



Nagy Balázs

okl. szerkezet-
építőmérnök,
okl. épületenergetikai
szakmérnök
doktorandusz,
BME Építőanyagok
és Magasépítés
Tanszék

Hőszigeteléssel töltött falazóblokkok laborvizsgálatokkal támogatott komplex modellezése

Jelen tanulmány a hőszigetelő anyagokkal töltött falazóblokkok állandósult állapotbeli kapcsolt hő-, lég- és nedvességtranszport-vizsgálatait mutatja be. A vizsgálatok célja, hogy egy általánosan elterjedt geometriájú 44 cm-es kerámia falazóblokkot vizsgáljunk különböző töltetekkel: kőzetgyapottal, expandált perlittel, poliuretánhabbal, aerogéllal és levegővel. A vizsgálatok során a laboratóriumban mért anyagtulajdonságokat és szabványos peremfeltételeket alkalmaztam.

This study deals with steady-state conjugated heat, air and moisture transport behaviour of thermal insulation filled masonry blocks. The aim of the research is to analyse a commonly used 44 cm thick ceramic masonry block geometry with different filler materials, such as stone wool, expanded perlite, polyurethane foam, aerogel and air. The material properties included in the research was measured in laboratory and standard boundary conditions were applied.

Kulcsszavak: épületenergetikai számítások, talajjal érintkező szerkezetek, dinamikus szimuláció, hőhidak

Bevezetés

Napjaink egyre inkább energiatudatos és komfortszemléletű építészete a hagyományos építőanyagok és építőelemek (termékek) fejlesztését is szükségessé teszi. A kerámia falazóblokkok mint építőelemek már évezredek óta velünk vannak, de a 19. században váltak az egyik legelterjedtebb megoldássá az építésben az iparosított gyártástechnológia és tömegtermelésük révén. A 20. században az új gyártástechnológiák lehetővé tették, hogy a téglák tömege csökkenhessen, manapság például faforgácsot adagolnak az agyaghoz, mely az égetés után pórusokat alkot a kerámiában, ezzel csökkentve a testsűrűséget, és javítva a hőtechnikai tulajdonságokat.

A kerámiák testsűrűségét azonban szilárdsági okokból nem lehet egy ponton túl tovább redukálni. A falazóblokkok tömegét ezért

üregekkel csökkentették tovább, mely miatt egy falazóblokkra kevesebb agyagszükséglet jutott, valamint a téglák hőszigetelő képessége is tovább javult. A falazóblokkok tömegcsökkenése miatt azok egyre nagyobb méretben lettek kezelhetőek a kőművesek számára. Az 1970-es évekbeli olajválság rávilágított az energiatudatos építési megoldások szükségességére is, amely további fejlesztéseket eredményezett a falazóblokkok esetén is. Elkezdődött az energiatudatos tervezés a „hő útjának” növelésével.

Ez a tervezési elv a mai napig megmaradt az iparban, és még a mai modern falazóblokkok fejlesztése esetén is általában a kézzel, geometriai alapon történő előtervezés a bevett gyakorlat. A falazóblokkok geometriája, valamint a kerámia hőtechnikai tulajdonságai viszont szintén korlátot jelentenek. A napjaink modern épületenergetikai követelményeinek való megfelelést egyre nehezebben lehet

megoldani pusztán falazóblokkok alkalmazásával, kvázi-homogén kialakítású falazatokkal. A hagyományosnak tekinthető vastagságú és üregkialakítású falazatokkal csupán a jelenlegi követelményértékeknek megfelelő hővezetési ellenállás egy része érhető el, kiegészítő hőszigetelés alkalmazására lenne szükség.

A gyártók megtalálták azonban a piaci rést: a hőszigetelést a falazóblokkokba integrálva képelték el. A hőszigetelő anyagokkal töltött üregek ugyanis lényegesen jobb hőtechnikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mintha az üregekben levegő lenne. Bár a mozdulatlan levegő hővezetési tényezője igen alacsony ($\lambda = 0,024 \text{ W/mK}$), azonban a téglák üregeiben a levegő áramlik ($\lambda_{\text{ekv}} = 0,045 - 0,278 \text{ W/mK}$), minél nagyobb az üreg hőárammal párhuzamos szélessége, annál kedvezőtlenebb ez a jelenség. A töltőanyagok hővezetési tényezője tehát belátható módon kedvezőbb alakul nagy üregek esetén. A kérdés viszont fennáll, hogy ha elmozdulunk a falazóblokkok egydimenziós megközelítésétől, valamint figyelembe vesszük, hogy az építőanyagok hőtechnikai tulajdonságait azok hőmérséklete, nedvességtartalma, valamint a bennük lejátszódó mikro-légmozgások is befolyásolják (főleg szálas anyagokra jellemző), hogyan teljesítenek valójában a hőszigeteléssel töltött falazóblokkok.

