések (folyadék hidak) eléréséhez 100 μ m alatti szemcseméret az optimális, így az üveghulladék aprítását 60 perces golyósmalmi őrlés (3.

aprítási lépcső), majd 10 perces homogenizálás követte. A homogenizálási lépcsőben kevertük a habképző és a pelletálási segédanyagot (nátrium bentonitot és dolomitot) az üvegőrleményhez. Az így kapott üvegőrlemény szemcseméret eloszlását a 3. ábra illusztrálja.



2. ábra Hengeres törővel előállított üvegtörlet szemcseméret-eloszlása
Fig. 2. Particle size distribution of glass crushed by rolls crusher



3. ábra Golyósmalomban előállított üvegőrlemény szemcseméret-eloszlása
Fig. 3. Particle size distribution of glass ground by ball mill

A kapott üvegőrleményből szemcseméret elemzéssel megállapítottuk, hogy $x_{50} = 24,58 \mu\text{m}$; $x_{80} = 56,53 \mu\text{m}$; és a fajlagos felülete $\text{SSA} = 4093,5 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

Geopolimer nyersanyagok

A geopolimer készítéshez szükséges pernyét a Tiszaujváros melletti pernyehányóról szereztük be. A minta jelentős nedvességtartalommal (4,92 %) rendelkezett, ezért azt a felhasználás előtt $105 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleten tömegállandóságig szárítottuk, majd 2 mm-es nyílásméretű szitával leválasztottuk az idegen anyagokat (pl. növényi részek). Korábbi kutatások kimutatták, hogy a pernye finomsága jelentős hatással bír a geopolimerizációs reakciókra és a termék szilárdságára [4, 7, 16]. Ezért a szitálás után kapott pernyét 60 percig golyósmalomban őrlöttük, hogy mechanikailag aktiváljuk [7], a fajlagos

felületét megnöveljük. Az őrlés után meghatároztuk a pernye oxidos összetételét, amelynek eredményét az 1. táblázat tartalmazza.

| Fő komponensek | m/m % |
|-------------------------|-------|
| SiO_2 | 61.24 |
| Al_2O_3 | 26.64 |
| CaO | 1.53 |
| MgO | 0.88 |
| Na_2O | 1.17 |
| K_2O | 1.74 |
| Fe_2O_3 | 4.28 |
| TiO_2 | 0.47 |
| ZrO_2 | 0.02 |
| SrO | 0.02 |
| LOI | 1.92 |

1. táblázat Tiszaujvárosi pernye kémiai összetétele
Table 1. Chemical composition of fly ash from Tiszaujváros

Az 1. táblázat alapján megfigyelhetjük, hogy a főbb összetevők közül kiemelkedik a SiO_2 mennyisége, amely a pernye több mint 60 m/m%-át adja, valamint az Al_2O_3 mennyisége is jelentős, amely közel 27 m/m%-ban van jelen. Ezek mellett kiemelhetjük a CaO (1,53 m/m%) illetve a Fe_2O_3 tartalmat (4,28 m/m%) is.

Vizsgáltuk a nyers és a mechanikailag aktivált (őrölt) pernye szemcseméret-eloszlását. A nyers pernye nevezetes szemcseméretei $x_{80} = 128,38 \mu\text{m}$; $x_{50} = 69,92 \mu\text{m}$ az őrlés hatására $x_{80} = 27,51 \mu\text{m}$; $x_{50} = 14,36 \mu\text{m}$ értékre változtak. Ez a szemcseméret-csökkenés a fajlagos felület növekedését eredményezte. A nyers és aktivált pernye fajlagos felületét összehasonlítva megállapítható, hogy az aktivált pernye fajlagos felülete ($5591,5 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) a nyers pernyéhez ($1488 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) képest négyszeresére növekedett.

