

Családi ház ásványgyapot hőszigetelésű homlokzati falszerkezetének helyszíni monitoringon alapuló hő- és nedvességtechnikai elemzése



2013-ban a Knauf Insulation magyarországi képviselte – amely hőszigetelések gyártásával és értékesítésével foglalkozik – új kampányt hirdetett „Nálam szigetelnek” néven [1]. A kampány célja a magántulajdonban lévő lakóépületek utólagos hőszigetelésének népszerűsítése volt, mellyel jelentős energiamegtakarítás érhető el.

PROJEKT KERETÉBEN kapcsolatba léptek a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Épületszerkezet-tani Tanszékével, továbbá az iparág számos résztvevőjével, hogy megfelelő tudományos és műszaki támogatást biztosítsanak a kampány keretében elvégzett vizsgálatokhoz. A kutatás elsődleges célja azt volt, hogy világos és könnyen érthető módon mutassuk be az intenzív hőszigetelés által elérhető energiafogyasztás csökkentését. Ezért két családot, két különálló, az 1980-as évek elején épült 110 négyzetméteres családi házat választottunk ki egy nyílt verseny során (lásd: **1. ábra**). A két épület közel azonos kialakítású, elrendezésű, méretű és szerkezetű, valamint mindössze néhány kilométerre helyezkedik el egymástól az észak-alföldi régióban. Az első, „A” épület Hajdúnánáson épült, ezt a cég költségén hőszigetelték,

míg a másik, „B” épületet a szomszédos Hajdúdorogon eredeti állapotában, hőszigetelés nélkül hagytuk kontrollépületként. A kutatás részeként monitoring rendszert terveztünk és telepítettünk az épületekbe és annak egyes épületszerkezeteibe, amelyekkel a legfontosabb mennyiségek (pl. hőmérsékletek, relatív nedvességtartalmak, felhasznált fűtési hőmennyiségek, hőátbocsátási tényezők) mérhetőek voltak.

A projekt és kutatásunk további célja a szakszerű tervezés és kivitelezés fontosságának bemutatása volt, mellyel jelen cikkünk is részletesen foglalkozik. Ezért további kutatási tervként összehasonlítottuk az „A” épület közetgyapot alapú utólagos homlokzati hőszigetelő rendszerének és üveggypot alapú födémhőszigetelésének két-két változatát is. A fal esetében célunk volt, hogy bemutassuk a fal és a hőszigetelés közötti meg-

felelő tapadó habarcsréteg hiányának kedvezőtlen épületfizikai, és a szakszerűtlen kivitelezés higrotermikus (kapcsolt hő- és nedvességtechnikai) hatását a hőszigetelt falszerkezetre, kiemelten az utólagos hőszigetelésre nézve. Ezért a hőszigetelt épület nagy részén az ásványgyapot szigetelést a megfelelő és ajánlott építéstechnológiát követve – pontperem módszer alkalmazásával –, a hőszigetelő táblák széleinél folyamatos habarcsággal rögzítették [2], ezáltal megakadályozva a hőszigetelőtáblák mögötti ragasztóhabarcs rétegben az egybefüggő légréteg, valamint az abban előfordulható légáramlás kialakulását. Viszont az épület dél-keleti homlokzatának egy kb. 10 m²-es kis részén csak pontonkénti ragasztást, azaz „ragasztópogácsákat” alkalmaztak (lásd: **2. ábra**). Jelen cikkünk ezzel a kutatással foglalkozik részletesen.

A padlásfödém hőszigetelése esetében pedig azt szerettük volna megvizsgálni, hogy az ajánlott, hőszigetelésre helyezett páraáteresztő fólia alkalmazása milyen védelmet jelent a hőszigetelés számára és hogyan befolyásolja annak hő- és nedvességtechnikai viselkedését, épületfizikai teljesítményét. Mint sok más családi ház esetében, a padlástér és lakótér közötti födém hőszigetelése a tetőszerkezet felújítása nélkül történt, azaz a cserepek alá nem került tetőfólia, így a nedvesség és a szél is be tudott jutni a padlástérbe. (Ezen kutatás eredményeit a következő lapszámunkban közöljük részletebben.)

