Geopolimer-EPS kompozit szigetelő anyagok eredő hővezetési tényezőjének elméleti és kísérleti vizsgálata

MAGYAR Tamás

A Miskolci Egyetem Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolájában 2016. márciusában szerzett abszolutúriumot, jelenleg doktorjelölt. Környezetmérnöki MSc diplomáját 2011-ben szerezte a Miskolci Egyetemen. Fő kutatási témája: A települési szilárd hulladéklerakókban keletkező bomlási hő kinyerésének és hasznosításának vizsgálata, illetve a diszperz anyagok hőtani paramétereinek vizsgálata.

FAITLI József

Okleveles bányagépészeti- és villamossági mérnök (1989), habilitált doktor, egyetemi docens, intézeti tanszékvezető a Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetének, Mechanikai Eljárástechnikai Intézet Tanszékén. Fő kutatási témája a mechanikai eljárástechnika és a hulladékélelőkészítés.

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. július 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.

MAGYAR TAMÁS • Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

• magyar.tamas@uni-miskolc.hu

FAITLI JÓZSEF • Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

• jozsef.faitli@uni-miskolc.hu

SZABÓ ROLAND • Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

• roland.szabo@uni-miskolc.hu

Érkezett: 2017. 08. 05. • Received: 05. 08. 2017. • <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2017.13>

Experimental- and theoretical investigation of the resultant thermal conductivity of geopolimer-EPS composite insulating materials

Today it is very important to minimize the use of energy, which is especially true for the thermal insulation of buildings. If heat-insulating materials for the construction industry can be produced from wastes or industrial byproducts (plastics, ashes), this innovative technology also contributes to the sustainability of modern living. Therefore, the main objective of the present paper is the theoretical and experimental investigation of the resultant thermal conductivity of lab scale and pilot scale geopolimer-polystyrene (EPS) composite insulating materials. The thermal conductivity measurements have been carried out by a new self-developed apparatus. The theories of the so-called serial and the parallel heat flow cases in two phase disperse systems are well known in the literature. The parallel and the serial heat flow models have been linked together in a theoretical universal equation. The dispersion constant (D) parameter has been introduced for the universal equation. The dispersion constant parameter is suitable for the characterization of the dispersion state of two phase disperse systems. Comparing the results of the experimental and theoretical resultant thermal conductivities it was concluded that the dispersion state of the measured geopolimer-EPS composite insulating materials is approximately 0.8. It was also observed that as the quantity of the ground fly ash increases the resultant thermal conductivity increases as well. Keywords: geopolimer, EPS, thermal insulating material, thermal conductivity, serial and parallel heat flow model.

Kulcsszavak: geopolimer, EPS, hőszigetelő anyag, hővezetési tényező, soros és párhuzamos hővezetési modell.

1. 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 energiamegtakarítást eredményezhet. Az USA Energiaügyi Minisztériumának jelentése [1] 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 hőszigeteléseket. 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) [2]. Az épületek esetében alkalmazott hőszigetelő 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 hőmérsékletkülönbség következtében létrejövő és rajta áthaladó hőárammal szemben, tehát annál jobb hőszigetelő anyagról beszélhetünk.

Másrészt, a modern életvitel jelentős környezetterheléssel jár, ezért a magas életszínvonal fenntarthatósága érdekében alapvető cél, hogy a hulladékká vált anyagokat vagy melléktermékeket vissza tudjuk forgatni a gazdaságba (EU körkörös gazdaság elve). Igen nagy tömegben keletkeznek salak és pernye anyagok a szén és lignittüzelésű erőművekben, amely anyagok már deponált mennyisége is jelentős. Világméretű probléma a hulladékká váló műanyagok óriási mennyisége is, amelynek egy kis szelete a polisztirol. Amennyiben pernye és polisztirol melléktermék és hulladék anyagokból jó minőségű épületi szigetelő anyagokat tudnánk gyártani, az mind az energiahatékonyság, mind a körkörös gazdaság szempontjából előnyös lenne.

2. Hővezetés többfázisú diszperz rendszerekben

A többfázisú diszperz rendszerekben a hő vezetésének jelensége igen összetett folyamat. A termodinamika alapjait figyelembe véve egy adott rendszer (anyaghalmoz) belső energiájának a megváltozása a következő négy típusú energiacsere következményeként jöhet létre:

- hőátadás, amelyet a hőmérséklet és az entrópia;
- mechanikai energia, vagy más néven a térfogatváltozási munka, amelyet a nyomás és a térfogat;
- kémiai energia, amelyet a vegyérték és a reakcióba lépő anyagok moláris mennyisége; illetve,
- a felületi energia, amelyet a felületi feszültség és a fázisok közötti felület jellemeznek.

