

GEOPOLIMER-EPS KOMPOZIT ANYAGOK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐJÉNEK MÉRÉSE

Faitli József¹, Magyar Tamás², Szabó Roland³

egyetemi docens¹, PhD hallgató^{2,3}

Miskolci Egyetem,

Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet^{1,2,3}

ABSTRACT

The main objective of the present paper is to investigate the heat insulating properties of geopolymer - polystyrene composite materials prepared in laboratory and pilot scale as well as to compare the above experimental results. The thermal conductivity measurements were carried out by a self-developed apparatus which is presented in the paper briefly. As a result of the investigation it was found that the lowest heat conductivity value (0.0565 W/mK) was achieved using 10 V/V% geopolymer and 90 V/V% polystyrene composite prepared in laboratory scale. In pilot scale 0.0914 W/mK was reached for the same composition. Based on the measurements, exponential relation was revealed between the EPS volumetric fraction in the composite material and the thermal conductivity.

BEVEZETÉS

Az épületek gazdaságos üzemeltetésének egyik általánosan alkalmazott módszere a külső falazatokra felvitt hőszigetelő anyagok alkalmazása. Ennek ellenére az épületek fűtésére és hűtésére felhasznált energia igen jelentős, ezért a hőszigetelés megfelelő kialakítása, illetve működtetése jelentős energia-megtakarítást eredményezhet. Az USA Energiaügyi Minisztériumának jelentése (The US Department of Energy, 2002) szerint a fűtési-, illetve hűtési költségek a teljes épület energetikai költségeit tekintve 50-70 %-ot is jelenthetnek egy átlagos otthon esetében. Az említett arány magasabb is lehet kedvezőtlen éghajlati viszonyok mellett, illetve alacsonyabb energiahatékonysággal rendelkező épületeknél. Az épületek megfelelően megválasztott, illetve kivitelezett hőszigetelése nagymértékben hozzájárul az energiahatékonyság növeléséhez, amely a költségeket is jelentősen csökkentheti. A fűtésre- és hűtésre felhasznált energia mennyisége attól függ, hogy az épület mennyire „jól” hőszigetelt. A hőszigetelést tekintve megkülönböztethetünk külső-, illetve belső hőszigetelést. A külső hőszigetelés mellett a belső hőszigetelés is jelentős hatással van az energiafogyasztásra, különösen a több hőmérsékleti zónával rendelkező épületek esetében, melynek tipikus példái a többemeletes lakótömbök (panelépületek) (Caoa et al., 2015). Az épületek esetében alkalmazott szigetelő anyagok egyik legfontosabb műszaki paramétere a hővezetési tényező (jele: λ , mértékegysége: W/mK), amely értéke minél kisebb, annál jobban ellenáll az anyag, a két ellentétes oldalán kialakuló hőmérséklet (hőmérséklet gradiens) következtében létrejövő, és rajta áthaladó hőárammal szemben, tehát annál jobb hőszigetelő anyagról beszélhetünk.

ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Hőtani vizsgálataink középpontjában olyan pernye alapú geopolimer kompozit anyagok állnak, amelyek különböző térfogatszázalékban tartalmaznak hozzáadott expandált polisztirolt. Az egyébként is jó hőszigetelő képességgel rendelkező geopolimerek hővezetési tényezője, illetve testsűrűsége jelentősen csökkenthető expandált polisztirol gyöngyök (EPS) hozzáadásával. A másodnyersanyagokból létrehozott kompozit anyag alkalmas lehet az építőipari szigetelő anyagok jövőbeni kiváltására. Alkalmazásának másik fontos előnye, hogy a deponálandó hulladék mennyisége is csökken.