Kapcsolt hő-, levegő- és nedvességtranszport

A kapcsolt hő-, lég- és nedvességtranszport probléma numerikus megoldását a következő parciális differenciálegyenletekkel (PDE) írhatjuk fel [1, 2 alapján], melyek közül az (1)-es a hőtranszportot, a (2)-es levegőtranszportot, míg a (3)-as a nedvességtranszportot írja le:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = 0 \quad (1),$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (-K \nabla P) = 0; \mathbf{u} = K \nabla P \quad (2),$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla p_v) + \mathbf{u} \cdot \nabla p_v = 0 \quad (3),$$

ahol ρ a testsűrűség (kg/m^3), C_p a fajlagos hőkapacitás (J/kgK), λ a hővezetési tényező (W/mK), T a termodinamikai hőmérséklet (K), t pedig az idő (s). Továbbá P az atmoszférikus nyomás (Pa), K az áteresztőképesség, p_v a parciális párányomás (Pa), D a nedvességtranszport tényező (m^2/s) és u a sebességtér (m/s). A nedvességtranszport tényező [3, 4] alapján a következő:

$$D = \frac{p_{v,\text{sat}}(T) \cdot \delta_{\text{air}}}{\mu \cdot \xi} \quad (4),$$

ahol $p_{v,\text{sat}}$ a hőmérsékletfüggő telítési párányomás (Pa), δ_{air} a levegő páradiffúziós tényezője (kg/msPa), μ a páradiffúziós ellenállási szám (-), ξ pedig a differenciális nedvességkapacitás (kg/m^3), ami a szorpciós izoterma érintőjét jelenti pillanatnyi relatív nedvességtartalom esetén.

Az előbbieken bemutatott három PDE megoldásához háromféle peremfeltétel megadása is szükséges. A felületi hőáramokat a következő egyenlettel írhatjuk le a felületen:

$$\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = (h_c + h_r)(T_{\text{inf}} - T) \quad (4),$$

ahol h_c a konvektív, míg h_r a sugárzásos hőátadási tényező ($\text{W/m}^2\text{K}$) az MSZ EN ISO 6946:2008 szabvány alapján meghatározva. T_{inf} felület melletti léghőmérsékletet a belső oldalon $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, a külső oldalon $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ az MSZ 24140:2015 alapján. A vonatkozó szakirodalom [4, 5] alapján a páraáram peremfeltételét a következő képlettel írhatjuk le:

$$\mathbf{n} \cdot (D \nabla p_v) = \beta_p h_c (p_{v,\text{inf}} - p_v) \quad (5),$$

ahol β_p konstans ($7,7 \times 10^{-9} \text{ kgK/W sP}$) a konvektív hőátadási tényező és a páraátadási tényező közötti kapcsolatot írja le, $p_{v,\text{inf}}$ pedig a környezeti párányomás, belső oldalon $0,65 \times p_{v,\text{sat}}$, külső oldalon pedig $0,9 \times p_{v,\text{sat}}$ a hatályos MSZ 24140:2015 szabványból következően.

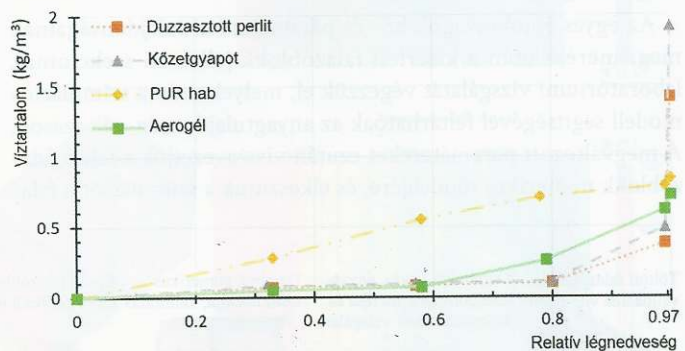
Az állandó differenciális légnyomáskülönbséget $2,5 \text{ Pa}$ -nak vettem fel [2, 4] alapján, mely -2 m/s -os külső szélesebség esetén áll fenn.