A kutatás során alkalmazott mérési és adatfeldolgozási módszerek

1. Peremfeltételek mérése

A homlokzati falszerkezetei kialakítások pillanatnyi hőátbocsátási tényezőinek meghatározásához a csatlakozó helyiségben mért hőmérsékletek ismeretén túl a külső oldali hőmérsékleti, és egyéb meteorológiai adatok mérésére is szükség van. Az **1. ábrán** látható, a hajdúnánási épület nem használt kéményére felszerelt időjárás-állomás minden 15 percben rögzítette a külső peremfeltételeket: a hőmérsékletet, a relatív páratartalmat, a légnyomást, a szélesebséget és a szélirányt, valamint a csapadékot. Mindkét épület esetén a belső peremfeltételeket (hőmérséklet, relatív páratartalom) szintén 15 perces intervallumban mértük minden szobában, illetve megkértük a családokat, hogy azonos fűtési és szellőztetési rutint kövessenek a projekt időtartama alatt. A helyszínen mért értékek segítségével – az adatok ellenőrzését és tisztítását követően – óránkénti adatokból álló időjárásfájlt készítettünk a további számításokhoz és kutatáshoz.

2. Monitoring mérések a homlokzati falszerkezetben

A **3. ábrán** látható a dél-keleti homlokzati falon lévő monitoring rendszer elhelyezésének terve, a **4. ábrán** pedig a kétféle homlokzati fal szerkezeti rétegrendjei, a kétféle homlokzati hőszigetelési kialakítás, továbbá a szenzorok telepítésének sematikus bemutatása. A homlokzati fal belső felületére a hőátbocsátási tényező meghatározásához egy Omega HFS-3 típusú hőáram-sűrűség-mérőt és a felületi hőmérsékletek méréséhez egy-

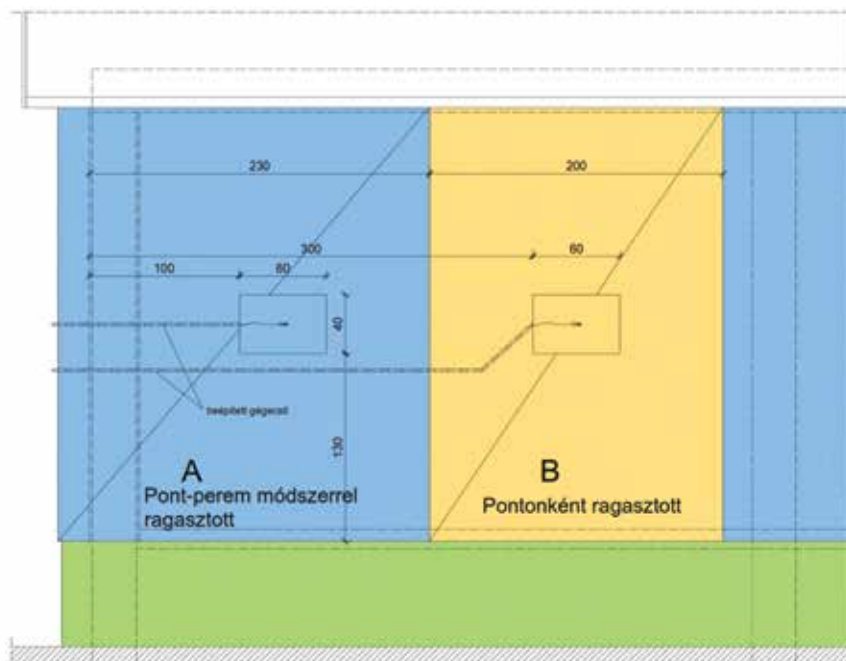


1. ábra: bal felül: Hőszigetetlen hajdúdorogi kontrollépület, bal alul: Hőszigetelt hajdúnánási vizsgált épület, jobb oldal: Használaton kívüli kéményen elhelyezett időjárásállomás

