



HI-SMART: HIGHER EDUCATION PACKAGE FOR NEARLY ZERO ENERGY AND SMART BUILDING DESIGN

2. MODUL

6. FEJEZET: DINAMIKUS HŐSZIGETELŐ RENDSZEREK

Az Európai Unió
Erasmus+ programjának
társfinanszírozásával



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA



2.6.1 DINAMIKUS SZIGETELÉS, MINT AZ NZEB MEGKÖZELÍTÉSE

Az energiahatékony építőipar két kritikus tényezője a fenntartható forrásokból származó, egész évben rendelkezésre álló energiaellátás és a termelt energia hatékony, minimális veszteségekkel járó felhasználása. Az építőipar az energiafogyasztás mintegy 40%-át teszi ki világszerte. Az épületszigetelési rendszerek két kategóriába sorolhatók: hagyományos és dinamikus szigetelés. Mindkettő célja az épületburkolat hőveszteségének csökkentése az épületszerkezet (tető és homlokzat) hőellenállásának növelésével. Európában az energiafogyasztás a gazdasági növekedés, az építőipar bővülése és az épületgépészeti szolgáltatások, különösen a HVAC-rendszerek fejlődése miatt évente 1,5 százalékkal nő.

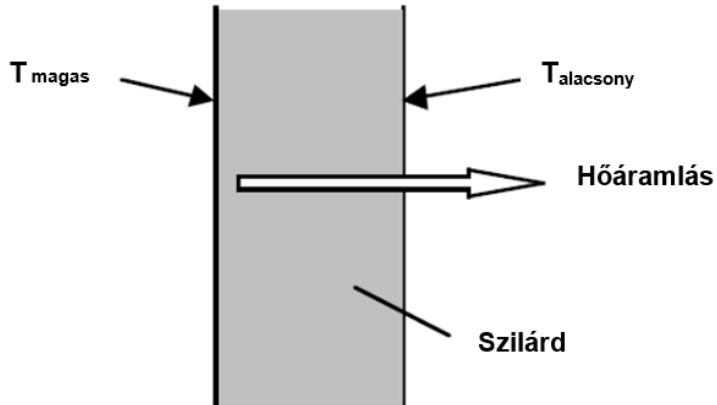
Eközben a meglévő épületek üzemeltetési menedzsmentje révén jelentős energiamegtakarítási potenciál rejlik (Pérez-Lombard et al., 2008). Az Európai Unió a "2020-ra 2020-ig" kezdeményezés bevezetésével bizonyította elkötelezettségét a probléma megoldása iránt, amely az 1990-es szinthez képest 2020-ra 20%-kal kívánja csökkenteni az energiabocsátást és 20%-kal növelni a megújuló energiaforrások részarányát. E célok elérése érdekében számos törvényt és rendeletet kellett bevezetni, hogy az építőipar a nettó nulla energiafelhasználású épületek (NZEB) felé vezessék (Európai Unió, 2010). Az egyik ilyen megközelítés a dinamikus szigetelés alkalmazása az épületek burkolatában. A javasolt fejezet az épületek hőszigetelésének különböző szerkezeteit vizsgálja. Továbbá osztályozza a dinamikus (aktív) szigetelés hátterét, összehasonlító vizsgálatot javasol a szakirodalom által használt különböző matematikai modellek, kísérleti tanulmányok és numerikus szimulációk összehasonlító vizsgálatára.

2.6.2 HŐÁTADÁS AZ ÉPÜLETEKBEN

Ez a szakasz az épületek hőátadási folyamatait mutatja be a három módozat, a vezetés, a konvekció és a sugárzás szempontjából.

VEZETÉSI HŐÁTADÁS

A hőátadási folyamatoknak három elsődleges formája van. Az első a hővezetés, amely a közbeeső anyagon keresztül történő hőátadás, amely nem jár az anyag mozgásával (az anyag helyhez kötött). A 2.6.1. ábra egy szilárd tömböt (jelen esetben épületfalat) mutat, amelynek egyik felülete magasabb, a másik pedig alacsonyabb hőmérsékletű, ez a fajta hőátadás szilárd állapotban akkor fordulhat elő, ha a molekulái között hőmérsékletkülönbség van. A hővezetés során az energiaátadás a testben és magán a testen keresztül történik, ellentétben a többi hőátadási móddal.