Laboratóriumi vizsgálatok

Jelenleg különböző gyártók eltérő hőszigetelő anyagokkal töltik ki a falazóblokkjaikat, előfordulnak expandált (grafitos) polisztirolhabbal ($\lambda = 0,03 - 0,4 \text{ W/mK}$), kőzetgyapattal ($\lambda = 0,031 - 0,038 \text{ W/mK}$) és duzzasztott perlitel ($\lambda = 0,05 - 0,06 \text{ W/mK}$) töltött téglák is. A cikkben bemutatott kutatásban a falazóblokkok üregeiben könnyen elhelyezhető kőzetgyapaton és duzzasztott perlitel túl poliuretánhab és aerogél töltőanyagok hatását is vizsgálom a falazóblokkok egyenértékű hővezetési tényezőjének, illetve a falazóblokkon belüli hőmérsékletek és relatív nedvességek szempontjából. A vizsgálatban alkalmazott anyagtulajdonságokat az 1. táblázat, valamint az 1. ábra tartalmazza, melyeket a vonatkozó szabványok alapján és a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Épületfizika laboratóriumában végzett mérések (lásd 2. ábra) alapján határoztam meg.

	Égetett agyag	Duzzasztott perlit	Kőzetgyapot	PUR hab	Aerogél
ρ (kg/m^3)	1500	90	75	35	120
λ (W/mK)	0.35	0.05	0.031	0.024	0.012
c_p (J/kgK)	800	900	1000	1400	1000
f_T ($1/\text{K}$)	0.0010	0.0035	0.0045	0.0055	0.0015
f_ψ (m^3/m^3)	10	3	4	6	3
μ (-)	15	2	1.3	60	4.5

1. táblázat: A kutatásnál alkalmazott anyagtulajdonságok



1. ábra: A hőszigetelőanyagok nedvességfelvétel képessége

Az 1. ábrán megfigyelhető, hogy a kutatásban alkalmazott aerogél 60%-os relatív légnedvesség-tartalom mellett még nem vesz fel számottevő nedvességet, a kőzetgyapot és duzzasztott perlit 80%-ig, azonban az általunk vizsgált PUR hab ezektől eltérően viselkedett,

és folyamatosan vett fel nedvességet. Ez a későbbiekben bemutatott vizsgálatok esetén a többi hőszigetelő anyaghoz képest eltérő páratechnikai viselkedést fog eredményezni a falazóblokkoknál.

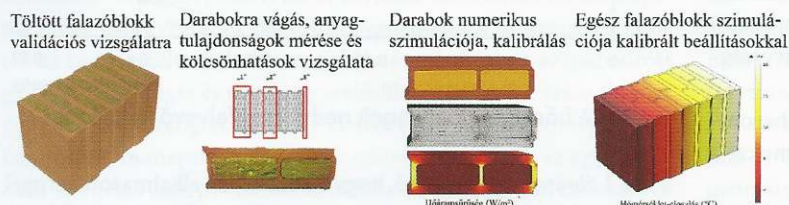


2. ábra: Laboratóriumi vizsgálatok a falazóblokkokat alkotó anyagok épületfizikai tulajdonságainak meghatározásához, hővezetési tényező, nedvességtároló képességek és paradiffúziós egyenértékű szám meghatározása

Kalibrált numerikus modellezés

A töltött falazóblokkok numerikus modellezése során fontos az egyes anyagok kölcsönhatásának vizsgálata és a megváltozott anyagtulajdonságok visszavezetése a numerikus modellbe, azaz a modell kalibrálása, melyhez a falazóblokkok egyes jellemző szekcióinak laboratóriumi vizsgálata szükséges. A laborvizsgálatokkal támogatott numerikus szimulációs modellezési eljárás [6] összefoglalása a 3. ábrán látható.