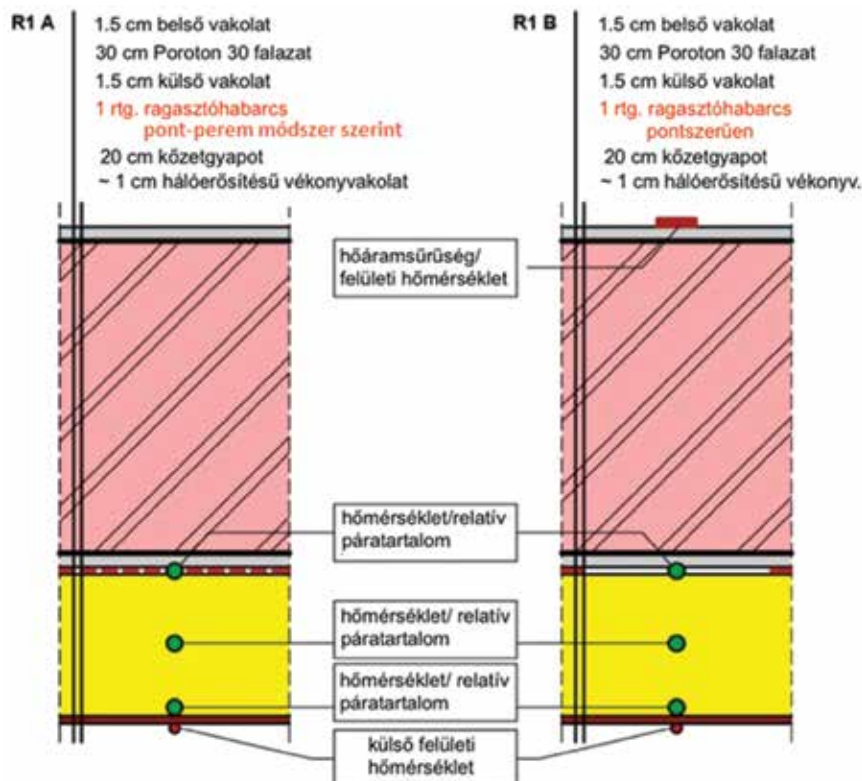


2. ábra: Higrotermikus monitoring rendszer kialakítása a hajdúnánási hőszigetelt családi ház dél-keleti homlokzati hőszigetelésében

Mindkét vizsgált felület ugyanolyan tájolású volt, továbbá a mért keresztmetszetek is ugyanazon a falon (azonos szobához tartozva) helyezkedtek el.



3. ábra: Mérési pontok elhelyezkedése a dél-keleti homlokzati falon



4. ábra: A vizsgált rétegrendi kialakítás és a szenzorok elhelyezkedése

egy K típusú termoelement rögzítettünk, 16-bites analóg–digitális átalakító alkalmazásával. A rétegrenden belüli hőmérsékleteket és relatív nedvességtartalmakat Sensirion SHT 75 típusú szenzorokkal mértük. A külső felületi hőmérsékletet szintén hasonló pontosságú digitális hőmérsékletmérő szenzorokkal vizsgáltuk. Mindkét vizsgált felület ugyanolyan tájolású volt, továbbá a mért keresztmetszetek is ugyanazon a falon (azonos szobához tartozva) helyezkedtek el.