2.6.1. ábra: Vezetéssel hűtés

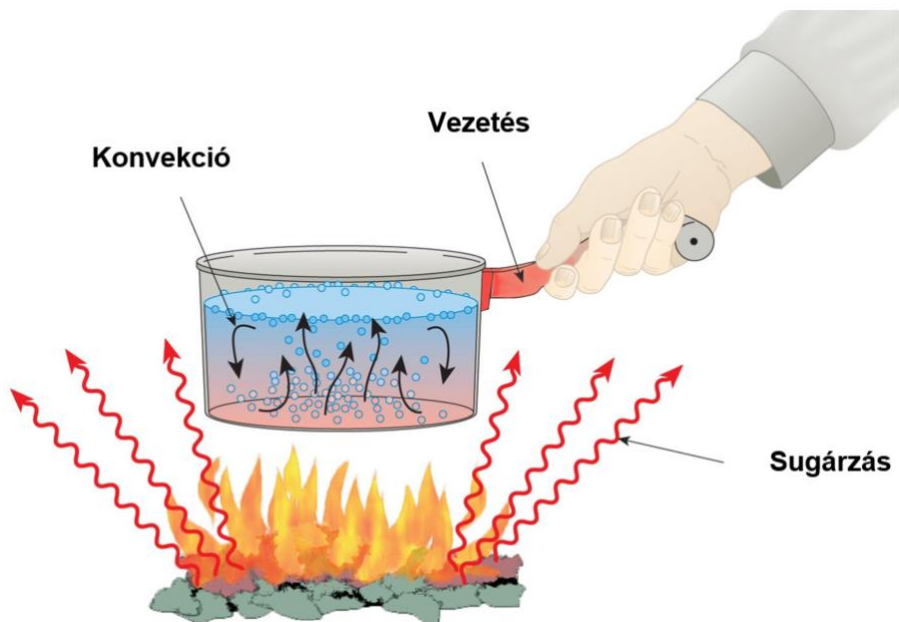
KONVEKCIÓS HŐÁTADÁS

Az áramló folyadék (folyadék vagy gáz) vagy a konvekció okozta hőátadás a hőátadási módok második típusa. Konvekció esetén az energia átadása egy nem egyenletesen eloszló folyadékhőmérséklet tömeges átadásával történik. A konvekciós hőátadásnak két típusa van, a szabad és a kényszerített.

- Szabad konvekció (vagy természetes konvekció): A folyadék hőmérsékletkülönbsége miatt következik be, ami sűrűségkülönbséghez vezet, ami felhajtóerőt eredményez.
- Kényszerített konvekció: Mesterségesen előidézett konvekciós hőátadás akkor következik be, amikor egy folyadékot külső forrás, például ventilátor vagy szivattyú által egy felületen való áramlásra kényszerítik.

SUGÁRZÁSOS HŐÁTADÁS

A sugárzásos hőátadás során az energia anyag nélkül is átvihető a térben. Ez történhet a térben (vákuum) vagy bármely átlátszó közegben (szilárd, folyékony és gáz). A sugárzás alapvető fontosságú az olyan forró hőmérsékletű testek esetében, mint a Nap, ahol az elektromágneses sugárzás energiát ad át. Mindazonáltal minden létező test energiát bocsát ki fotonokban, amelyek véletlen irányban, véletlen fázisban és frekvenciában haladnak. A 2.6.2. ábra a hőátadás három módjának általános szemléltetését mutatja.



2.6.2. ábra A hőátadás alapvető módjai (vezetés, konvekció és sugárzás) (SimWiki Documentation)

2.6.3 A HŐSZIGETELÉS HÁTTERE

Az épületburkolatok hőszigetelése jelentős szerepet játszik az energiatakarékosságban azáltal, hogy a belső és a külső környezet között egy további, nagy hőellenállású réteget hoz létre. A fő hangsúlyt a lehető legnagyobb hőellenállású anyagok megtalálása jelentette a legalacsonyabb költségek mellett. A statikus szigetelőanyagok használata csökkentené az épület homlokzatain a külső és belső tér közötti hőmérsékletkülönbségből adódó hőveszteségeket. Ezzel szemben egy másik megoldás a változó hőellenállású dinamikus szigetelés. A gyakorlatban a nagyobb R-értékkel (hőellenállással) rendelkező anyagok a magasabb hőszigetelési szint miatt kedvezőek. A dinamikus szigetelés úgy érhető el, hogy a szigetelőréteghez egy futó folyadékot adnak, amely az épületburok teljes hosszában képes a hőveszteséget befogni. A folyadék lehet víz, levegő vagy hűtőközeg.

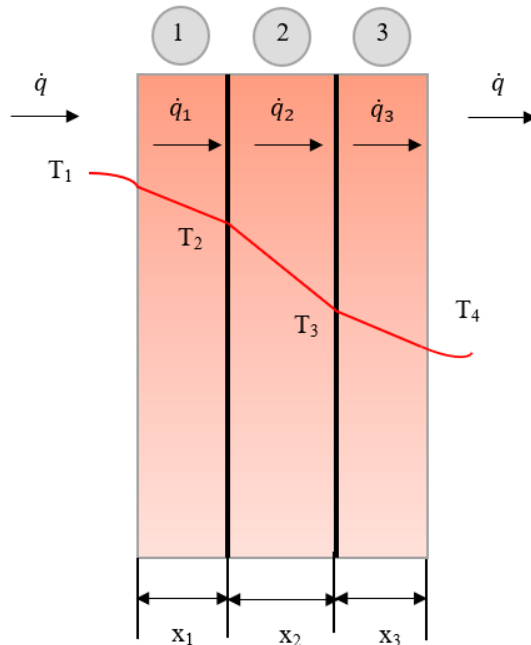
HŐSZIGETELÉS LAKÓÉPÜLETEKBEN HŐSZIGETELÉS LAKÓÉPÜLETEKBEN

A hőszigetelő anyagokat arra használják, hogy csökkentsék a hőenergia áramlását az épületek összetett burkolatán (falak és tető) keresztül, mivel magas R_{th} hőellenállási értékük van. A hőszigetelő anyagok lehetnek szálás, szemcsés, fóliás, lemezes vagy ezekből a kémiai vagy mechanikusan kötött anyagokból álló kompozit anyagok. A hőszigetelő anyagok a következő funkciókat látják el:

- 1- Energiatakarékosság a csövek, csatornák, berendezések és épületszerkezetek hővesztésének vagy hőnyereségének csökkentése révén.
- 2- Az épületszerkezetek és berendezések felületi hőmérsékletének szabályozása a kényelem és a személyvédelem érdekében.
- 3- Megakadályozzák a nedvesség lecsapódását az épületszerkezetek felületén.
- 4- A hőmérséklet-ingadozás csökkentése a klimatizált térben a személyes kényelem érdekében.
- 5- Tűzvédelem biztosítása.
- 6- A zaj- és rezgésszint csökkentése.
- 7- A penészgombásodás csökkentése.

HŐÁTADÁS KOMPOZIT RÉTEGEK FALÁN KERESZTÜL

A kompozit falak (vagy a tető) rétegeiben a hőátadás módja a vezetés, mivel a forróbb molekula energiája a hűvösebb molekulára száll át. Az épületek falai általában több rétegből épülnek fel, ahogy a 2.6.3. ábra mutatja a háromrétegű falban történő hőátadás sematikus ábráját. Állandósult állapot esetén a falrétegeken átáramló hőmennyiség értéke az egyes rétegeknél megegyezik.



2.6.3. ábra A hőátadás sematikus ábrája a kompozit falban

$$\dot{q} = \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 \quad (6-1)$$

Fourier megfigyelte, hogy a vezetési hőáram (\dot{q}/A) egy adott irányban egyenesen arányos a ΔT hőmérsékletkülönbséggel a hőáramlás irányában, és fordítottan arányos a Δx távolsággal ugyanabban az irányban. Így a Fourier-törvény a következőképpen fejezhető ki:

$$\frac{\dot{q}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (6-2)$$

Hol:

\dot{q} = A vezetés útján történő hőátadás sebessége [W]

A = Hőátadó felület [m²]

K = Az anyag hővezető képessége [-].

dT = Hőmérsékletkülönbség [K]

dx = Távolságkülönbség (szakasz hossz) [m]

A 6.3. ábrán az (1) szelvényszámra a (6-2) egyenletet alkalmazva az egyenlet a következőképpen írható át:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_1 - T_2}{x/k} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond1}} \quad (6-3)$$

Hol: $R_{cond} = \frac{x}{k}$, a vezetési hőellenállás (statikus hőellenállás) [m²·K/W], amely analóg az elektromos áramkör hőellenállásával, amint azt a következő ábra mutatja:



2.6.4. ábra A statikus hőellenállás és az elektromos ellenállás analógiája

A kompozit rétegek falának vezetési hőellenállásán kívül a levegő a fal külső és belső felületeivel az e felületek mellett lévő stagnáló vékony légrétegekből érintkezik. Az egyes oldalak ellenállását ($1/h$) adja, ahol h a légfilm vagy a konvekciós hőátadási tényező. Az egyes belső és külső légrétegek hőellenállása a fal geometriájától, a légáramlási sebességtől, a

hőáramlás irányától és a konvekciós hőátadás típusától (szabad vagy kényszerített) függ. Ezért a (6-2) egyenletnek a teljes kompozit rétegek falára történő alkalmazásával a következő egyenlet adódik:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_i - T_o}{R_i + (R_1 + R_2 + R_3) + R_o} \quad (6-4)$$

Ahol R_i és R_o a légrétegek belső és külső konvekciós ellenállása.

Az n rétegszámú összetett fal egyik oldalán lévő levegőből a másik oldalon lévő levegőbe történő hőátadás teljes hőellenállása a következőképpen adódik:

$$R_{th} = R_o + \sum_{j=1}^n (R_{cond})_j + R_i \quad (6-5)$$

A fal teljes hőátadási együtthatóját vagy az U hőátbocsátási tényezőt [$W/m^2 \cdot K$] a következőképpen határozzuk meg:

$$U = \frac{1}{R_{th}} \quad (6-6)$$

Végül, a hőátadási sebesség a kompozit rétegek falán a következőképpen fejezhető ki:

$$\dot{q} = UA(T_i - T_o) \quad (6-7)$$

Az utóbbi időben jelentős erőfeszítések irányulnak a közel nulla energiaigényű épületek (NZEB) megvalósítására. Az évek során az épületgépészek számos újszerű megoldást mutattak be az épületek energiafogyasztásának csökkentésére az épületburkolaton keresztüli hőátadás hangolásával. Az egyik ilyen megközelítés az épületburkolat teljes hőátadási együtthatójának szabályozása, a teljes U_{th} csökkentésével (vagy a teljes hőellenállás R_{th} növelésével). A következő szakaszok az épületek hőszigetelésének különböző szerkezeteit vizsgálják. Továbbá osztályozza a dinamikus (aktív) szigetelés hátterét, összehasonlító vizsgálatot javasol a szakirodalom által használt különböző matematikai modellek, kísérleti tanulmányok és numerikus szimulációk összehasonlító vizsgálatára.