3. Kísérletek

3.1 Üveghab előállítása

A kísérletek első lépéseként az üveghabot állítottuk elő. Az üveghab előállítása Mucsi és szerzőtársai [8] eredményei alapján az üvegőrleményhez Na-bentonit és dolomit por adagolásával történt. Az optimális üzemeltetési paraméterek mellett előállított pelleteket egy szárítószekrényben $105 \text{ }^\circ\text{C}$ -on két órán keresztül szárítottuk, majd szitálással frakciókra (2-4, 4-6 és 6-8 mm) bontottuk. Ezt követően három hőmérsékleten (800 , 850 és $900 \text{ }^\circ\text{C}$) 7,5 perces tartózkodási idő mellett hőkezeltük azokat.

3.2 Geopolimer-üveghab kompozit előállítása

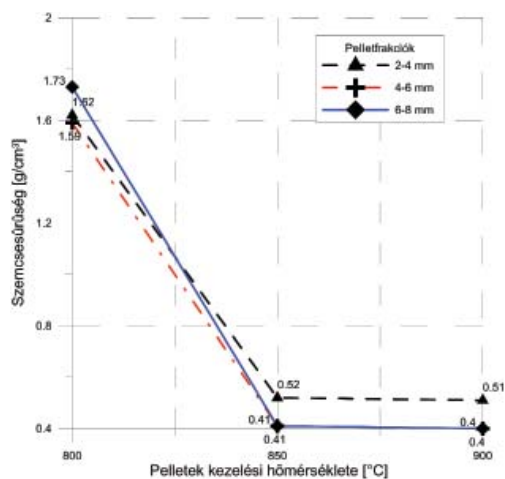
A geopolimer előállítása - korábbi kutatási eredményeket felhasználva - az előkészített pernyéhez aktiváló szerként 12M-os NaOH oldat és Na-K vízüveg keverék hozzáadásával történt. Az aktiváló oldat/tömegaránya 0,82 volt. Az így kapott geopolimer pasztához habkavicsot kevertünk. Két mérési sorozatot végeztünk. Az első sorozatban a habkavics adagolásának hatását vizsgáltuk a geopolimer-üveghab kompozit mechanikai

tulajdonságaira. Az üveghabot négy különböző mennyiségben (20, 40, 60, 80 V/V%) adagoltuk a geopolimer kötőanyaghoz. A második sorozatban változó paraméter a habkavics mérete volt (2-4 mm; 4-6 mm; 6-8 mm). A habkavics adagolása az előző sorozatban optimálisnak talált térfogathányad alapján történt. A két kísérletsorozat során minden kísérletnél három próbatestet készítettünk. A habkavics-geopolimer keveréket 56 mm átmérőjű, kiolajozott formákba öntöttük, majd vibroasztalon 1 percig tömörítettük. A tömörített próbatesteket 24 órán keresztül levegőtől elzárva szobahőmérsékleten tároltuk, amelyet másnap hőkezelés követett. A hőkezelés 60 °C-on történt 6 órán keresztül, 1 órás felfűtési idővel. Ezt követően egy hétig szobahőmérsékleten tároltuk a próbatesteket. Egy hetes vizsgálati korban történt a próbatestek egytengelyű nyomószilárdságának mérése illetve testsűrűségük meghatározása.

4. Eredmények

4.1. Üveghab

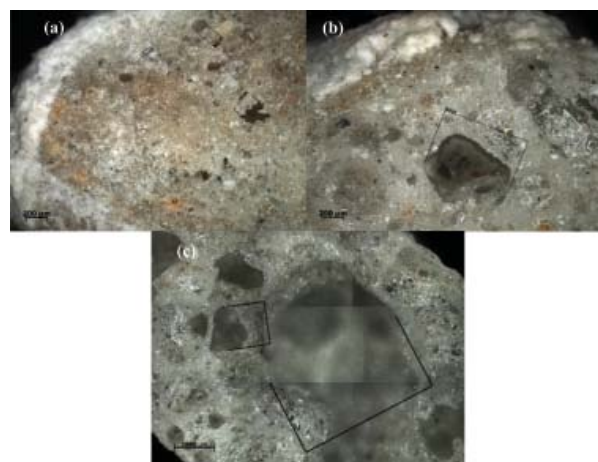
A pelletek 2 órás szárítását és frakciókra bontását követően hőkezelésük következett. A hőkezelés után mindegyik frakcióból mintát vettünk és meghatároztuk azok szemcsesűrűségét annak érdekében, hogy megvizsgáljuk és a szemcsesűrűség és a kezelési hőmérséklet közötti összefüggéseket (4. ábra).