Az egyes építőanyagok hő- és páratechnikai tulajdonságainak megismerése után a kísérleti falazóblokk jellemző szekcióinak laboratóriumi vizsgálatát végezzük el, melyek után a szimulációs modell segítségével feltárhatóak az anyagtulajdonság-változások. A megváltozott paramétereket ezután visszavezetjük a teljes falazóblokk numerikus modelljére, és elkészítjük a szimulációt a fala-



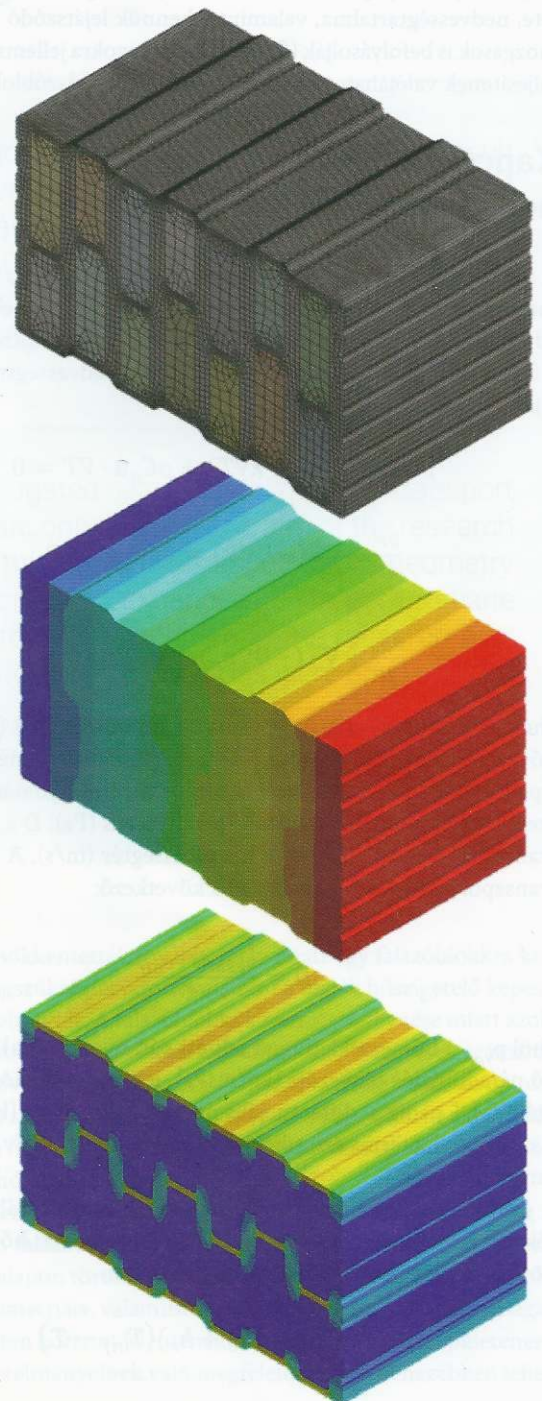
3. ábra: Falazóblokkok hőtechnikai tulajdonságának meghatározása kalibrált szimulációval

zóblokk egészére, kalibrált beállításokkal (4. ábra). Az ábrán megfigyelhetjük továbbá, hogy a kerámia belső vázon keresztül nagyobb hőáramsűrűségek alakulnak ki.

A szimulációk lefuttatása után vizsgálhatjuk a falazóblokkban kialakuló hőmérsékleteket, illetve hőáramsűrűségeket. A belső felületi hőáramsűrűségek lekérésével, valamint a falazóblokk hőárammal párhuzamos irányú vastagságának, a belső felületi méretének és a hőmérséklet-különbségnek az ismeretében kiszámítható a falazóblokkok egyenértékű hővezetési tényezője az alábbi egyszerű összefüggéssel:

$$\lambda_{ekv} = \frac{q \left[\frac{W}{m^2} \right] \cdot d [m]}{A [m^2] \cdot (T_2 - T_1) [K]} \quad (5)$$

4. ábra: Kőzetgyapattal töltött falazóblokk végeselemháló-, hőmérsékleteloszlás- és hőáramsűrűség-ábrája