2.6.4 ÉPÜLET HŐSZIGETELÉSE

A statikus szigetelőanyagok használata csökkentené az épület homlokzatán a külső és belső hőmérsékletkülönbség miatt fellépő hőveszteséget. Ezzel szemben egy másik megoldás a változó hőellenállású dinamikus szigetelés.

HAGYOMÁNYOS (STATIKUS) HŐSZIGETELÉS

Napjainkban számos statikus szigetelőanyag áll rendelkezésre a hagyományos/konvencionális és a nagy teljesítményű hőszigetelő anyagoktól kezdve, az utóbbiak jóval alacsonyabb hővezetési értékeket mutatnak. A szigetelőanyag kiválasztásakor a cél a lehető legjobb megvalósítható hőszigetelési értékek elérése a nagyobb hőellenállás kiválasztásával. Ez magában foglalja a csökkentett hővezető képességű anyagok használatát, hogy az épület homlokzatán a lehető legalacsonyabb hőátbocsátási tényezőt (U-értéket) érjük el. A 2.6.1 táblázat néhány statikus anyag és a legkorszerűbb (nagy teljesítményű) szigetelőanyagok hővezetési tényezőjének összehasonlítását mutatja. (Jelle, 2011).

2.6 1. táblázat A hagyományos (statikus) és a nagy teljesítményű hőszigetelés összehasonlítása

	Anyag	Hővezető képesség
Hagyományos	Cellulóz	40-50 W/(m.K)
	Parafa	
	Ásványgyapot	
	Expandált polisztirol (EPS)	30-40 W/(m.K)
	Extrudált polisztirol (XPS)	
	Poliuretán (PUR)	20-30 W/(m.K)
A legkorszerűbb (Nagy teljesítményű)	Aerogélek	13-14 W/(m.K)
	Vákuumszigetelő panelek (VIP)	3-4 W/(m.K)
	Vákuumszigetelő anyagok (VIM)	< 4 W/(m.K)
	Gázszigetelő anyagok (GIM)	
	Nano szigetelőanyagok (NIM)	

Az épület szigetelőképessége számos tényezőtől függ, többek között a hőtehetetlenségtől, a nedvességelnyelő képességtől és a légzárástól, és nem csak a szigetelőanyag típusától és vastagságától (Bokalders & Block, 2010). Télen például a statikusan magasabb hőszigetelési szint segít csökkenteni az épületek hővesztését, de korlátozza a falon keresztüli hőáramlást is, amikor ez potenciálisan értékes lehet. Másrészt nyári esetekben az épületrészekben összegyűjtött hő eltávolítása szükséges a belső terhelések és a napközbeni ablakokon keresztül érkező szoláris nyereségek miatt. Az erősen hőszigetelt épületekben nagyobb valószínűséggel fordulnak elő jelentős túlmelegedési problémák, mivel a belső hőmérséklet gyorsabban reagál a napfényre és a belső nyereségekre. A hagyományos gondolkodásmód szerint a magasabb állandó R-érték a burkolat esetében mindig csökkenti az energiafogyasztást és az üzemeltetési energiaköltségeket. Néhány közelmúltbeli tanulmány azonban kritizálta ezt az elméletet, mivel kimutatta, hogy a hőellenállás egy bizonyos ponton túli növelése növelheti az energia éves összefogyasztását. Ezért új technológiát kell kifejleszteni az épületszigetelés területén annak érdekében, hogy leküzdjük a hagyományos statikus szigetelőanyagok használatának hátrányait, és előrelépünk a közel nulla energiaigényű épület (NZEB) koncepciójának megvalósítása felé.