4. ábra Habkavics frakciók szemcsesűrűségének változása a hőkezelés hatására
Fig. 4. Variation of particle density of glass foam gravel fractions in the function of heat treatment

A 4. ábra alapján megállítható, hogy a hőmérséklet 800 °C-ról 850 °C-ra növelésével a habkavicsok szemcsesűrűsége mindegyik frakció esetén jelentősen csökkent (4-6 mm-es frakció esetén 1,59 g/cm³-ről 0,41 g/cm³-re). A 900 °C-on hőkezelt pelletekben további, de kisebb mértékű szemcsesűrűség változás figyelhető meg (4-6 mm frakció esetén 0,41 g/cm³-ről 0,40 g/cm³-re). Az is megfigyelhető, hogy a kezelési hőmérséklet növelésével a kisebb méretű pelletknél a sűrűségcsökkenés kisebb mértékű, mint a nagyobb méretű habkavicsok esetén (a 2-4 mm-es frakciónál 1,62 g/cm³-ről 0,51 g/cm³-re, míg a 6-8 mm-es frakciónál 1,73 g/cm³-ről 0,40 g/cm³-re csökkentek a szemcsesűrűségek).

Optikai mikroszkóp segítségével megvizsgáltuk az üveghab szemcsékben hőkezelés után kialakult pórusok méretét és eloszlását.



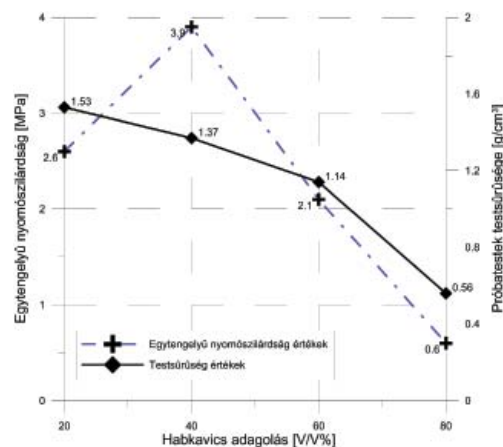
5. ábra Habkavics törési felülete (4-6 mm frakció)
(a) 800 °C, (b) 850 °C és (c) 900 °C-os hőkezelés után
Fig. 5. Fracture surface of glass foam of the fraction 4-6 mm after heat treatment
(a) 800 °C, (b) 850 °C, (c) 900 °C

A mikroszkópos vizsgálat során megállapítottuk, hogy a 800 °C-on hőkezelt habkavicsokban még nem vagy csak kevés pórus alakult ki és ezek mérete 200 µm alatti (zömében <100 µm) volt. A hőmérséklet növelésével a habkavicsban kialakult pórusok mérete növekedett. A 850 °C-on hőkezelt habkavicsokban ez az érték elérte a 800 µm-es maximális nagyságot, de javarészt a 200-400 µm volt a jellemző méret. A 900 °C-on hőkezelt minták esetében a pórusok egyesülése következtében 3 mm-nél nagyobb pórusok is keletkeztek, ami a szilárdság szempontjából hátrányos.

4.2. Geopolimer-üveghab kompozit

4.2.1 Habkavics adagolás hatása

Az előállított pelletek hőkezelése után vizsgáltuk a habkavics adagolás mennyiségének geopolimer tulajdonságaira gyakorolt hatását. A vizsgálatokhoz 850 °C-on hőkezelt 4-6 mm frakciójú habkavicsokat alkalmaztunk, amelyeket 20, 40, 60, valamint 80 térfogatszázalékban adagoltuk a geopolimer pasztához. Az elkészített próbatesteken meghatároztuk a testsűrűséget, továbbá megvizsgáltuk az egytengelyű nyomószilárdságukat is. A kapott eredményeket a 6. ábra szemlélteti.