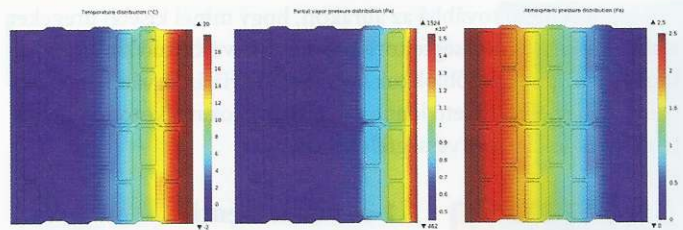


Kapcsolt hő-, levegő- és nedvességtranszport-szimuláció készítése esetén további információkat tudunk kapni a falazóblokkok épületfizikai viselkedéséről. Az 5. ábrán látható két, nüt-féderes kapcsolattal csatlakozó, kétoldali 1,5–1,5 cm vakolattal ellátott falazóblokk hőmérséklet-, parciális párányomás-, valamint atmoszférikus nyomáseloszlás-ábrája. A hagyományos egyszerűsített kézi számításokhoz képest numerikus szimulációkkal a falazat teljes keresztmetszetében, illetve minden pontjában meghatározhatjuk a párányomást, valamint figyelembe vehetjük a falazóelemek üregeit töltő hőszigetelőanyagokban a mikrolégmozgások hatásait is. Utóbbi figyelembevétele kis mértékben kihatással van a hőmérsékleteloszlásra, de jelentősebben képes befolyásolni a falazóblokkokon belüli nedvességvándorlást.

Eredmények

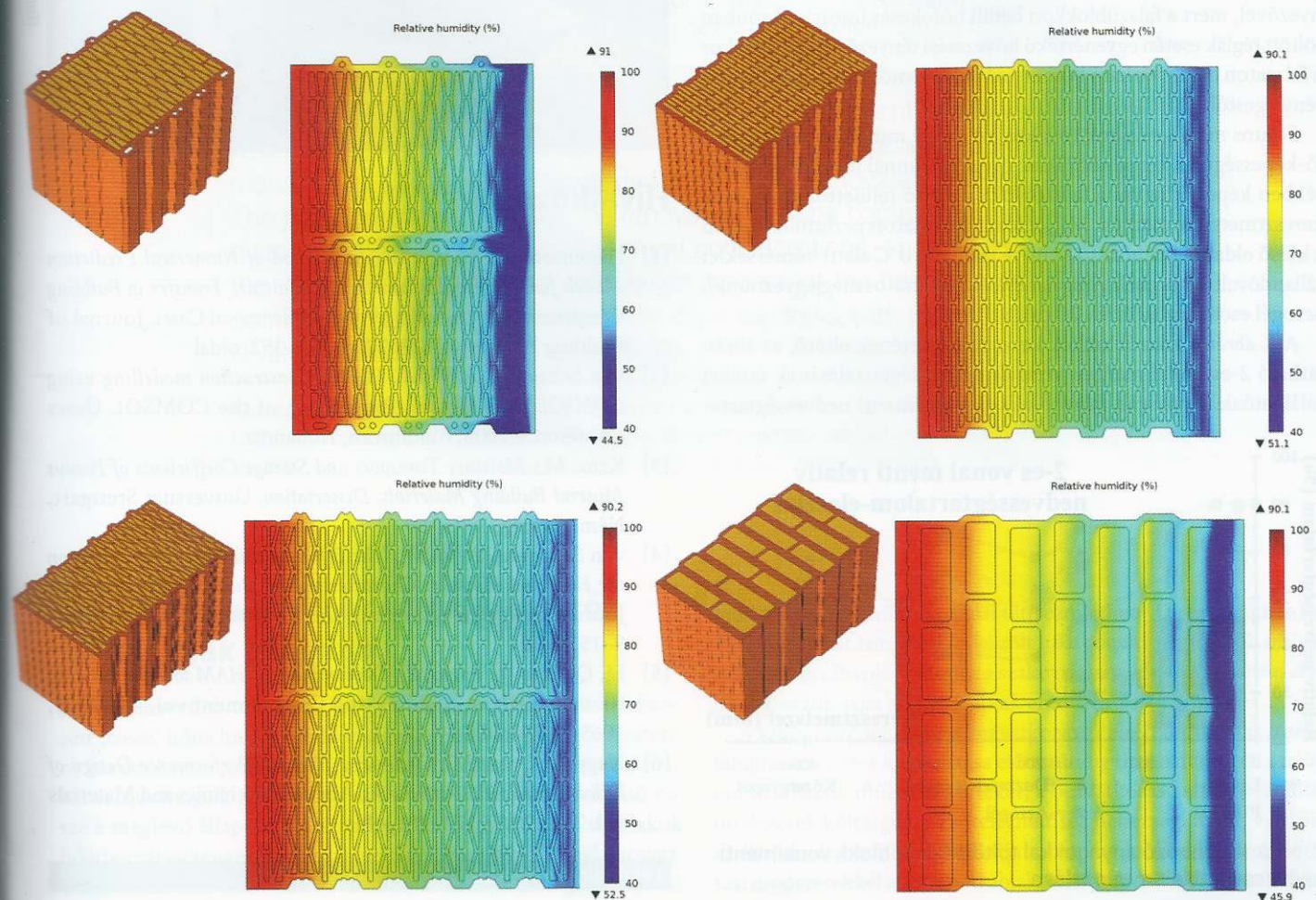
A szimulációk lefuttatása után a következő egyenértékű hővezetési tényezőket állapítottam meg a falazóblokkokra: A töltetlen $\lambda = 0,263$ W/mK, az expandált perlittel töltött $\lambda = 0,102$ W/mK, a kőzetgyapottal töltött $\lambda = 0,082$ W/mK, a PUR habbal töltött $\lambda = 0,070$ W/mK, az aerogéllal töltött pedig $\lambda = 0,054$ W/mK egyenértékű hővezetési tényezővel rendelkezik. Látható, hogy a falazóblokkok hővezetési tényezője a töltőanyagok hővezetési tényezőjének függvényében változik, azonban a csökkenés nem egyenesen arányos.