Egyensúlyi állapotban a különféle energiatípusokat jellemző paraméter párok egyike alapvetően meghatározza az egyensúlyi állapotot. Roth szerint [3], létezik egy olyan termodinamikai potenciál, amelynek a jellemzői a rendszer méretével egyenesen arányosak, illetve amelynek szélső értéke (minimuma) van egyensúlyi állapotban. Egy többfázisú diszperz rendszer eredő hővezetési tényezőjének vizsgálata során az uralkodó energiacsere típusokat kell figyelembe venni. Egy folytonos egyfázisú anyag belső energiája megfelel az anyag mikroszkopikus építő elemeinek molekuláris szintű kinetikus energiáinak összegével. A magasabb hőmérséklettel rendelkező atomok, molekulák nagyobb kinetikus energiával rendelkeznek – tehát gyorsabban és nagyobb amplitúdóval rezegnek –, amelyet a szomszédos molekulák felé képesek átadni. Gyakorlatilag ez az a mechanizmus, amelynek segítségével terjed a hő az anyagban a magasabb hőmérsékletű részek felől az alacsonyabb hőmérsékletű részek felé. Többfázisú rendszer esetén a hőterjedés a fázishatárokon lévő molekulák között hasonlóan – oszcilláló energiacsere segítségével – megy végbe, mint az előzőleg említett esetben. A különböző anyagok hőtani viselkedése nagyban függ a fázisváltástól, azaz a halmazállapot megváltozásától. Az eredő hőtani paraméterek a diszperz anyagban lejátszódó mikro folyamatokat – így a fázisváltást, a rejtett hőt a gőz fázisban és az érzékelhető hőt a folyadék fázisban – is magukban foglalják.

A kapcsolódó szakirodalmat áttekintve megállapítható, hogy Maxwell [4] volt az első, aki nagyon kis koncentrációban jelen lévő monodiszperz szemcséket tartalmazó kétfázisú keverékek eredő hővezetési tényezőjét vizsgálta. A vizsgálata során feltételezte, hogy a szemcsék között nincs érintkezés, így azok között nem jönnek létre hőhidak. Később Rayleigh [5], illetve Zehner és Schundler [6] fejlesztették tovább a Maxwell [4] által megalkotott modellt. Zehner és Schundler [6] az egyszerűsített modell alapján feltételezte, hogy a diszperz rész azonos méretű gömb alakú szemcsékből áll. Az említett modellek alapján a kétfázisú durva diszperz rendszer eredő hővezetési tényezője a koncentráció függvényében az 1. ábrán látható, amikor is a szilárd diszperz rész hővezetési tényezője százszorosa ($\lambda_2/\lambda_1=100$) a diszperziós közeg hővezetési tényezőjének.

1. ábra Monodiszperz gömb alakú szemcséket tartalmazó durva diszperz rendszerek eredő hővezetési tényezője a koncentráció függvényében [7]

Fig. 1. The resultant thermal conductivities of two-phase disperse systems containing only spherical monodisperse particles as a function of the concentration [7]

A soros és párhuzamos hővezetési modellek ismertetéséhez vizsgáljunk meg egy kétfázisú szilárd-gáz diszperz rendszert. A szilárd fázis legyen a diszpergált fázis, a gáz fázis pedig a diszperziós közeg. A térfogathányadok (koncentrációk) összege legyen egységnyi (1), azaz:

$$\varepsilon_s + \varepsilon_g = 1 \quad (1)$$

A bemutatott rendszer leegyszerűsítve modellezhető olyan módon, hogy az összes szemcsét egy összefüggő szilárd testnek képzeljük el, amely mellett a gáz fázis összefüggően kitölti a fennmaradó térrészt. A valódi diszperz rendszerhez képest ez a modell nagymértékű egyszerűsítést jelent, azonban a gyakorlatban találkozhatunk ilyen, nem diszperz anyagokkal. Amennyiben a valós diszperz állapotot ilyen módon leegyszerűsítettük, illetve modelleztük, a hőáramlás irányát és a fázisok elhelyezkedését tekintve kétféle szélsőséges elrendezésről (állapotról) beszélhetünk. Amennyiben a hő áramlása sorosan megy végbe a diszperz rendszert alkotó fázisokon keresztül (2. ábra), abban az esetben az eredő hővezetés értéke alacsony lesz, ugyanis a gáz fázis hővezetési tényezője nagyságrendekkel alacsonyabb – ez jelenti tehát az alsó korlátot (1. ábra) –, mint a szilárd fázis esetében.