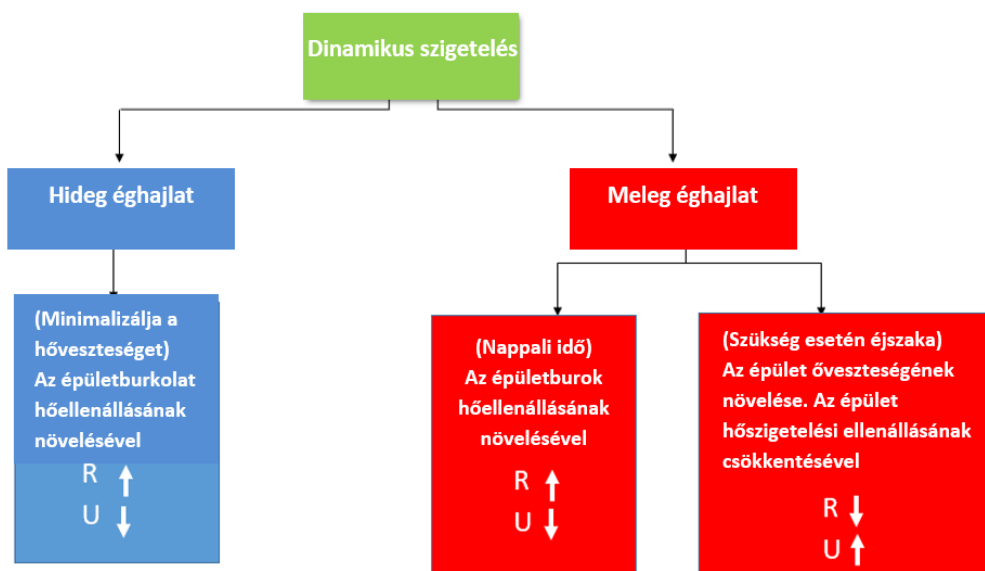
DINAMIKUS SZIGETELÉS

A dinamikus szigetelés (DI) vagy (aktív szigetelés) azt jelenti, hogy a burkolat hőellenállásának "R-értéke vagy U-értéke" beállítható, ami lehetővé teszi az épületen belüli/külső hőátadási sebesség szabályozását. A DI továbbá hőcserélőként beépíthető a falak és a tetők épületszerkezetébe, és így a szellőztetett külső levegő télen előmelegíthető, nyáron pedig előhűthető. Ennek megfelelően a transzmissziós hőveszteség már nem állandó a burkolaton belül.

Dinamikus hőszigetelés = Hagyományos hőszigetelés + Dinamikus hőcsere az épületburkolaton belül

A dinamikus szigetelés elsődleges funkciója, hogy a belső térben megfelelő hőmérsékletet tartson fenn az energiafelhasználás és a kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátás minimalizálása érdekében. A dinamikus szigetelés a legtöbb éghajlati viszonyok között is megvalósítható, mivel a beltéri és a kültéri hőmérsékletkülönbség nem befolyásolja jelentősen. A 2.6.5. ábra mutatja a rendelkezésre álló felhasználási stratégiákat, amelyekként a dinamikus szigetelés működhet. Például hideg éghajlaton a cél a meleg beltérből a hideg kültérbe történő hőveszteség minimalizálása az épületburkolaton keresztül a hőellenállás "R-érték" növelésével (a hőátbocsátási "U-érték" csökkentésével). Másrészt, nyáron, amikor a kültéri állapot nagyon meleg és a beltérben hideg van, a cél a hőellenállás növelése a kívánt beltéri állapot fenntartása érdekében. Továbbá egyes épületek passzív fűtési/hűtési stratégiákat alkalmaznak, amelyekben a dinamikus szigetelés is használható az éjszakai hőveszteség növelésére az R-érték "U-érték" csökkentésével. Ennek alapján a szellőztetett légáramlás és a hőáram iránya két dinamikus szigetelési üzemmódba sorolható:

- Proflux hőcserélő, a légáram és a hőáram azonos irányban mozog.
- Contraflux hőcserélő, a légáram és a hőáram ellentétes irányban mozog.



2.6.5. ábra Lehetséges dinamikus szigetelési stratégiák az éghajlat és a felhasználási cél alapján

A DI koncepcióját először az 1960-as években fejlesztették ki dinamikus szigetelt mennyezeteket alkalmazó norvégiai mezőgazdasági épületekben, ahol felfedezték, hogy a hagyományos istálló levegőellátása, amelyet a természetes kéményszellőztetés húzott, hőcserét idézett elő a szénadatlásban tárolt anyagokkal (Morrison et al., 1992). Az 1980-as években azonban a kutatók elkezdtek tanulmányozni a dinamikus szigetelés fizikáját. Bartussek volt az első, aki az ötletet háztartási konfigurációban alkalmazta. Megfelelő szerkezeti részletekkel nulla U-értéket ért el huzat nélkül két norvég lakóépületben, amelyeket dinamikus szigeteltek (Baker & Phd, 2003). Bár a dinamikus szigetelés koncepcióját több mint 30 évvel ezelőtt javasolták, a sokféle kihívás és bizonytalanság miatt még nem használták fel az épülettervezésben. A 2.6.6. ábra összefoglalja a dinamikus szigetelési technológia erősségeinek, gyengeségeinek, lehetőségeinek és veszélyeinek elemzését (SWOT-elemzés).

- 1- A technológia épületekben való alkalmazásával kapcsolatos megfontolások és kihívások ellenére a következő előnyökkel rendelkezik:
- 2- A rendszer hőcserélőként működhet, azaz a beltéri szellőzés télen előmelegíthető, nyáron pedig előhűthető.
- 3- A DI szűrőként működhet, amely képes a 0,5 μ m-nél kisebb és 5 μ m-nél nagyobb átmérőjű részecskék felfogására (Taylor et al., 1998), így jobb beltéri levegőminőséget biztosít.
- 4- A dinamikus szigetelés korlátozza a vízgőz átjutását a belső környezetbe, amikor ellenáramlási üzemmódban van, csökkentve a helyközi kondenzáció és a penészképződés veszélyét (van der Aa et al., 2011).