6. ábra: Falazóblokkok hőtechnikai tulajdonságának meghatározása kalibrált szimulációval

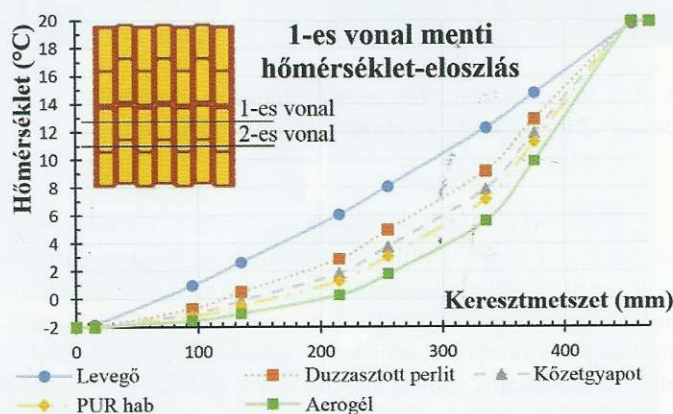


5. ábra: Kőzetgyapottal töltött falazóblokkok hőmérséklet-, parciális párányomás- és atmoszférikusnyomás-ábrái

A 6. ábrán különböző geometriai kialakítású falazóblokkok relatív nedvességtartalmi ábrái láthatóak az üregben történő kőzetgyapottal töltet elhelyezése esetén. Látható, hogy a relatív nedvességtartalom megnövekszik az üregekben lévő hőszigetelő anyagokban a külső oldali kerámiaborda mentén, míg a belső oldali kerámiaborda felülete mentén kisebb nedvességtartalmakat találunk. A külső tér irányába tartó nedvességáram a kőzetgyapoton könnyebben átjut, viszont az anyaghatárokon egy nagyságrenddel nagyobb ellenállásba ütközik, ami a nedvesség feldúsulását eredményezheti a kerámiabordák környezetében. Mivel a növekvő nedvességtartalom a hővezetési tényező csökkenését is okozza, ezért fontos, hogy olyan anyagokkal töltsük a falazóblokkokat, amelyek az adott beépített állapotbeli környezet, valamint a rá ható változó peremfeltételek miatti hőmérséklet- és nedvesség- állapotváltozások miatt nem szenvednek jelentős hőtechnikai teljesítőképesség-csökkenést.



Megfigyelhető továbbá az ábrákon, hogy minél kisebb üregeket alakítunk ki, a nedvességfeltorlódás annál kevésbé tud kialakulni az üregekben, így a falazóblokkok belső geometriájának változtatásával valószínűleg elkerülhető lenne a falazóblokkokat alkotó hőszigetelésekben a lokális nedvességfeldúsulás.

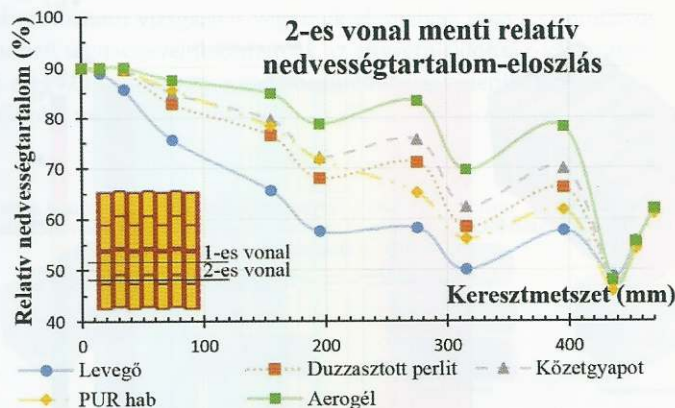


7. ábra: Különböző anyagokkal töltött falazóblokk vonalmenti hőmérséklet-eloszlása