2. ábra Soros hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre (elméleti minimum)

Fig. 2. Serial heat flow model for two-phase disperse systems (theoretical minimum)

Az egységnyi felületen áthaladó hőáram kétfázisú soros elrendezés esetén a (2) képlettel számítható:

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{L_s}{\lambda_s} + \frac{L_g}{\lambda_g}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

A soros elrendezéshez tartozó eredő hővezetési tényezőt a (3) képlet segítségével kaphatjuk meg:

$$\lambda = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_g}{\varepsilon_s \cdot \lambda_g + \varepsilon_g \cdot \lambda_s} \quad (3)$$

Az egységnyi felületen áthaladó hőáram kétfázisú párhuzamos elrendezés esetén (3. ábra) megegyezik a két párhuzamosan elhelyezkedő fázison áthaladó rész hőáramok összegével (4), amely gyakorlatilag az elméleti maximum értéket jelenti (1. ábra).

3. ábra Párhuzamos hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre (elméleti maximum)

Fig. 3. Parallel heat flow model for two-phase disperse systems (theoretical maximum)

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_g = \frac{\lambda_s}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_s \cdot \Delta T + \frac{\lambda_g}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_g \cdot \Delta T \quad (4)$$

A hőáramlás irányát tekintve az alkotó fázisok párhuzamos elrendezése esetében az eredő hővezetési tényező az (5) egyenlet segítségével adható meg:

$$\lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_g \cdot \varepsilon_g \quad (5)$$

Egy valós kétfázisú (szilárd-gáz) diszperz rendszerben az eredő hővezetési tényező az alsó (soros hővezetési modell) és felső (párhuzamos hővezetési modell) korlát közé kell, hogy essen, amelyre számos paraméter hatással van. Ezek a paraméterek főként a szemcseméret-, a szemcsealak-, és a szemcsesűrűség-eloszlás, illetve alapvetően a koncentráció.

3. Anyagok és módszerek

A 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.

3.1. Felhasznált anyagok

3.1.1. Geopolimer

A geopolimerek amorf alumino-szilikátok, melyek lúgos közegben (KOH, NaOH) szilícium-dioxid és alumino-szilikát-oxidok között lejátszódó reakció során állíthatók 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 [8,

9]. Minden olyan elsődleges vagy másodlagos nyersanyag alkalmas geopolimer gyártására, amely reaktív szilícium-dioxid és alumínium-oxid fázisokat tartalmaz, mint például a természetes kőzetek vagy ipari melléktermékek (pl. erőműi pernye, salak és vörösiszap) [8, 9, 10, 11]. 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 [12, 13, 14]. A geopolimer szilárdsága a pernye őrlésével szabályozható [15, 16].

3.1.2. Expandált polisztirol (EPS)

Az expandált polisztirolhab (EPS) alapanyaga hőre lágyuló polimerizált sztirol, 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 [17]. 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 [18].

3.2. Geopolimer-EPS kompozit próbatestek gyártása

A próbatestek gyártása, illetve vizsgálata laboratóriumi- és félüzemi (I. és II. széria) méretben történt. A laboratóriumi szériás minták előállítása során őrlött 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, majd vibrációs tömörítettük. Az elkészített próbatestek magassága változó volt, amelyeket a hővezetési tényező mérése során figyelembe vettünk.

4. ábra A próbatestek elkészítésénél alkalmazott tiszaujvárosi (őrölt) és a vistontai (nyers) pernye szemcseméret-eloszlása

Fig. 4. Particle size distributions of the applied fly ashes from Tiszaujváros (ground) and Vistonta (raw)

A félüzemi mérések két szériája ehhez képest annyival tért el, hogy a geopolimer komponens pernye összetételét a kötési idő szabályozása érdekében megváltoztattuk: az I. szériában 90 m/m% nyers visontai pernye és 10 m/m% őrlött tiszaujvárosi pernye, a II. szériában pedig 80 m/m% nyers visontai pernye és 20 m/m% őrlött tiszaujvárosi pernye volt az összetétel. A próbatetek előállításához alkalmazott pernyék szemcseméret-eloszlásait a 4. ábra, a nevezetes szemcseméreteket, illetve a fajlagos felület nagyságát a 1. táblázat szemlélteti.