3. A hőmérséklet és a relatív nedvességtartalom adatainak kiértékelése

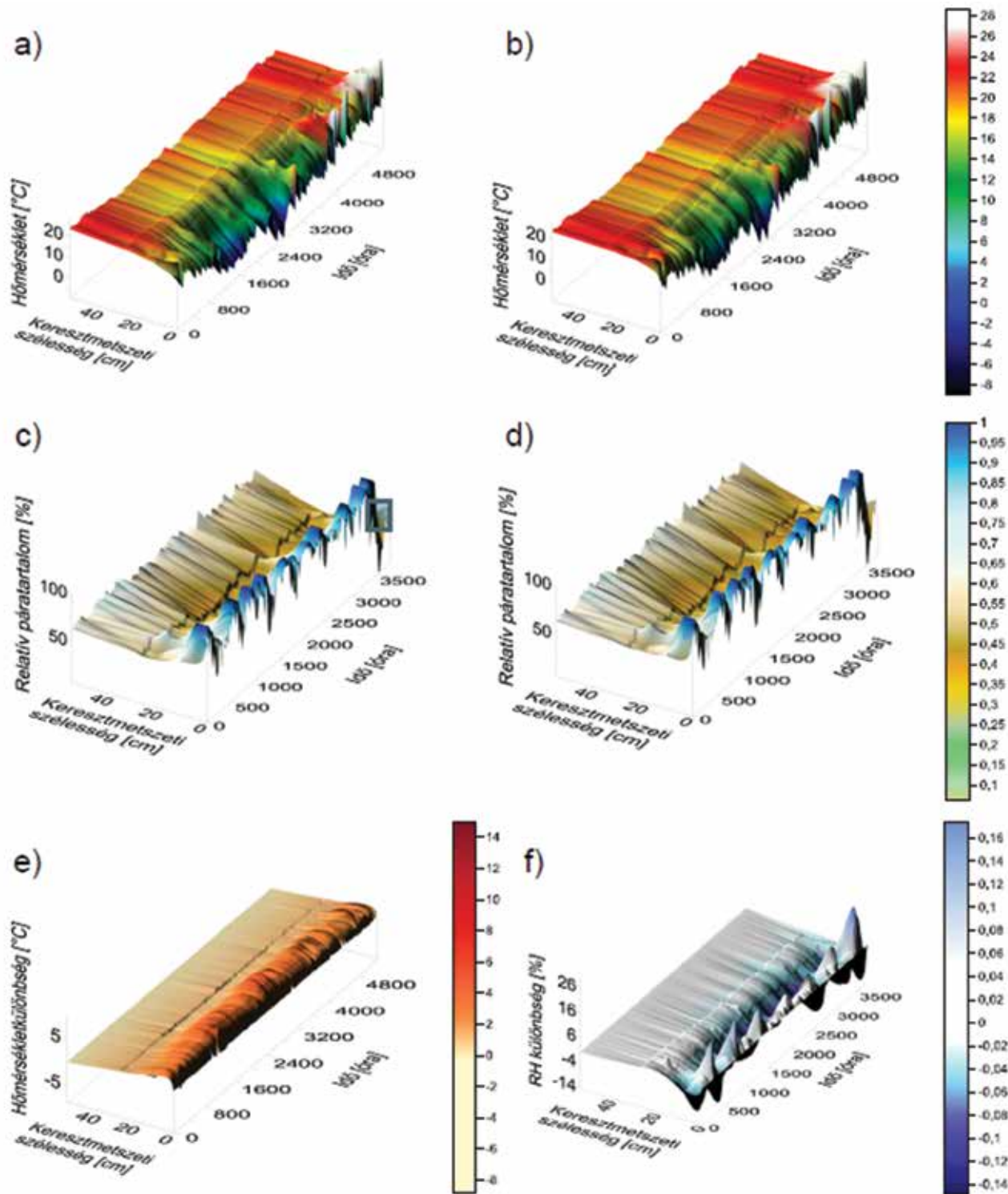
A falszerkezet rétegrendjében mért hőmérséklet és relatív nedvességtartalom értékek eloszlását, illetve a szerkezetek közötti különbségek alakulását háromdimenziós felületi térkép létrehozásával ábrázoltuk, a szerkezeti vastagság (0 pont a szerkezet külső oldala, illetve a földem padlástér felőli része), valamint az idő függvényében. A mért pontok közti értékeket Kriging interpoláció segítségével határoztuk meg, amely egy olyan geostatistikai módszer, ami azt feltételezi, hogy a mintavételi pontok közötti távolság és irány térbeli korrelációt tükröz, mely a hőmérsékletesés és nedvességtartalom-változás esetén az vizsgált időtartamban fennállt a monitorozott épületszerkezetek esetén.

4. A pillanatnyi hővezetési tényezők meghatározása

Az egyes rétegrendekben szereplő anyagok hővezetési tényezőinek folyamatosan változó értékei meghatározhatóak voltak a kísérlet során állandóan mért hőmérséklet- és relatív nedvességtartalom értékek alapján. Az egyes rétegek átlagos hőmérsékletét és nedvességtartalmát a réteghatárokon elhelyezett szenzorok által mért adatok átlagaként vettük figyelembe, míg a hőszigetelőrétegek esetén felhasználtuk a szigetelésben elhelyezett szenzorok adatait is. Minden réteg hővezetési tényezőjét az MSZ EN ISO 10456:2008 szabvány [3] alapján határoztuk meg a mérési értékek alapján, a következő összefüggés segítségével:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot F_T \cdot F_m \cdot F_a = \lambda_1 \cdot e^{f_T(T_2-T_1)} \cdot e^{f_m(U_2-U_1)} \cdot 1 \quad (1),$$

ahol λ_2 tervezett környezeti feltételek mellett figyelembe vehető hővezetési tényező, λ_1 hővezetési tényező deklarált értéke, F_T , F_m és F_a a hőmérséklet, nedvességtartalom és öregedés hatását leíró szorzótényező – az utóbbi esetben



5. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a szerkezetben a) teljes felületen ragasztott hőszigetelés, b) pontonként ragasztott; RH-eloszlás, c) teljes felületen ragasztott, d) pontonként ragasztott, e) hőmérséklet és f) RH különbség a szerkezetek között

1-et vettünk figyelembe. f_T hőmérséklet konverziós tényező, T_2 és T_1 tényleges és deklarált hőmérséklet, f_u páratartalom konverziós tényező, U_2 és U_1 tényleges és deklarált nedvességtartalom. A páratartalom konverziós tényező esetében a relatív légnedvességtartalom és az anyag nedvességtartalma közötti kapcsolatot az

adott anyagra vonatkozó szorpciós izotermák segítségével lehet meghatározni, melyek megmutatják, hogy adott relatív légnedvesség-tartalom esetén mennyi nedvességet képes felvenni a vizsgált anyag. Ezeket a kiegészítő anyagtulajdonságokat a hatályos MSZ 24140:2015 szabvány [4] alapján vettük fel.

5. A hőátbocsátási tényező számítása

Állandósult körülmények között az U-értéket úgy határozhatjuk meg, hogy mérjük a szerkezeten átmenő hőáramot annak belső felületén, miközben párhuzamosan mérjük a szerkezet mindkét oldalán a léghőmérsékletet. Mivel állandósult állapot a gyakorlatban soha nem

forduló hosszabb ideig, ezért többféle módszer áll rendelkezésünkre, hogy ezt a nehézséget kiküszöböljük. Ebben az esetben azt feltételeztük, hogy a hőáram illetve a hőmérsékletek hosszabb távú időintervallumban mért átlaga ad egy becslést az állandósult állapotra, azaz a mért hőátbocsátási tényezők meghatározott feltételeket teljesítő értékeit átlagoltuk az ISO 9869-1:2014 nemzetközi szabvány szerint [5]. A szabvány három feltételt támaszt, melyek együttes teljesülése esetén alkalmazható az említett módszer [6]:

1. a mérés időtartama legalább 72 óra (3 nap), ha a hőárammérő szenzor környékén egyenletes a hőmérséklet;
2. a hőátbocsátási ellenállás a mérés végén nem térhet el $\pm 5\%$ -nál nagyobb mértékben a mérés vége előtt 24 órával számított átlagértéktől;
3. a hőátbocsátási ellenállás a mérés első felében nem térhet el több mint $\pm 5\%$ -kal a mérés második felében számított értéktől.

A módszer feltételezi, hogy az U -érték meghatározható a hőáramsűrűség és a hőmérsékletkülönbség hányadosaként:

$$U = \frac{\Sigma q}{\Sigma (T_i - T_e)} \quad (2),$$

ahol q a hőáramsűrűség, T_i belső léghőmérséklete, és T_e a külső léghőmérséklete. A módszer előnye, hogy a közvetlen hőárammérés végett nem kell megbecsülnünk a belső oldali hőátadási tényezőt, mivel a hőáramsűrűség szenzor közvetlenül W/m^2 -ben ad eredményt számunkra, a mért érték tartalmazza a vizsgált felületen jelentkező felületi ellenállás (mind a hőátadást, mind pedig a hőszugárzást) hatását. A felületi hőáramok ismeretében tehát meghatározhatóak a hőátadási tényezők is, amennyiben a felület hőmérséklete ismert. Az U -érték a következő képletek segítségével számíttással is meghatározható:

$$U = \frac{q}{T_i - T_e} = h_{si} \cdot \frac{T_i - T_s}{T_i - T_e} = (h_{ci} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_i^4 - T_s^4}{T_i - T_s}) \cdot \frac{T_i - T_s}{T_i - T_e} = \frac{1}{\frac{1}{h_{ci} + h_{r1}} + \sum_{j=2,n} \frac{d_j}{\lambda_{j2,j}} + \frac{1}{h_{ce} + h_{r2}}} \quad (3),$$