Felhasznált anyagok

Geopolimer

A geopolimerek amorf alumino-szilikátok, melyek lúgos közegben (KOH, NaOH) szilícium-dioxid és alumino-szilikát-oxidok között lejátszódó reakció során állíthatóak elő szobahőmérsékleten vagy magasabb hőmérsékleten (30-100°C) egyaránt. Ez a reakció egy amorf félig-kristályos háromdimenziós polimer struktúrát eredményez, mely Si-O-Al kötésekből áll (Davidovits, 1994; 2011). Minden olyan elsődleges vagy másodlagos nyersanyag alkalmas geopolimer gyártására, amely reaktív szilícium-dioxid és alumínium-oxid fázisokat tartalmaz, mint pl. a természetes kőzetek vagy ipari melléktermékek (pl. erőműi pernye, salak és vörösiszap) (Davidovits, 1994; 2011; Komintsas et al., 2007; Mucsi et al., 2012). A geopolimerek jó fizikai-kémiai és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, többek között alacsony sűrűség, mikro- vagy nanoporozitás, csekély zsugorodás, magas szilárdság, hőstabilitás, nagy felületi keménység, tűz és kémiai ellenállóság jellemzi azokat (Barbosa és Mckenzie, 2003; Barbosa et al., 1999; Panias et al. 2007). A geopolimer szilárdsága a pernye őrlésével szabályozható (Mucsi et al., 2015; Máдай et al., 2015).

Expandált polisztirol (EPS)

Az expandált polisztirolhab (EPS) alapanyaga hőre lágyuló polimerizált sztírol, ami habosító anyagot és égéskésleltető adalékot tartalmaz. A túlnyomórészt levegőből álló anyag kiváló hőszigetelő képességgel rendelkezik, jól alakítható, egészségre, illetve környezetre nem veszélyes. Az expandált polisztirolhab legfontosabb jellemzője az igen alacsony hővezetési tényező, amely a zárt cellákban nyugvó levegőnek köszönhető (Jelle, 2011). Kiváló hőszigetelő képessége mellett, alkalmazásának széleskörű elterjedésében fontos szerep jutott az igen kis testsűrűségnek (30 kg/m³), valamint annak, hogy jelenleg az egyik legolcsóbb homlokzati hőszigetelő anyag (Makai et al., 2016).

Geopolimer-EPS kompozit próbatestek gyártása

A próbatestek gyártása, illetve vizsgálata laboratóriumi és félüzemi méretben történt. A laboratóriumi előállítás során örölt deponált tiszaujvárosi pernyét használtunk, mint geopolimer szilárd fázis, amelyhez NaOH és nátrium-szilikát lúgos aktiválószer kevertünk 45 m/m% arányban egy függőleges habarcskeverőben. Ezután a geopolimer pasztához adagoltuk az előaprított polisztirol szemcséket (0,5-10 mm), amely keveréket a homogenizálást követően 400×400 mm-es alapterületű sablonokba öntöttük és vibrációsan tömörítettük. Az elkészített próbatestek magassága változó volt, amelyeket a hővezetési tényező meghatározása során figyelembe vettünk.

A félüzemi mérések két sorozata ehhez képest annyival tért el, hogy a geopolimer kötőanyag pernye összetételét a kötési idő szabályozása érdekében megváltoztattuk: az I. mérési sorozatban 80 m/m% visontai pernye és 20 m/m% örölt tiszaujvárosi pernye, a II. mérési sorozatban pedig 90 m/m% visontai pernye és 10 m/m% örölt tiszaujvárosi pernye volt az összetétel. További eltérés a laboratóriumi kísérletekhez képest, hogy a félüzemi mérések mindkét sorozatában a 10 V/V% geopolimer-tartalmú mintáknál a pernyéhez 47 m/m%-ban adagoltuk az aktiváló oldatot, annak érdekében, hogy a polisztirolt egyenletesebben vonja be a geopolimer paszta. A többi esetben 45 m/m%-ban tartalmazott lúgos aktiválószer a geopolimer paszta. A félüzemi kísérletek során a keverést egy 150 l térfogatú kényszerkeverővel valósítottuk meg, a sablonok mérete pedig 500×1000×100 mm, illetve 100×500×200 mm volt, amelyekből a hővezetési tényező meghatározásához, a mérőberendezésbe illeszkedő, 400×400 mm-es alapterületű mintákat vágunk ki.