Pernye megnevezése	x_{10} (μm)	x_{50} (μm)	x_{90} (μm)	Fajlagos felület (cm^2/cm^3)
Visontai pernye (nyers)	13,2	46,7	85,4	2018,0
Tiszaujvárosi pernye (őrlött)	5,5	17,3	49,4	4977,4

1. táblázat A próbatetek elkészítésénél alkalmazott tiszaujvárosi (őrlött)- és visontai (nyers) pernye nevezetes szemcseméretei, illetve a fajlagos felület nagysága
Table 1. The characteristic particle sizes and the specific surface areas of the applied fly ashes from Tiszaujváros (ground) and Visonta (raw)

További eltérés a laboratóriumi kísérletekhez képest, hogy a félüzemi szériák esetében 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 próbatetek (5. ábra) összetevőinek arányait a 2. táblázatban adjuk meg.

5. ábra Az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatest [18]
Fig. 5. A geopolimer-EPS composite specimen

Összetevők, [V/V %]	Próbatetek típusa												
	Laboratóriumi					Félüzemi (I. széria)				Félüzemi (II. széria)			
EPS	100	98	97	90	60	100	98	97	60	100	98	97	60
Geopolimer	0	2	3	10	40	0	2	3	40	0	2	3	40

2. táblázat Az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatetek összetételi arányai
Table 2. Composition ratios of the geopolimer-EPS specimens

3.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére kifejlesztett berendezés és a kiértékelési módszer

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 mérőlegések 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 a többfázisú diszperz rendszerek eredő hőtani paramétereinek a mérésére is.

A kifejlesztett berendezés két fontos része a fűtéssel ellátott fedél és az alsó nyitott doboz (6. ábra), amelyeket vörösrézről alakítottunk ki, a jobb hővezetés biztosítása érdekében. 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 berendezéssel vizsgálható minta maximális magassága 60 mm.

6. ábra A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére kifejlesztett berendezés sematikus rajza

Fig. 6. Schematic of the developed thermal properties measuring device for disperse systems

A fűtőszálak elektromos táplálását nem közvetlenül a 230 V effektív feszültségű hálózatról, hanem 0...80 V közötti változtatható feszültségű laboratóriumi tápegységből nyerjük, így a berendezés rugalmasan igazítható az eltérő tulajdonságú vizsgálati anyagokhoz. Mivel a fűtőszálak árama és feszültsége a stabil táp következtében állandó, így a fűtőteljesítmény (P) 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 LM35CN 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 $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mivel a megépített berendezés egy teljesen új konstrukció, ezért kiértékelési módszert is kellett hozzá fejleszteni. A kísérleti berendezéssel 2015 januárjában – többek közt – elvégeztünk egy kalibrációs mérést a tiszta EPS-re vonatkozóan (7. 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.

Egy mérés jellemzően három napig tartott, mivel a hőtani paraméterek meghatározásához közel egyensúlyi állapot elérése szükséges. A tanulmányban elvégzett mérések laboratóriumi körülmények között történtek, éppen ezért a külső, környezeti hőmérséklet közel állandónak tekinthető. Természetesen

a berendezés környezeti hőmérséklete is 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 7. 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 hőmérséklet-különbség (ΔT) – amikor a bemenő- és a kimenő hőáramsűrűség megegyezik a $100 \times 100 \text{ mm}$ -es felületen mért virtuális „csatornán” keresztül – meghatározható (7. ábra). A hő által megtett út (L) ismert, mivel az a hőáramsűrűség mérő szenzorok közötti mért távolság, amely gyakorlatilag megegyezik a próbatest

7. ábra A tiszta EPS-re vonatkozó kalibrációs mérés eredménye
Fig. 7. Results of the calibration measurement with pure EPS

magasságával. A fent leírtak alapján a hővezetési tényező a (6) egyenlet segítségével a mért adatokból egyszerűen számítható:

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{\Delta T} \quad (6)$$

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 esett. 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 húlni a környezethez relatíve közeli hőmérsékleti értékre. A fedélben lévő hőmérő szenzor által mért értékekre illesztett görbének a meredeksége a felfűtési szakaszra vonatkozóan ($\Delta T/\Delta t$) arányos a mért minta fajhőjével. A kifejlesztett kísérleti berendezés nem alkalmazható közvetlenül a fajlagos hőkapacitás (C_m) 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 azonban meghatározható volt, 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-, a minta tömegének (m_m)-, illetve halmazsűrűségének (ρ_B) ismeretében a fajhő és a hődiffúzitás (κ) a következőképpen írható fel (7):

$$C_m = \frac{P \cdot I}{m_m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}} \quad \text{és} \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho_B \cdot C_m} \quad (7)$$

4. Eredmények

4.1. A hővezetés univerzális egyenlete kátfázisú diszperz rendszerekre

A korábbiakban beláttuk, hogy a diszperz állapotú anyagokban vezetéssel megvalósuló eredő hőátadás, röviden a hővezetés, azért nagyon bonyolult jelenség mert ez számtalan belső hővezetési és a diszperz rész és diszpergáló közeg közötti határfelületeken hőátadási részjelenségekre bontható. Valódi diszperz anyagokban a szemcsék, cseppek és buborékok száma igen nagy, a jellemzőik pedig igen változatosak lehetnek, ezért nem az volt a célunk, hogy a komponensek fizikai jellemzői alapján adjunk becslést az eredő hővezetésre. Ezzel szemben egy konkrét mérhető anyag, azaz adott eredő diszpergáltsági állapotban szeretnénk az állapotot egy mérőszámmal jellemezni és az eredő hővezetési tényezőt mérésrel és számítással meghatározni. A 3. táblázatban összefoglaltuk azt a gondolatmenetet, amellyel a kátfázisú esetre vonatkozó univerzális eredő hővezetési tényező egyenletét (8) vezettünk le.

A 2. fejezetben már összefoglaltuk – példaként szilárd-gáz diszperz rendszerre – a kátfázisú hővezetés lehetséges két szélső esetét, a soros- és párhuzamos elrendezésű hővezetési eseteket. A levezetés érdekében jelöljük K-val a két fázis hővezetési tényező értékeinek a hányadosát. A cél az, hogy

a soros- és párhuzamos hővezetési egyenleteket egy olyan kombinált egyenletbe foglaljuk össze, amely tartalmazza, az un. D-diszperzitásállandót és D=1 esetén a soros, míg D=0 esetén a párhuzamos egyenletre egyszerűsödik vissza. Ennek érdekében mindkét esetre λ/λ_s un. célfüggvény határozható meg, amely segítségével a (8) egyenlet felírható.

Kátfázisú rendszer (szilárd-gáz) eredő hővezetési tényezője soros elrendezés esetén	Kátfázisú rendszer (szilárd-gáz) eredő hővezetési tényezője párhuzamos elrendezés esetén
$\frac{1}{\lambda} = \frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_g}{\lambda_g}$	$\lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_g \cdot \varepsilon_g$
$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s$ és $\lambda_g = K \cdot \lambda_s$	
(ahol K az arányossági tényező, amely megmutatja, hogy λ_s értéke hány szorosa, illetve hányad része λ_g értékének)	
$\frac{1}{\lambda} = \frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{1 - \varepsilon_s}{K \cdot \lambda_s}$	$\lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K \cdot \lambda_s$
$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_s} \cdot \left(\varepsilon_s + \frac{1 - \varepsilon_s}{K} \right)$	$\lambda = \lambda_s \cdot [\varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K]$
$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_s} \cdot \frac{K \cdot \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)}{K}$	
$\lambda = \lambda_s \cdot \frac{K}{K \cdot \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)}$	
Célfüggvény:	Célfüggvény:
$\frac{K}{K \cdot \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)}$	$\varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K$
Kátfázisú rendszer (szilárd-gáz) eredő hővezetési tényezőjének univerzális egyenlete (soros- és párhuzamos hővezetési modell összekapcsolása):	

$$\lambda = \lambda_s \cdot \left\{ \frac{K}{[K \cdot \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)] \cdot [\varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K]} \right\}^D \cdot [\varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K] \quad (8)$$

ahol D a diszperzitás állapot, D=1 esetén a soros-, D=0 esetén a párhuzamos elrendezéshez tartozó eredő hővezetési tényező képletét kapjuk vissza.