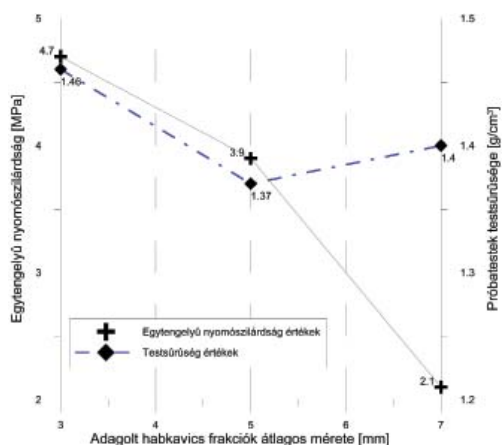
6. ábra Geopolimer kompozit próbatestek 7 napos nyomószilárdságának és testsűrűségének változása a 4-6 mm-es habkavics adagolási arány függvényében
Fig. 6. Variation of 7 day compressive strength and specimen density of geopolimer composites consisting of 4-6 mm size glass foam particles

A 6. ábra alapján megállapítható, hogy a próbatetek 40 V/V% habkavics-tartalom mellett érték el a legnagyobb nyomószilárdságot. Ebben az esetben az átlagos nyomószilárdság 3,9 MPa volt. További habkavics adagolás hatására csökken a minták nyomószilárdsága, 80 V/V%-ban adagolva átlagosan 0,6 MPa nyomószilárdsággal rendelkező próbateteket állítottunk elő. Az is megfigyelhető, hogy a habkavics mennyiségének növelése a próbatetek testsűrűségének csökkenését eredményezi, amely a kiindulási 20 V/V%-hoz tartozó 1,53 g/cm³-ről 0,56 g/cm³-re csökkent 80 V/V% adagolás mellett.

Az eredmények alapján a kompozitban lévő habkavics méretfrakciójának változtatására irányuló vizsgálatot a 40 V/V%-os habkavics adagolás mellett végeztük.

4.2.2 Habkavics méretének hatása

A vizsgálat során a különböző méretű habkavicsokat tartalmazó minták testsűrűségét és egytengelyű nyomószilárdságát (7. ábra) határoztuk meg.



7. ábra Geopolimer kompozit próbatetek 7 napos nyomószilárdságának és testsűrűségének változása a habkavics méretfrakciók átlagos méretének függvényében

Fig. 7. Variation of 7 day compressive strength and specimen density of geopolymer composites as function of average particle size of glass foam

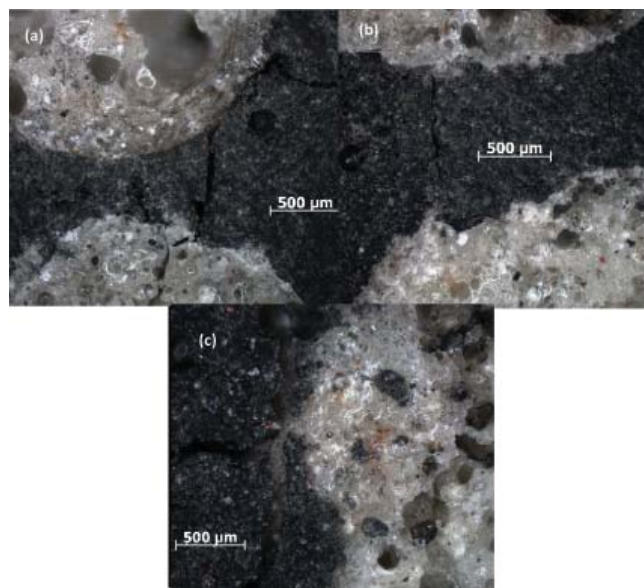
A mérési eredményekből megállapítható, hogy a nagyobb méretű habkavics csökkenti a geopolimer-üveghab kompozit nyomószilárdságát (7. ábra). A legnagyobb nyomószilárdsággal a 2-4 mm-es méretű habkavics frakciót tartalmazó kompozit rendelkezett (4,7 MPa), míg a legkisebb nyomószilárdsága a 6-8 mm-es méretű habkavics frakciót tartalmazó próbateteknek volt (2,1 MPa). A kompozit testsűrűsége az adagolt habkavics méretének növelésével csekély mértékben csökkent.