Az elkészült próbatestek összetevőinek arányait az 1. táblázat szemlélteti. A szürkével kiemelt három próbatest hővezetési tényezőjének mérése a tanulmány elkészítéséig még nem fejeződött be, ezeket később tesszük közzé.

Összetevők, [V/V %]	Próbatestek típusa									
	Laboratóriumi				Félüzemi (I. széria)			Félüzemi (II. széria)		
EPS	30	60	90	100	70	60	90	70	60	90
Geopolimer	70	40	10	0	30	40	10	30	40	10

1. táblázat: Az elkészült próbatestek összetételi arányai.

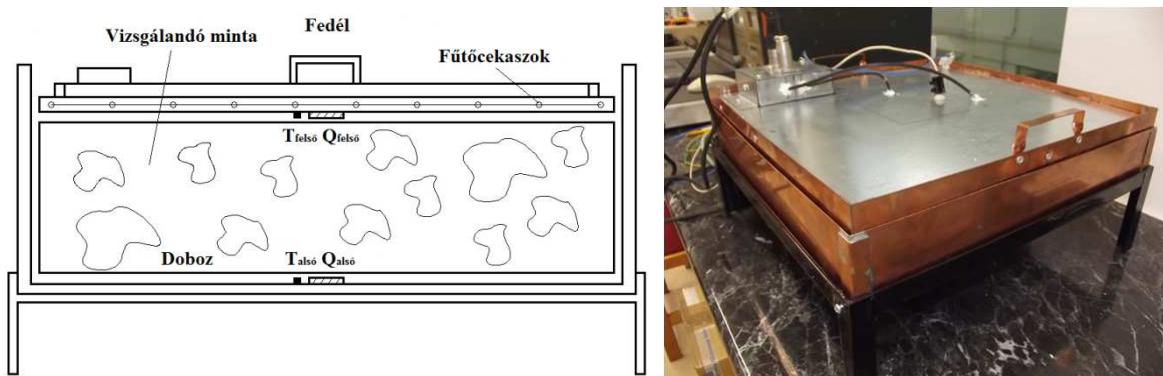
MÉRŐBERENDEZÉS- ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZER FEJLESZTÉSE

Az építőipari hőszigetelő anyagok hővezetési tényezőjének a mérésére új berendezést- és módszert fejlesztettünk ki, amelyek alapja és előzménye a „Depóniahő-hasznosítási technológia kidolgozása” című projekt (KMR_12-1-2012-0128) keretében, a települési szilárd hulladékok hőtani- és fizikai paramétereinek - in-situ - mérésére kifejlesztett berendezés, illetve eljárás (Faitli et al., 2014; Faitli et al., 2015).

Mérőberendezés működési elve- és kialakítása

A berendezés megtervezésekor elsősorban a hővezetési tényező mérése volt a cél, a többi paraméter mérése párhuzamosan, vagy kiegészítő méréssel valósítható meg. A hővezetési tényező mérésére alapvetően három különféle alapelv szerint van lehetőség. Az első a tökéletest megközelítő teljes hőszigetelés, amikor hőszigetelés útján tudjuk a hőárammérő szenzoron keresztül haladó hőfluxust behatárolni, úgy hogy a hőáram fluxus vektorok egymással párhuzamosak, a szenzorra pedig merőlegesek legyenek. A második alapelv szerint az oldalirányú hővesztiséget kell pótolni egy szabályozott segéd fűtőrendszer által. A harmadik módszer szerint olyan geometriájú mérőberendezést kell építeni, amiben a teljes hőáramnak csak egy belső, jól meghatározott keresztmetszetét mérjük. A belső mért keresztmetszet lényegesen kisebb, mint a teljes keresztmetszet, így a mért keresztmetszetben a hőáram vonalak párhuzamosak, az oldalirányú veszteségek pedig nem befolyásolják a mérést. A Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében megépített mérőberendezés a harmadik elven alapul, az így kialakított konstrukció pedig alkalmas építőipari hőszigetelő anyagok hőtani jellemzőinek-, illetve többfázisú diszperz rendszerek eredő hőtani paramétereinek a mérésére is.