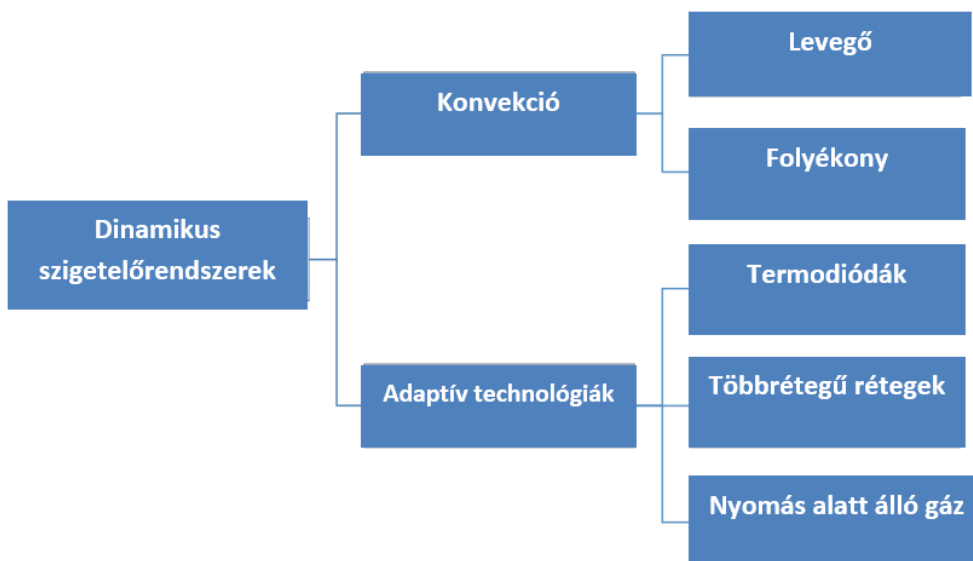
- 5- Mivel a DI használatával az épületszerkezeten keresztüli hőveszteség sokkal kisebb lenne, a hagyományos épületburkolat helyett jobb megoldást jelentene. Könnyű, olcsó és vékonyabb falak és tetők léteznének (van der Aa et al., 2011).



2.6.6. ábra SWOT-elemzés a dinamikus szigetelési megközelítéshez

RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ALKALMAZÁSOK

A dinamikus szigeteléshez többféle, a folyadék típusa és a keringés típusa alapján kategorizált szerkezet létezik, amint azt a 2.6.7. ábra mutatja. A következő szakasz a rendelkezésre álló szakirodalom korábbi tanulmányain alapul.



2.6.7. ábra Elérhető dinamikus szigetelőrendszerek folyadék típus/körforgás alapján.

(A) DINAMIKUS SZIGETELÉS KONVEKCIÓVAL

A dinamikus szigetelés alapelve az, hogy a statikus szigetelőréteghez folyadékot adnak. Az áramló folyadék lehet elsősorban (levegő), víz vagy hűtőközeg. Ezért célja az épületburok hőveszteségének minimalizálása azáltal, hogy lehetővé teszi a szellőzőlevegő hatékony előmelegítését és a burkolaton keresztül történő hőveszteség megkötését. Az egyszerűség kedvéért ebben a fejezetben a DI-t a téli évszak alapján kezeljük, így a hőveszteség belülről kifelé halad. A téli szezonban a dinamikus szigetelés:

- Csökkentse a falon/mennyezeten keresztüli hőveszteséget.
- Ezzel egyidejűleg előmelegített levegőt juttasson a belső térbe.

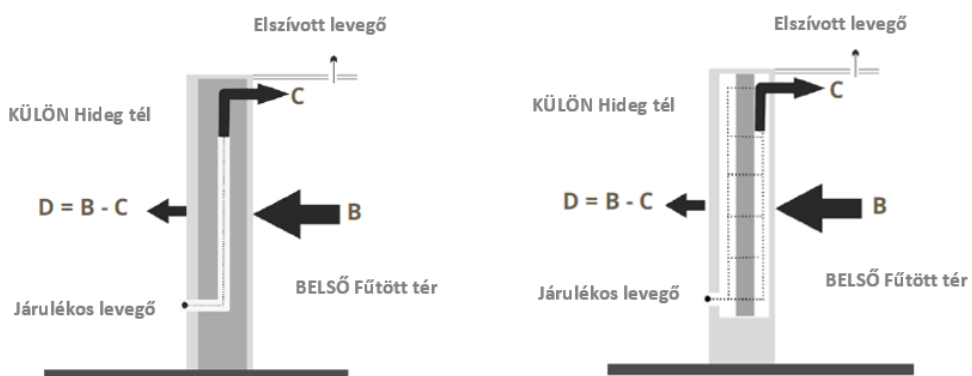
1) DINAMIKUS SZIGETELÉS LEVEGŐVEL

Ez tekinthető a dinamikus hőszigetelés leggyakoribb alkalmazásának. Mivel az áramló levegő az üzemi körülményeknek megfelelően melegszik vagy hűl, a falak hőcserélőként szolgálnak, és ez a jelenség fokozza az egész épületrendszer energiateljesítményét. Változó R-értékek érhetőek el azáltal, hogy a külső levegő behatolhat a fal üregeibe, majd a falakon belül elhelyezkedő csatornákon keresztül a belső terekbe. (Brunsell, 1994) a dinamikus szigetelést olyan konstrukcióként határozta meg, ahol a levegőt a szigetelésen keresztül - jellemzően a hidegebb külső levegőből - a fűtött épületbe kényszerítik, hogy elérjék az elméleti nulla U-értéket. A dinamikus szigetelési technológiáknak jelenleg két kategóriája áll rendelkezésre:

- A falban lévő üregek a levegő keringtetésére. Ezekben az üregekben a levegő mozgása általában a fallal párhuzamos, ami hőcserélőként működik.
- Lélegző falak használata, amely egy légáteresztő falszerkezet, amely átengedi a levegőt. A gáz és a szilárd fázisok kölcsönhatása szintén hőcserélőként szolgálhat az ellenáramlásos üzemmódban.

Az első kategóriát gyakran parietodinamikus szigetelésnek nevezik (a légáramlás a falsíkkal párhuzamosan halad), mivel a 6.8. a) ábrán látható, hogy az alkalmazott anyagok ideális esetben légmentesen zárnak, és az átjárók lehetnek zártak vagy szabadon hagyottak. Míg a második kategóriát permeodinamikus szigetelésnek nevezik (a légáramlás a falsíkra merőlegesen halad), amint azt a 2.6.8. ábra (b) mutatja. Ennél a típusnál a konfiguráció három rétegből áll: Egy külső réteg, amely ki van téve a külső környezeti levegőnek; egy lélegző réteg, amely porózus anyagból áll, amely lehetővé teszi a légáramlás számára a belső tér ellátását a keletkező nyomáskülönbség révén (alacsony nyomásesés a belső és a külső tér között); és a harmadik réteg az első és a második réteg közötti légréteg. A lélegző falakat az elosztott szellőztető légellátó rendszer megközelítéseként tanulmányozták, ahol a fal ellátási forrásként, hőcserélőként és a levegőben lévő szennyező anyagok szűrőjeként működik. (Imbabi, 2006).

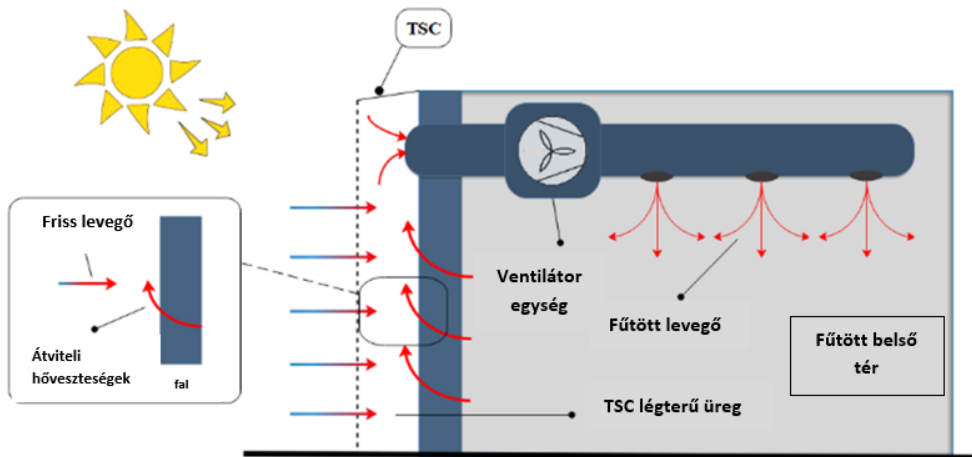
A parietodinamikus szigetelés fontos példája a napenergia és a dinamikus szigetelési megtakarítások integrálása a napkollektor (TSC) segítségével, amelyet az egyik legmegbízhatóbb és legköltséghatékonyabb napkollektoros fűtési rendszernek tartanak. A TSC elsődleges feladata a szellőztetett levegő előmelegítése mellett hatékony eszköznek tekinthető a további aktív szigetelés biztosítására is az épület homlokzatán, ahol telepítették. A 2.6.9. ábra mutatja a transzpirációs napkollektor működési elvét és azt, hogy hogyan tekinthető aktív szigetelő rendszernek (Fawaier et al., 2021).



2.6.8. ábra a) Parietodinamikus falszerkezet. (b) Permeodinamikus falszerkezet (Imbabi, 2012)

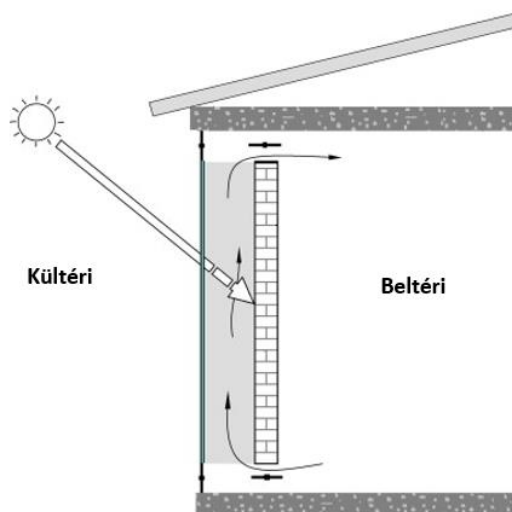
Ennek megfelelően a TSC-nek három jelentős előnye lenne, amelyek az épületekben való alkalmazásával elérhetőek. Az első egy megbízható megoldás az épületek szellőztetésére

(fűtés/előfűtés), a második egy olyan hőgátnak tekinthető, amely képes megakadályozni a fűtött belső térből a hideg környezetbe történő hőveszteséget, a harmadik pedig az, hogy amikor a TSC üzemmódban van, a légkezelő egység képes lesz visszanyerni a TSC légterében lévő transzmissziós hőveszteséget (a második előnyben szereplő hőgát).