4.2.3 Geopolimer-üveghab kompozit törési felületének vizsgálata

A különböző méretű habkavicsokat tartalmazó kompozitok esetében vizsgáltuk a próbatetek törési jellemzőit, amely során megállapítható volt, hogy minél kisebb szemcseméretű habkavicsot használtunk, a nyomószilárdság mérése közben a próbatest annál jobban roncsolódott illetve annál nagyobb terhelést bírt el. A minták felületét optikai mikroszkóp alatt is vizsgáltuk.

Az optikai mikroszkópos felvételek alapján (8. ábra) megállapítható, hogy a habkavics és a geopolimer közötti kötés

egyenletes, zárványok nélküli. Továbbá az is megállapítható, hogy törés során repedések nem csak a geopolimer kötőanyag-habkavics határfelületén alakultak ki, hanem a habkavicsban is megfigyelhető volt a geopolimer ágyazóanyagban kialakuló repedések továbbterjedése. Ez igazolja az összetevők közötti kötőerők létrejöttét.



8. ábra (a) 2-4 mm; (b) 4-6 mm és (c) 6-8 mm habkavics frakciókat tartalmazó minták optikai mikroszkópos felvételei

Fig. 8. Optical microscopy images of geopolymer composites consisting of glass foam size fractions (a) 2-4 mm, (b) 4-6 mm, (c) 6-8 mm

5. Összefoglalás

A vizsgálataink során a következő megállapításokra jutottunk:

- A habkavicsok optikai mikroszkópos vizsgálatai igazolták, hogy a hőkezelési eljárás során a habkavicsokban 800 °C-on nem vagy kevés, nagyon kis méretű pórus alakult ki, míg 900 °C-on a pórusok egyesülésének hatására nagy méretű pórusok jöttek létre. Optimális pórusméretet és homogén eloszlást a 850 °C-os hőkezelés esetén értünk el.
- A habkavics adagolás hatásának vizsgálata során kapott egytengelyű nyomószilárdság eredmények kimutatták, hogy a legnagyobb nyomószilárdsággal a 40 V/V% habkavics tartalmú próbatetek rendelkeztek, átlagosan 3,9 MPa értékkel. A habkavics mennyiségének növelése csökkentette a kompozit testsűrűségét.
- A különböző méretfrakciójú habkavicsok 40 V/V%-os adagolása során megállapítottuk, hogy a kisméretű habkavicsokat (2-4 mm) tartalmazó kompozit nyomószilárdsága a legnagyobb (4,73 MPa), valamint a habkavics méretének növelése csökkenti a kompozit nyomószilárdságát.
- Az optikai mikroszkópos felvételek kimutatták, hogy a geopolimer kötőanyag fizikailag befoglalja a habkavics szemcséket.
- A továbbiakban vizsgálni kívánjuk más könnyű adalékanyagok geopolimerbe ágyazhatóságát.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikk a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Fenntartható Természeti Erőforrás Gazdálkodás Kiválósági Központ tevékenységének részeként valósult meg, részben az „Innovatív, környezetbarát szigetelőanyag piacorientált kutatás-fejlesztése polisztirol másodnyersanyag hasznosításával” c. PIAC 13 projekt részeként.

A Szerzők köszönetet mondanak Móricz Ferencnek a pernyeminta oxidos összetételének meghatározásáért, Dr. Debrezeni Ákosnak a szilárdsági vizsgálatokban nyújtott segítségéért, valamint témavezetőjüknek Dr. Mucsi Gábornak a szakmai iránymutatásért.