A hővezetés-mérő berendezés két fontos része a fűtéssel ellátott fedél és az alsó nyitott doboz (1. ábra), amelyeket vörösrézből alakítottunk ki, a jobb hővezetés biztosítása érdekében (a réz hővezetési tényezője - $\lambda_{\text{réz}}=399 \text{ W/mK}$ - egy nagyságrenddel nagyobb, mint az előzőleg, a települési szilárd hulladékok vizsgálatánál alkalmazott, acélból kialakított mérőberendezés esetében). A fedélbe khantál ellenálláshuzalból és kerámia szigetelőgyűrűkből kialakított fűtőegység került beépítésre. A beépített fűtőszálak egyenletesen lefedik a fedél teljes 400×400 mm-es felületét, a berendezés maximális magassága 60 mm.



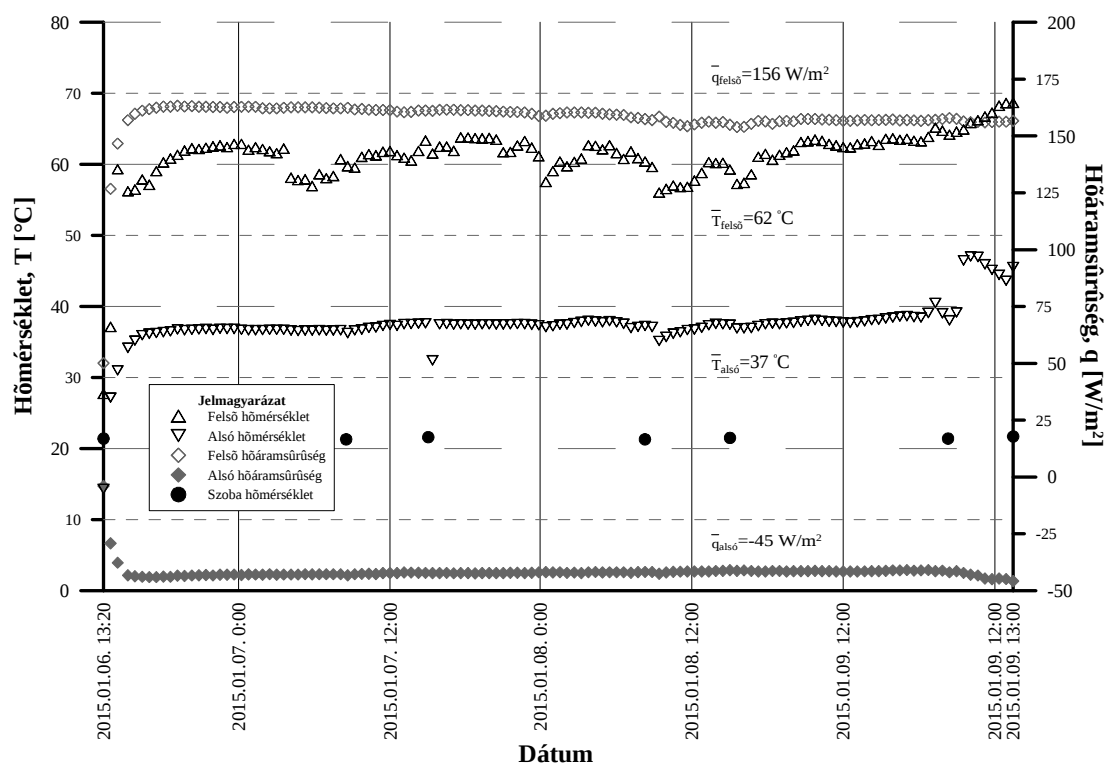
1. ábra: A hővezetés-mérő berendezés.