3. táblázat A hővezetés univerzális egyenlete kátfázisú diszperz rendszerekre
Table 3. Theoretical universal equation of heat flow in two-phase disperse systems

4.2. A mérési eredmények és az új modell összevetése

A hővezetési tényező méréseket kátfázisú geopolimer-EPS rendszerekben végeztük el, ami szilárd-szilárd durva diszperz rendszer. A geopolimer a diszperziós közeg, amiben az EPS szemcsék diszpergálva vannak. Annak ellenére, hogy a geopolimer komponens többféle pernye is alkotja, a geopolimer komponens tekintésük az egyik folytonos és homogén szilárd fázisnak. A másik szilárd komponens ebben az esetben az EPS. A laboratóriumi-, illetve a félüzemi I. és II. szériás mintákon elvégzett hővezetési tényező meghatározásának mérési eredményeit a 4. táblázatban foglaltuk össze.

A 8. ábra szemlélteti a kifejlesztett mérőberendezéssel meghatározott hővezetési tényező értékeit (fekete háromszög) a geopolimer- és az EPS komponens térfogatarányainak függvényében a laboratóriumi szériás minták esetében. A mért hővezetés tényezők mellett feltüntettük az egyes diszperzitás

Összetevők, [V/V %]	Próbatestek típusa												
	Laboratóriumi					Félüzemi (I. széria)				Félüzemi (II. széria)			
EPS	100	98	97	90	60	100	98	97	60	100	98	97	60
Geopolimer	0	2	3	10	40	0	2	3	40	0	2	3	40
Mért hővezetési tényező, λ [W/mK]	0,036	0,043	0,045	0,055	0,078	0,036	0,043	0,045	0,100	0,036	0,043	0,045	0,086

4. táblázat A laboratóriumi, a félüzemi I. és II. szériás geopolimer-EPS kompozit minták mért hővezetési tényezői a próbatestek összetételi arányainak feltüntetésével
Table 4. Results of the thermal conductivity measurements on lab and pilot scale geopolimer-EPS specimens

állapotokhoz tartozóan az elméleti, eredő hővezetési tényezők görbéit is (piros: $D=0$ -0,4, szürke: $D=0,5$, illetve kék: $D=0,6$ -1 színekkel jelölve), amelyeket a kétfázisú diszperz rendszerekre felírt univerzális hővezetés egyenletének (8) segítségével számítottunk ki. Ahogyan a 2. és 4.1. fejezetekben részleteztük, a 8. ábrán piros folytonos vonallal jelölt párhuzamos modell adja meg az eredő hővezetési tényező elméleti maximum értékeit, amely esetben az univerzális egyenletben bevezetett D -diszperzitás állapot értéke 0. Az elméleti minimum értékét a soros modell jelenti (kék folytonos vonal), a modellhez tartozó D -diszperzitás állapot értéke ebben az esetben pedig 1. Az elméleti minimum és maximum értékek között a vizsgált kétfázisú diszperz rendszerre vonatkozóan az egyes diszperzitás állapotoknak ($D=0,1...0,9$) megfelelően meghatározott eredő hővezetési tényezők görbéit láthatjuk szaggatott vonalakkal jelölve. A 8. ábra tehát a mért és az új egyenlet (8) szerinti elméleti úton meghatározott eredő hővezetési tényezők összehasonlítására alkalmas. Az elméleti számítások esetében fontos megjegyeznünk, hogy az adott kompozitra jellemző diszperzitás állapot (D) értéke és a tiszta, geopolimer komponens hővezetési tényezője numerikus iterálással került meghatározásra. A tiszta EPS hővezetési tényezője a mérések alapján már ismert volt, azonban a geopolimer komponens hővezetési tényezőjének meghatározása sokkal nehezebb feladatot jelentett, ugyanis a tiszta geopolimer hővezetési tényezője leginkább az alkalmazott pernye szemcseméret-eloszlásától – részletesen a 2. fejezetben felsorolt egyéb paraméterektől –, ezáltal a tiszta, geopolimer komponens testsűrűségétől függ. Annak érdekében, hogy a laboratóriumi-, a félüzemi I. és II. szériás kompozit mintákhoz tartozó tényleges diszperzitás állapotot meg tudjuk állapítani, a mért és az egyes diszperzitás állapotokra vonatkozóan elméleti úton meghatározott eredő hővezetési tényezők értékei alapján kiszámítottuk a korrigált empirikus szórás értékeit is (szürke oszlopokkal szemlélítve). A kompozitra vonatkozó tényleges diszperzitás állapotot az a jellemző D érték fogja jellemezni, amely esetében a korrigált empirikus szórás értéke minimális.