A 7. ábrán azonos geometria mellett, de eltérő hőszigetelés töltettel készült numerikus szimulációkból lekért pontbeli hőmérsékleteket ábrázoltam. Megfigyelhető, hogy a hőszigeteléssel töltött üregekkel rendelkező falazóblokkok hőmérsékletese a levegővel „töltött” téglához képest nem-lineáris, és minél alacsonyabb hővezetési tényezővel rendelkezik a töltet, annál inkább exponenciális alakot ölt. Ez azt jelenti, hogy levegővel töltött üregek esetén valóban közelíthetjük a falazóblokkokat egyenértékű hővezetési tényezővel, mert a falazóblokkon belüli hőfokelés lineáris. Azonban töltött téglák esetén egyenértékű hővezetési tényező alkalmazásakor a falazaton belüli várható hőmérsékletek jelentősen eltérnek majd a ténylegestől.

Fontos megfigyelnünk továbbá azt, hogy minél jobb hőszigetelő-képességű anyaggal töltjük az üregeket, annál jelentősebb mértékben képes átfagyni a falazóblokk a külső felülettől számítva a keresztmetszete mentén. Míg például duzzasztott perlittöltet esetén a külső oldaltól számított 12 cm-re található 0 °C alatti hőmérséklet (állandósult állapotbeli vizsgálat esetén, ezt fontos megjegyeznünk), aerogél esetén ez az érték 20 cm.

A 8. ábrán a falazóblokkok keresztmetszetének eltérő, az ábrán látható 2-es vonal mentén vizsgált nedvességtartalmának értékei találhatóak. A vizsgált falazóblokkok vonalmenti nedvességtarta-



8. ábra: Különböző anyagokkal töltött falazóblokk vonalmenti nedvességtartalom-eloszlása

lom-értékei a 6-os ábránál már megfigyelt jelenséget mutatják, a töltött üregekben a külső oldal felől a kerámia mellett feldúsul a nedvességtartalom.

Megállapítások

Az előbbieken bemutatott eredmények figyelembevételével a következő megállapításokat tehetjük.

Hőszigetelő anyaggal töltött üregek esetén a falazóblokkon belüli hőfokelés jelentősen eltér a lineáristól.

Jobb hőszigetelő-képességű töltet alkalmazásával a fagyveszélyes zóna növekedése figyelhető meg.

A belső kerámiabordák mellett a hőszigetelő anyagokban emelkedik a relatív nedvességtartalom, emiatt lokálisan csökkenhet a hőszigetelő képesség!

A töltetek alkalmazásának helyes megválasztása, illetve a falazóblokkok geometriájának optimalizálása tehát állagvédelmi okokból is indokolt lehet, a külső szélső 1-2 hőszigetelő sáv átfagyása a téli hónapokban szinte garantálható, így a fagyást-olvadást jól tűrő hidrofobizált (víztaszító) hőszigetelő anyag alkalmazása javasolt, legalább ezeken a területeken.



(forrás: clay-wienerberger.com)

Hivatkozások

- [1] Hagentoft, C.-E.: *Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases*, Journal of Building Physics vol. 27, 2004, 327–352. oldal
- [2] van Schijndel, A.W.M., HAM: *Construction modelling using COMSOL with MatLab*, Proceeding of the COMSOL Users Conference 2006, Eindhoven, Hollandia
- [3] Krus, M.: *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials*, Dissertation, Universität Stuttgart, Németország, 1995.
- [4] van Schijndel, A.W.M., *The Effect of Micro Air Movement on the Heat and Moisture Characteristics of Building Constructions*, Journal of Civil Engineering and Architecture vol. 4., 2010, 9–15. oldal
- [5] Li, Q., Rao, J., Fazio, P., *Development of HAM tool for building envelope analysis*, Building and Environment vol. 44., 2009, 1065–1073. oldal
- [6] Nagy B., Orosz M., *Optimized Thermal Performance Design of Filled Ceramic Masonry Blocks*, Applied Mechanics and Materials vol. 797., 2015, 174–181. oldal

Lektorált szakmai cikk.