ahol h_{ci} konvektív, h_{r1} sugárzó része a h_{si} belső felületi hőátadási tényezőnek, ε az emissziós tényező (0.9), σ a Stefan-Boltzmann állandó, T_i és T_e a belső és külső levegő hőmérséklete, T_s a belső felület hőmérséklete, λ_2 korrigált hővezetési tényezője a d_j vastagságú anyagnak, h_{ce} pedig a külső konvektív része, h_{r2} sugárzó része a külső hőátadási tényezőnek az MSZ EN ISO 6946:2008 szabványnak meg-

felelően. Azaz a hőárammérési módszerrel megegyező eredményre juthatunk belső felületi hőmérséklet-mérési módszer alkalmazásával is abban az esetben, ha ismerjük a belső felületen jelentkező konvektív hőátadási tényezőt. Azaz, miután meghatároztuk az ragasztópogácsákkal rögzített falszerkezet hőátbocsátási tényezőjét hőárammérési módszertan alapján, az eredményeinket ellenőriztük és összehasonlítottuk az egyes rétegek (anyagok) pillanatnyi hővezetési tényezőjével, valamint a belső felületi hőmérsékletek alapján meghatározott hőátadási tényezők felhasználásával számított hőátbocsátási tényezőkkel is. Mivel költségvetési okokból a csak a ragasztópogácsákkal rögzített hőszigetelést tudtuk közvetlenül hőárammérővel vizsgálni, viszont mindkét kialakítást vizsgálhattuk a felületi hőmérsékletméréssel is, ezért a hőáramméréssel meghatározott hőátadási tényező konvektív tagját alkalmazva (mely – mivel azonos helyiségben mértünk és a két mérési pont is közel helyezkedett el egymáshoz – megengedhető), meg tudtuk határozni a pont-perem módszerrel ragasztott hőszigeteléssel ellátott rétegrend hőátbocsátási tényezőjét is.

A homlokzati falszerkezet mérési eredményeinek értékelése

1. Hőmérséklet és nedvességtartalom a rétegrendben

Az **5. ábra** a)-d)-ig mutatja a mért adatok alapján a Krigelés segítségével létrehozott háromdimenziós ábrákat, a hőmérséklet és relatív nedvességtartalom (relatív páratartalom) eloszlását az fal keresztmetszetében. A hőszigetelő rendszerben mért átlagos hőmérséklet $12,5^\circ\text{C}$ folyamatos habarcsréteg esetén, míg $14,6^\circ\text{C}$ a csak pogácsákkal ragasztott esetben, a relatív nedvességtartalom pedig 77% és 83%. Az **e)** és **f)** ábrán látható a hőmérséklet és relatív nedvességtartalom különbsége a szerkezetek között, megfigyelhető ezeknek az értékeknek a különbsége a hőszigetelő rétegben. A minimum hőmérséklet az ásványgyapotos hőszigetelő rendszerben $2,51^\circ\text{C}$ és $5,48^\circ\text{C}$, a maximális pedig $12,51^\circ\text{C}$ és $14,6^\circ\text{C}$ volt, míg az relatív nedvességtartalom minimumok 32% és 30%, illetve maximumok 77% és 83% körül alakultak.

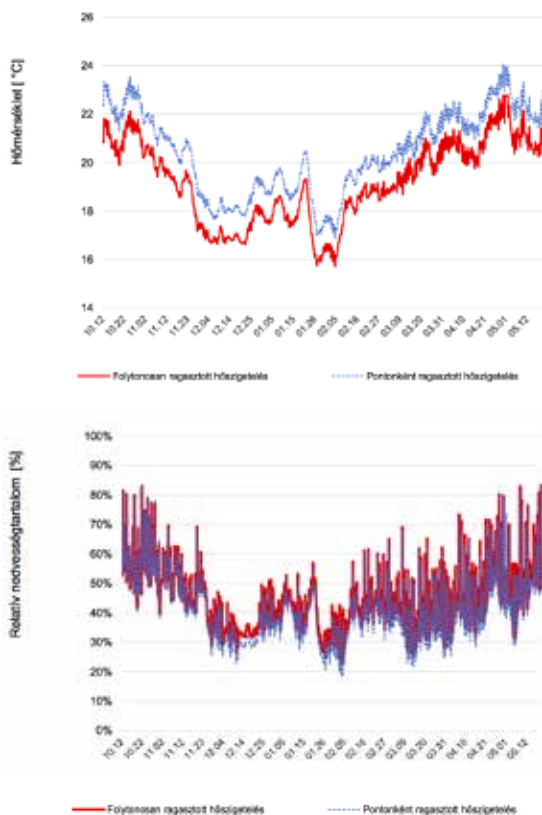
A **6. ábra** alapján a hőmérséklet a ragasztóhabarcs rétegben átlago-