Hivatkozások

- [1] Barótfi I. (2003): Környezettechnika. Mezőgazda Kiadó, Budapest, ISBN 963286 009 8
- [2] Haidekker B. (2004): Hamu és pernye mint másodnyersanyag. *Hulladékok és másodnyersanyagok hasznosítása*, BME OMIKK, 2004/2.
- [3] Davidovits, J. (2011): Geopolymer chemistry and application. *Institut Geopolimère*, ISBN 9782951482050 pp. 283, 286.
- [4] Kumar, S. – Kumar, R. (2011): Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International*, Vol. 37, No. 2, pp. 533-541. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.038>
- [5] Ahmaruzzaman, M. (2010): A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 3, pp 327-363 <https://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- [6] Mucsi, G. – Csöke, B. – Molnár, Z. (2010): Laboratory investigation of geopolymer production from industrial waste materials. *Proceedings of the XIIth International Mineral Processing Symposium 6-8 October 2010*. ISBN 978-975-491-295-1, pp. 1235-1242.
- [7] Máda, F. – Kristály, F. – Mucsi, G. (2015): Microstructure, mineralogy and physical properties of ground fly ash based geopolymers. *Ceramics-Silikáty*, Vol. 59, No. 1, pp. 70-79. http://www.ceramics-silikaty.cz/2015/2015_01_070.htm
- [8] Mucsi, G. – Csöke, B. – Kertész, M. – Hoffmann, L. (2013): Physical characteristics and technology of glass foam from waste cathode ray tube

- glass. *Journal of Materials*, Hindawi Publishing Corporation. Volume 2013, Article ID 696428, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/696428>
- [9] König, J. – Petersen, R. R. – Yue, Y. (2014): Influence of the glass–calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 34, pp 1591–1598. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.020>
 - [10] Benhaoua, F. – Ayadi, A. – Stiti, R. N. – Legendre, B. L. (2013): Elaboration and characterization of an insulation material based waste glass. *Verres Céramiques & Composites*, Vol. 2, pp. 1-5. <http://www.univ-setif.dz/revues/vcc/images/archive/Vol02-num02/Article%201.pdf>
 - [11] Nemes, R. – Józsa, Zs. (2006): Strength of Lightweight Glass Aggregate Concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol, 18, no. 5, pp. 710-714. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:5\(710\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:5(710))
 - [12] Hoffmann, L. – Józsa, Zs. – Nemes, R. (2003): Üveghulladékból könnyűbeton adalékanyag. „Geofil-Bubbles” – felhasználási lehetőségek. *Építőanyag*, Vol. 55, No. 1, pp. 13-17. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2003.3>
 - [13] Nemes, R. (2013): Könnyűbetonok kopthatósággal szembeni ellenállása. *Építőanyag*, Vol. 65, No. 2, pp. 44–47. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.10>
 - [14] Nemes, R. (2015): Könnyűbetonok fagyasztásvizsgálatának érdekességei. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 67, No. 1, pp. 24–27. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.5>
 - [15] Nemes, R. – Török, B. (2014): Betonacél tapadása különböző könnyű adalékanyagok alkalmazása esetén. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 66, No. 1, pp. 7–12. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2014.2>
 - [16] Kumar, S. – Kristály, F. – Mucsi, G. (2015): Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash. *Advanced Powder Technology*, 2015. Vol. 26, No. 1, pp. 24-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2014.09.001>

Ref.:

Szabó, Roland – Molnár, Zoltán – Balogh, Tamás – Mészáros, Richárd: *Geopolimer alapú kompozit fejlesztése melléktermékekből* Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 68, No. 1 (2016), 25–30. p. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.5>



ICCET 2016 : 18th International Conference on Concrete Engineering and Technology Zurich, Switzerland • January 12 - 13, 2016

The **ICCET 2016: 18th International Conference on Concrete Engineering and Technology** aims to bring together leading academic scientists, researchers and research scholars to exchange and share their experiences and research results about all aspects of Concrete Engineering and Technology. It also provides the premier interdisciplinary forum for researchers, practitioners and educators to present and discuss

the most recent innovations, trends, and concerns, practical challenges encountered and the solutions adopted in the field of Concrete Engineering and Technology.

Conference Code: 16CH01ICCET

WWW.WASET.ORG/CONFERENCE/2016/01/ZURICH/ICCET