A fűtőszálak elektromos táplálását nem közvetlenül a 230 V effektív feszültségű hálózatról, hanem 0...80 V közötti változtatható feszültségű laboratóriumi tápegységből nyerjük, így rugalmasan igazítható a berendezés az eltérő tulajdonságú vizsgálati anyagokhoz. Mivel a cekaszok árama és feszültsége a stabil táp következtében állandó, így a fűtőtéljesítmény is közel állandónak tekinthető egy-egy mérés során. A hőáram mérésére 2 db AHLBORN FQA018C, 100×100 mm felületű, 2 mm vastag hőárammérő lap került alkalmazásra. A hőárammérő lap nagyszámú sorba kapcsolt hőelemet tartalmaz, a kimenő mV nagyságrendű

feszültség jel közvetlenül a felületegységen áthaladó hőmennyiséggel arányos. A hőárammérő lapok gyárilag kalibráltak ($9,4 \text{ W/m}^2 - 1 \text{ mV}$). Egy hőárammérő lap a fedél közepére ($Q_{\text{felső}}$) és egy másik lap a doboz aljának a közepére ($Q_{\text{alsó}}$) került beépítésre. A hőmérséklet mérésére 2 db National Semiconductor gyártmányú LM35 CN típusú integrált hőmérsékletérzékelő került beépítésre a fedélbe ($T_{\text{felső}}$) és a doboz aljába ($T_{\text{alsó}}$), közvetlenül a hőárammérő lapok mellé. Az 5-30 V táp tartományban működőképes TO92 (plastic) tokozású szenzor $10 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ kimenő jelet ad $0,1 \text{ ohm}$ kimenő impedancia mellett ($I_{\text{ki}} < 1 \text{ mA}$), ezért a kapcsolódó jelvezeték ellenállása nem befolyásolja a mérést. A szenzor $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ és $+150 \text{ }^\circ\text{C}$ tartomány átfogására alkalmas. Kimenete lineáris, a mérési hiba kisebb, mint $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kiértékelési módszer

Mivel a megépített hővezetés-mérő berendezés egy teljesen új berendezés, ezért kiértékelési módszert kellett hozzá kifejleszteni. A kísérleti berendezéssel 2015. január folyamán elvégeztünk egy kalibrációs mérést a tiszta EPS-re vonatkozóan (2. ábra). A vizsgált EPS lemez hővezetési tényezője $0,039 \text{ W/mK}$, amely a gyártó által biztosított érték. Méréseink alapján ez az érték $0,036 \text{ W/mK}$ -re adódott, amely kevesebb, mint 8 %-os eltérést jelent a gyári értékhez viszonyítva.



2. ábra: A tiszta EPS-re vonatkozó kalibrációs mérés eredményei.

Egy mérés jellemzően három napig tartott, mivel a hőtani paraméterek meghatározásához közel egyensúlyi állapot elérése szükséges. A tanulmányban leírt méréseket a laboratóriumban végeztük el ahol a hőmérséklet csak kis mértékben változott. Természetesen a berendezés környezeti hőmérséklete szintén rögzítésre került. A berendezéssel a szabadban is lehet méréseket végezni, amikor néhány nap

alatt kvázi stacionér állapot alakul ki, azaz a paraméterek követik a napi hőingadozást. A 2. ábrán láthatóak a mért hőmérsékletek és hőáramsűrűségek az idő függvényében. A fedélben lévő hőáramsűrűség mérő szenzor mért eredményei pozitív előjellel rendelkeznek, amelyet úgy kell értelmezni, hogy a hő a fűtés hatására a berendezésben lévő minta felé áramlik. A mérő berendezés alsó, doboz részében található hőáramsűrűség mérő szenzor mért értékei negatív előjelűek, amely azt jelenti, hogy a hő a mintából a berendezés alján keresztül a környezet felé távozik. Az alkalmazott hőáramsűrűség mérő szenzorok számos - sorba kapcsolt - hőelemből állnak, amelyek kimenő feszültségének a polaritása jelzi a hőáramlás irányát. A fedélben lévő hőáramsűrűség mérő szenzor által mért értékek csak a fűtő rendszer bekapcsolása után kezdtek el növekedni. Amint a hő a fedélben lévő hőáramsűrűség mérő szenzoron keresztül megérkezik a mérő berendezés aljában lévő hőáramsűrűség mérő szenzorhoz, a mért alsó hőáramsűrűség értékek elkezdnek csökkenni. Ahogyan már korábban említettük a teljes egyensúlyi állapot elérése nem történt meg, de egy kvázi egyensúlyi állapotban a hőáramsűrűségek (Q) és a hőmérsékletkülönbség (ΔT) - amikor a bemenő és a kimenő hőáramsűrűség megegyezik a 100×100 mm-es felületen mért virtuális „csatornán” keresztül - meghatározható (2. ábra). A hő által megtett út (L) ismert, mivel az a hőáramsűrűség mérő szenzorok közötti mért távolság, ami megegyezik a próbatest magasságával. A fent leírtak alapján a hővezetési tényező az alábbi egyenlet segítségével a mért adatokból egyszerűen számítható (1):