san 1°C -kal volt magasabb (tehát a falon keresztül több hőenergia tudott távozni az épületből ez esetben), amikor a hőszigetelést pontonként, ragasztóhabarcs pogácsákkal ragasztottuk a falszerkezethez, ami azt igazolja, hogy a hőszigetelőtáblák szélein folytonosan ragasztott megoldás, azaz a pont-perem módszer épületfizikai szempontból előnyösebb. A relatív nedvességtartalom 43%-volt a pont-perem módszerrel ragasztott, és 40,47% a pogácsákkal rögzített hőszigetelés esetén, ami azt bizonyíthatja, hogy a pogácsákkal történő rögzítéskor a hőszigetelés és a fal közötti levegőhézag gyenge mértékben, de szellőzhetett és száradt, ezáltal alacsonyabb relatív nedvesség alakulhatott ki.

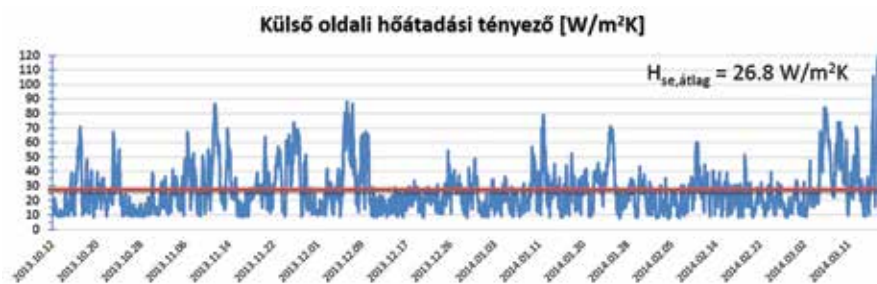
2. A hőszigetelő rendszer hővezetési tényezője

Az átlagos hőmérséklet konverziós tényezők az előbbieken megismert hőmérsékleti és nedvességtartalom adatok alapján az (1) egyenlet szerint számítva pont-perem módszer esetében 1,009, míg a pontonként ragasztott esetben 1,016, továbbá az átlagos páratartalom konverziós tényező 1,012 és 1,011 volt. Látható, hogy míg a hőmérséklet konverziós tényező értéke szignifikánsan nagyobb, úgy a páratartalom konverziós tényező minimálisan kisebb értékű, avagy a hőszigetelő rendszer pont-perem módszer esetén mintegy 2%-kal, míg a pogácsákkal való rögzítés esetén közel 3%-kal volt rosszabb a tervezőasztalon kitalált értékeknél.

A gyakorlatban tehát a bevonatréteggel ellátott, többrétegű, ragasztott táblás homlokzati hőszigetelő rendszerek (melyek tehát a külső ragasztórétegen túl a hőszigetelés külső oldalán található vékonyvakolat hatását is tartalmazták) átlagos hővezetési tényezőjét a folytonosan ragasztott ásványgyapotos hőszigetelő rendszer esetén $0,040\text{ W/mK}$ -ra, míg a pogácsákkal ragasztott rendszerét $0,041\text{ W/mK}$ -ra kellett korrigálni a tervezési $0,039\text{ W/mK}$ értékről. A látszólag elenyészően kis különbség a hőszigetelés hővezetési ellenállásában jobban meglátszik, míg a tervezőasztalon 20 cm hőszigetelés $5,13\text{ m}^2\text{K/W}$ ellenállással bír, addig az ajánlott építéstechnológiát alkalmazva ez $5,0\text{ m}^2\text{K/W}$ -ra adódott a beépített és monitorozott hőszigetelés esetén, valamint $4,88\text{ m}^2\text{K/W}$ -ra romlott pogácsás ragasztást alkalmazva.