A 8. ábra bal oldalát tekintve az iterálással meghatározott tiszta geopolimer komponens hővezetési tényezőjét olvashatjuk le, amely a laboratóriumi szériás minták esetében 0,7 W/mK, ebben az esetben az EPS térfogataránya természetesen 0 %. Ugyanezen ábra jobb oldalán a tiszta EPS komponens hővezetési tényezőjét láthatjuk, amely a mérések alapján 0,036 W/mK értékre adódott. Egy köztes koncentrációjú keverék esetén az eredő hővezetési tényező értéke elsősorban attól függ, hogy milyen az EPS szemcsék diszpergáltsági állapota, mennyisége, illetve elhelyezkedése a geopolimer komponensben. A 8. ábrán

az is jól látható, hogy a korrigált empirikus szórás értéke a $D=0,8$ esetében minimális, tehát a kompozit anyag diszpergáltsági állapota a soros hővezetési modellhez, azaz a kék folytonos vonallal jelölt elméleti minimum értékéhez esik közelebb.

8. ábra A mért és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a laboratóriumi minták esetében

Fig. 8. Comparison of experimental- and theoretical resultant thermal conductivities of lab scale geopolimer-EPS composite materials as function of a component volumetric ratio

A laboratóriumi szériás minták esetében a 8. ábrához hasonlóan, elkészítettük a félüzemi I. és II. szériás mintákhoz tartozó ábrákat is (9. és 10. ábra).

9. ábra A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a félüzemi I. szériás minták esetében

Fig. 9. Comparison of experimental- and theoretical resultant thermal conductivities of pilot scale geopolymer-EPS composite materials (I.) as function of a component volumetric ratio

A félüzemi I. szériás mintákra vonatkozóan az iterálással meghatározott geopolimer komponens hővezetési tényezője 0,8 W/mK-re adódott (9. ábra), amely magasabb, mint a laboratóriumi szériás minták esetében. Ennél a szériánál a geopolimer komponenst alkotó pernye már 10 m/m%-ban őrölt pernyét is tartalmazott, amely a testsűrűség növekedését eredményezte. A 9. ábra alapján a félüzemi I. szériás kompozit mintákra jellemző diszperzitás állapot értéke 0,7-re adódott.

A félüzemi II. szériás minták eredményeit tekintve az iterálással meghatározott tiszta, geopolimer fázis hővezetési tényezője tovább nőtt, értéke 1 W/mK (10. ábra). A geopolimer komponensre vonatkozó, tovább növekvő hővezetési tényező magyarázata, hogy az ebben a szériában készült próbatestek esetében az alkalmazott pernye már 20 m/m%-ban tartalmazott őrölt pernyét. A diszperzitás állapot értéke a félüzemi II. szériás minták esetében a laboratóriumi szériás mintákhoz hasonlóan 0,8.

10. ábra A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a félüzemi II. szériás minták esetében

Fig. 10. Comparison of experimental- and theoretical resultant thermal conductivities of pilot scale geopolymer-EPS composite materials (II.) as function of a component volumetric ratio

5. Megállapítások

Összegzésképpen megállapítható, hogy az elkészült próbatesteken a mért- és az elméleti, eredő hővezetési tényező meghatározására felírt univerzális egyenlet (soros- és párhuzamos hővezetési modell összekapcsolása kétfázisú diszperz rendszerekre) által kapott értékek jól korrelálnak egymással. A kidolgozott módszer és a bevezetett új egyenlet alapján a geopolimer komponens ismeretlen hővezetési tényező értéke is kiszámítható volt, mert a mérésekre legjobban illeszkedő görbe (meghatározott D-diszperzitásállandó esetén), – amelyet a legkisebb korrigált empirikus szórás jellemez – kimetszi ezt az értéket a 0 % EPS tartalomhoz tartozóan. A várakozásoknak megfelelően, az őrölt pernye arányának növekedésével az iterálással meghatározott, tiszta geopolimer komponens hővezetési tényezőjének értéke is nő. A diszperzitás állapot tekintetében megállapítható, hogy mindhárom széria esetében az értéke 0,8 körüli volt, tehát nagyjából azonos