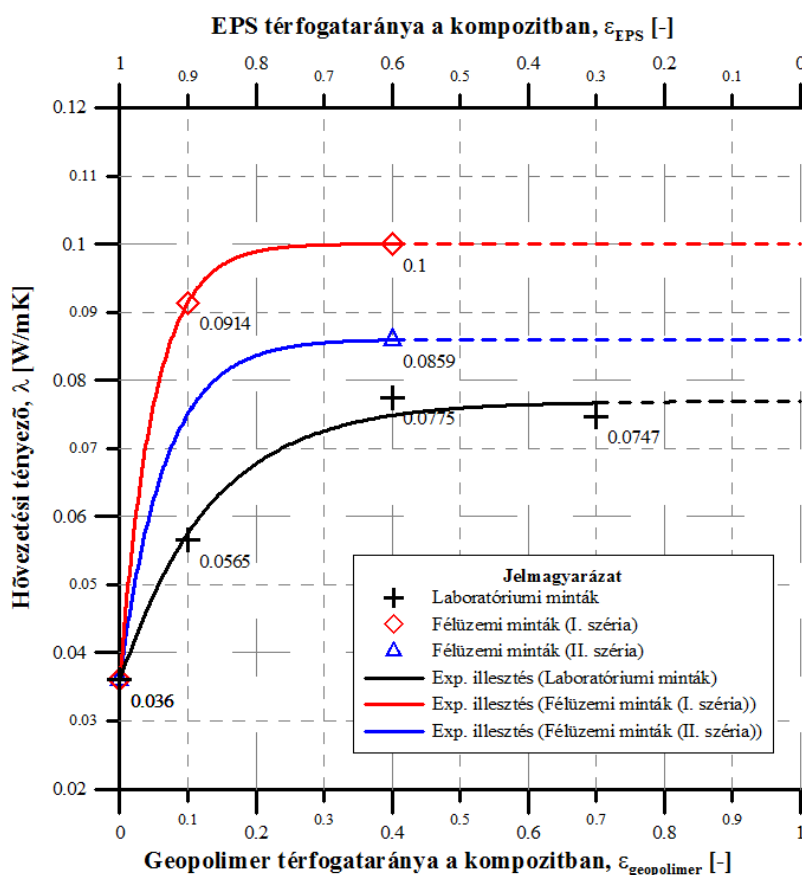
$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{\Delta T} \quad (1)$$

A fűtés bekapcsolása után a fedélben elhelyezett hőmérő szenzor mért értékei is emelkedni kezdenek. 40 V-os konstans tápfeszültség esetében a felső hőmérő szenzor által mért értékek a 40-50 °C-os mérési tartományban álltak be, míg 60 V-os tápfeszültségnél ugyanez a tartomány már 70-80 °C közé esik. A kísérleti berendezés alsó részében elhelyezett hőmérő szenzor mért értékei természetesen alacsonyabbak, mint a felső szenzor által mért értékek, amelynek oka, hogy a berendezés 100 mm-es lábakon áll, tehát az alja vissza tud hűlni a környezethez relatíve közeli hőmérsékleti értékre. A fedélben lévő hőmérő szenzor által mért értékekre illesztett görbének a meredeksége a felfűtési szakaszra vonatkozóan arányos a mért minta fajhőjével (2. ábra). A kifejlesztett kísérleti berendezés nem alkalmazható a fajlagos hőkapacitás mérésére, mert a betáplált hőnek csak egy része áramlik a mintába és melegíti fel azt, a hő többi része gyakorlatilag magát a berendezést-, illetve a környezetet fűti. A mérések alapján meghatározható volt azonban az, hogy a rendszerbe betáplált hőnek csak a kb. 1/3,75-öd része fordítódik a betöltött minta felmelegítésére, amely érték a berendezésre jellemző együttható (I). A berendezésre vonatkozó együttható ismeretében a fajhő és a hődiffúzitás a következőképpen írható fel (2):