6. ábra: Hőmérséklet- (balra) és RH eloszlás (jobbra) a ragasztó rétegben



7. ábra: Külső oldali hőátadási tényező időbeli alakulása

3. A rétegrendek hőátbocsátási tényezője

A (2) és (3) egyenlet segítségével a fal- és fűdém szerkezet hőátbocsátási tényezője kiszámítható, ezek az értékek figyelembe veszik a változó peremfeltételeket, a rétegek hőmérsékletét, relatív nedvességtartalmának változását. Az átlagos U -érték a pont-perem módszerrel ragasztott szigetelés esetében $0,158 \text{ W/m}^2\text{K}$, a másik szerkezet esetében $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$, míg az állandósult állapotra számított tervezett érték $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ volt.

A mérési adatokat felhasználva, h_s – felületi hőátadási tényező és R_s – hőátadási ellenállások is meghatározhatóak voltak. A homlokzati fal belső felületén vízszintes irányú hőáram esetén az átlagos belső felületi hőátadási tényező átlagos értéke $h_{si} = 8,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($R_{si} =$

$0,12 \text{ m}^2\text{K/W}$)-ra adódott a mérés időtartama során. A külső oldali hőátadási tényező a felületi hőmérséklet mellett jelentősen függ a felületet érő szél sebességétől. A mérés során az átlagos szélesség $4,6 \text{ m/s}$, míg a maximális érték $27,6 \text{ m/s}$ volt, mely megjelenik a külső oldali hőátadási tényező értékeiben, amit a 7. ábrán mutatunk be. A külső oldali hőátadási tényező pedig átlagosan $h_{se} = 26,82 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($R_{se} = 0,037 \text{ m}^2\text{K/W}$) volt, mely érték közel esik a szabványos $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékhez [7].

Összegzés

A cikkben egy ásványgyapattal hőszigetelt családi ház homlokzati falszerkezeiteinek fűtési időnyben mért mérési adatait elemeztük. Bemutattuk a rétegrendekben kialakuló hőmérséklet és relatív nedvességtarta-

lom időbeli eloszlását, illetve a hővezetési és hőátbocsátási tényezőket két különböző szerkezeti kialakítás esetében. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a különböző építési technológiák más-más hőmérsékleti és relatív nedvességtartalom értékeket eredményeztek a hőszigetelő rendszer rétegeiben. Épületenergetikai szempontból a két rétegrendi kialakítás között jelentős eltérés nem adódott, azonban épületfizikai, higrotermikus szempontból a különbség kézzel fogható, a kutatás alapján megállapítható, hogy a pont-perem módszerrel ragasztott ásványgyapotos hőszigetelés épületfizikai teljesítménye jobb, mint a csupán pontszerűen, ragasztópogácsákkal ragasztott megoldásé.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a Knauf Insulation Kft.-nek, hogy támogatta a kutatást, továbbá biztosította a kivitelezéshez szükséges anyagokat. A cikk elkészültében Nagy Balázst az Új Nemzeti Kiválóság Program Doktorjelölti Kutatói Ösztöndíja (ÚNKP-17-3-III-BME-198) is támogatta. ■

Irodalomjegyzék

- [1] <http://www.nalamszigetelnek.hu>
- [2] *Bevonatréteggel ellátott, többrétegű, ragasztott táblás homlokzati hőszigetelő rendszerek (ETICS-THR) kivitelezése*, MÉS Magyar Építőkémi és Vakolat Szövetség kivitelezési irányelve
- [3] ISO 10456:2007 *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*
- [4] MSZ 24140:2015 *Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai*
- [5] ISO 9869-1:2014 *Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1: Heat flow meter method*
- [6] Kosmina L, *In-situ measurement of U-value*, BRE September 2016
- [7] ISO 6946:2007 *Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method*

A cikk folytatását következő lapszámunkban olvashatják.



Nagy Balázs

szerkezet-építőmérnök MSc,
épületenergetikai
szakmérnök,
BME Építőanyagok és
Magasépítés Tanszék



Szagri Dóra

építőmérnök BSc,
BME Építőanyagok és
Magasépítés Tanszék



Dr. Bakonyi Dániel

építészmérnök PhD,
BME Épület szerkezet-tani
Tanszék