kevertégi állapotot sikerült elérni a próbatetek előállításakor. A kétfázisú rendszerre felírt eredő hővezetési tényező univerzális egyenletének segítségével – amennyiben ismert a két alkotó fázis hővezetési tényezője, illetve a komponensek aránya a kompozitban –, meghatározható a keverékre vonatkozó diszperzitás állapot értéke is, amellyel jellemezhető az egyik fázis másik fázisban való diszpergáltsági állapota.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány részben az „Innovatív, környezetbarát szigetelőanyag piacorientált kutatás-fejlesztése polisztirol másodnyersanyag hasznosításával - PIAC_13-1-2013-0124” megnevezésű projekt keretében a Magyar Kormány támogatásával, a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség kezelésében, a Kutatási és Technológiai Innovációs Alap finanszírozásával valósult meg.

A tanulmány részben a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Felhasznált irodalom

- [1] The US Department of Energy (2002). Insulation fact sheet with addendum on moisture control. DOE/CE-0180, USA.
- [2] 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., <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.007>
- [3] Roth, K. (2012): Soil Physics. Lecture Notes (v2.2). *Institute of Environmental Physics*, Heidelberg University, p. 391.
- [4] Maxwell, J. C. (1865): A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 155.
- [5] Rayleigh, L. (1892): On the influence of obstacles in rectangular order upon the properties of a medium. *Philosophical magazine*, Vol. 56, pp. 481-502.
- [6] Zehner, P. – Schlunder, E. U. (1970): Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures (in German). *Chemie Ingr. Tech.* 42, pp. 933-941.
- [7] Kandula, M. (2011): On the Effective Thermal Conductivity of Porous Packed Beds with Uniform Spherical Particles, *Journal of Porous Media*, Volume 14., pp. 919-926., <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v14.i10.70>
- [8] Davidovits, J. (1994): Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J. Mater. Educ.* 16, pp. 91-139.
- [9] Davidovits, J. (2011): Geopolymer chemistry and application. *Institut Geopolimère 16 rue Galilée F-02100 Saint-Quentin France*, ISBN: 9782951482050, pp. 283-286.
- [10] Komintzas, 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>
- [11] Mucsi G. – Csöke B. – Molnár Z. (2012): Alkáli aktivált pernyéalapú kötőanyag vizsgálata. *HulladékOnline* elektronikus folyóirat 3/1.
- [12] 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., [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(02\)01022-X](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(02)01022-X)
- [13] Barbosa, V. F. F. – MacKenzie, K. J. D. (1999): Synthesis and characterization of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica. In: *Geopolymer '99 Second International Conference*, Saint-Quentin, France, Thaumaturgo, C. (eds.), pp. 65-78.
- [14] 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: Physicochem. Eng. Aspects* 301, pp. 246-254.
- [15] Mucsi G. – Kumar S. – Csöke B. – Kumar R. – Molnár Z. – Rácz Á. – Márai F. – Debreczeni Á. (2015): Control of geopolymer properties by grinding of land filled fly ash. *International Journal of Mineral Processing* 143: pp. 50-58., <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.08.010>
- [16] Márai F. – Kristály F. – Mucsi G. (2015): Microstructure, Mineralogy and Physical Properties of Ground Fly Ash Based Geopolymers. *Ceramics-Silikaty* 59(1), pp. 70-79.
- [17] 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., <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- [18] Makai A. – Kiss J. – Mucsi G. (2016): The Possibilities of Polystyrene Waste Recycling. XXX. *microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2016.04.21-2016.04.22. Miskolc: University of Miskolc, 2016. Paper A_9.

Ref.:

Magyar Tamás – Fajtli József – Szabó Roland: CGeopolimer-EPS kompozit szigetelő anyagok eredő hővezetési tényezőjének elméleti és kísérleti vizsgálata
 Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 69, No. 3 (2017), 74–82. p.
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2017.13>

NAXOS2018

13-16 June 2018

6th International Conference
on
Sustainable Solid Waste Management

<http://www.naxos2018.uest.gr>

The Conference aims to address the significant issue of sustainable solid waste management through the promotion of safe practices & effective technologies. The Conference focuses mainly on modern solid waste technologies. It aims to stimulate the interest of scientists and citizens and inform them about the latest developments in the field of municipal solid waste management.