$$C_m = \frac{P \cdot I}{m_m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}} \quad \text{és} \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho_B \cdot C_m} \quad (2)$$

MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE, KONKLÚZIÓ

Ahhoz, hogy az eredményeket értelmezni tudjuk, vizsgáljuk meg, hogy egy kétkomponensű keverék, eredő hővezetési tényezőjét milyen tényezők befolyásolják. A vizsgált rendszert egyszerűsítsük úgy le, hogy az egyik komponens a geopolimer. Annak ellenére, hogy a geopolimer alkotót is többféle pernye keverésével állítottuk elő, a geopolimer komponensnek tekintjük az egyik folytonos és homogén szilárd fázisnak. A másik szilárd komponens az EPS, amely szemcsékből áll és ezek a szemcsék vannak a geopolimer szilárd fázisban diszpergálva. Ha az EPS koncentrációja 0 %, akkor a 3. ábra szerint a jobb oldali tengelyen a geopolimer anyagjellemző hővezetési tényezőjét olvashatjuk le. Ha az EPS koncentrációja 100 %, akkor pedig a 3. ábra szerint a bal oldali tengelyen az EPS anyagjellemző hővezetési tényezőjét olvashatjuk le. Egy köztes koncentrációjú keverék esetén az eredő hővezetési tényező attól függ, hogy milyen az EPS szemcsék diszpergáltsági állapota és elhelyezkedése. Az eredő hővezetési tényezőnek két szélső értéke lehet; ezek az ún. elméleti soros- és párhuzamos elrendezéshez tartoznak (Faitli et al., 2015). Virtuálisan képzeljük el, hogy az EPS szemcsék egy összefüggő testet alkotnak. Soros elrendezés esetén a teljes hő átáramlik a geopolimer majd az EPS komponenseken. Ilyenkor az eredő hővezetési tényező minimális, mert a jó szigetelő EPS-en kell a hőnek keresztüláramolnia. Párhuzamos elrendezés esetén a hő egy része a geopolimeren, másik része pedig az EPS-en keresztül áramlik, ilyenkor az eredő hővezetési tényező maximális.



3. ábra: A próbatesteken mért hővezetési tényező értékek összehasonlítása az EPS és a geopolimer térfogatarányának függvényében.

A mérések eredményeit a 3. ábrán összegeztük, amelyekre exponenciális függvényt illesztettünk. Az illesztett exponenciális függvény általános alakban a következőképpen írható fel:

$$Y=T \cdot (1-A \cdot e^{-B \cdot x}) \quad (3)$$

Az illesztett exponenciális függvények paramétereinek értékeit a 2. táblázat foglalja össze.

Minta típusa	Illesztett függvény paramétereinek értékei			
	T	A	B	R ²
Laboratóriumi	0,0769	0,5355	-7,5157	0,99
Félüzemi (I. széria)	0,1000	0,6401	-20,0304	1,00
Félüzemi (II. széria)	0,0860	0,5815	-15,1291	-

2. táblázat: Az illesztett exponenciális függvények paramétereit.

Természetesen a félüzemi próbatestek II. szériájánál mért hővezetési tényező értékekre illesztett exponenciális függvény csak hozzávetőleges, mivel ebben az esetben a görbén csak két mért pont ismert, azonban a laboratóriumi és a félüzemi II. szériás próbatestekre illesztett görbe alapján a trend egyértelműen meghatározható. Az illesztett paraméterek alapján megállapítható, hogy a „T” jelű paraméter - amely a görbe maximumát adja meg - tulajdonképpen a kompozit próbatestekbe adagolt, különböző összetételű, tiszta geopolimerek hővezetési tényezőit adja meg az egyes mintatípusokra vonatkozóan. Az „A” és „B” paraméterek az illesztett exponenciális függvény alakjára vonatkozó állandók.

Összegzőképpen megállapítható, hogy az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatestekben az EPS 60 térfogatszázalék feletti adagolása esetén javul jelentős mértékben a szigetelőképeség (azaz a hővezetési tényező exponenciálisan csökken a kompozitba adagolt EPS térfogatarányának növekedésével). A 60 térfogatszázaléknál kisebb koncentrációban a geopolimerhez adagolt EPS - a méréseink szerint - nem-, vagy csak nagyon kis mértékben befolyásolja a kompozit próbatestek hővezetési tényezőjét.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány az „Innovatív, környezetbarát szigetelőanyag piacorientált kutatás-fejlesztése polisztirol másodnyersanyag hasznosításával” című, PIAC_13-1-2013-0124 azonosítószámú projekt keretében, az Új Széchenyi Terv támogatásával valósult meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. (1999): Thaumaturgo, C. (eds.): **Synthesis and characterization of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica**. In: *Geopolymer '99 Second International Conference, Saint-Quentin, France*, pp. 65-78.

- [2] Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. (2003): **Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate.** *Mater. Res. Bull.* 38, pp. 319-331.
- [3] Caoa, X., Liua, J., Caoa, X., Lia, Q., Huc, E., Fana, F.(2015): **Study of the thermal insulation properties of the glass fiber board used for interior building envelope.** *Energy and Buildings* 107, pp. 49-58.
- [4] Davidovits, J. (1994): **Geopolymers: Inorganic polymeric new materials.** *J. Mater. Educ.* 16, pp. 91-139.
- [5] Davidovits, J. (2011): **Geopolymer chemistry and application.** *Institut Geopolimère 16 rue Galilée F-02100 Saint-Quentin France*, ISBN: 9782951482050, pp. 283-286.
- [6] Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Jambrich R., Murányi A., Kontra J., Várfalvi J. (2014): **Berendezés és eljárás települési szilárd hulladékok termikus és fizikai jellemzőinek a meghatározására.** *Szabadalmi bejelentés: P1400481*, 2014.10.13.
- [7] Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Murányi A. (2015): **Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills.** *Waste Management* 36:(1), pp. 213-221.
- [8] Jelle, B.P. (2011): **Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities.** *Energy and Buildings* 43, pp. 2549–2563.
- [9] Komintzas, K. Zaharaki, D. (2007): **Geopolymerisation: A review and prospects for the mineral industry.** *Mineral Engineering* 20, pp. 1261-1277.
- [10] Makai A., Kiss J., Mucsi G. (2016): **A polisztirol hasznosításáról általában.** *30th microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference.* Megjelenés alatt.
- [11] Mádayi F., Kristály F., Mucsi G. (2015): **Microstructure, Mineralogy and Physical Properties of Ground Fly Ash Based Geopolymers.** *Ceramics-Silikaty* 59:(1), pp. 70-79.
- [12] Mucsi G., Csöke B., Molnár Z. (2012): **Alkáli aktivált pernyealapú kötőanyag vizsgálata.** *HulladékOnline elektronikus folyóirat*, 3/1.
- [13] Mucsi G., Kumar S., Csöke B., Kumar R., Molnár Z., Rácz Á., Mádayi F., Debreczeni Á. (2015): **Control of geopolymer properties by grinding of land filled fly ash.** *International Journal of Mineral Processing* 143: pp. 50-58.
- [14] Panyas, D., Giannopoulou, I.P., Perraki, T. (2007): **Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers.** *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 301, pp. 246-254.
- [15] The US Department of Energy (2002): **Insulation fact sheet with addendum on moisture control, DOE/CE-0180, USA.**