2.6.9. ábra: Az átszivárgó napkollektor, mint dinamikus szigetelő működési elve (Fawaier et al., 2021)

A Trombe-fal egy másik alkalmazás, ahol a levegő a nap okozta közvetett hőátadás miatt kering. Ezért dinamikus szigetelés lesz (Kisilewicz et al., 2019). A Trombe-falat (vagy napfalat) eredetileg 1881-ben Morse szabadalmaztatta, de csak 1972-ben, Trombe hasonló rendszerének szabadalmaztatásáig vált népszerűvé. A 2.6.10. ábra a Trombe-fal működési elvét mutatja be kiegészítő dinamikus szigetelésként. Számos tanulmány vizsgálta a Trombe-falat, mint dinamikus szigetelőt, és kimutatta, hogyan csökkenti a hőveszteséget és javítja a beltéri levegő minőségét (Shen et al., 2007) és (Claes et al., 2010).



2.6.10. ábra: A Trombe-fal dinamikus szigetelő hatása a homlokzati légüres térben történő légmozgásból adódik (Shen et al., 2007)

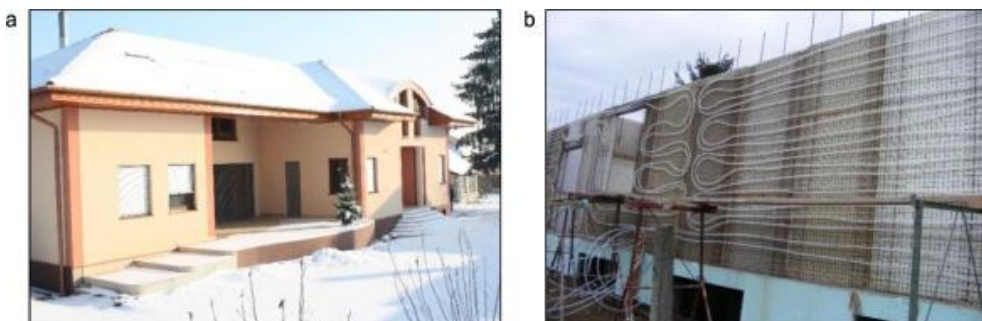
Vissza a szakirodalomhoz, és a parietodinamikai szigetelőrendszerek fejlesztéséhez. (Imbabi, 2012) bemutatta az új Void Space Dynamic Insulation (VSDI) konfigurációt, amely hatékony épületburkolatot és magasabb beltéri levegőminőséget biztosít vékony falszerkezetekben. Az alapkonceptió lényege a levegő mozgásának korlátozása egy vagy több szigetelőanyag-réteg és a falszerkezet által meghatározott egysíkú üregben. A tanulmány hipotézise volt egy áramlási szimuláció Solidworks segítségével egy alacsony költségű, hatékony szellőzéssel párosított hagyományos statikus szigeteléshez. Egy másik tanulmányt a konvekciós levegő DI-ről készített (Ascione et al., 2015), amelyben MATLAB kód segítségével véges differencia módszert alkalmaztak a hideg évszakok dinamikus szigetelésének átmeneti feltételeinek vizsgálatára. A dinamikus szigetelés energiahatékonyágát a "dinamikus U-értékkel" mérik, amely akkor változik, amikor a levegő átáramlik a légüregben. (Pflug et al., 2015) egy új módszert mutatott be a kapcsolható U-érték megvalósítására a zárt elemen belüli légkonvekció szabályozásával. A TRNSYS segítségével történő szimulációs ábrázolást alkalmazták az ezen ötlet felhasználásának kísérleti eredményeinek validálására a hűtési szezonban. A kapcsolható vezető-szigetelő U-érték akár 29,6%-kal is csökkentheti a hűtési igényt. Ebben a fejezetben a 2.6 2. táblázat foglalja össze a rendelkezésre álló, a szövegben felhasznált dinamikus szigetelési szakirodalmat.

2) DINAMIKUS SZIGETELÉS FOLYADÉKKAL

A dinamikus szigetelés második folyadékrendszere folyadékok, például víz vagy hűtőközeg felhasználásával történik. Ennél a típusnál egy csőrendszert helyeznek el a külső épületburkolat szerkezetén belül, amelyben a fűtő- és hűtőközeg a kívánt alkalmazástól függően kering. egy újszerű épületfalszerkezetet vizsgáltak, amely alacsony minőségű termásvízet tartalmazó kapilláris csőhálózatot használ. Matematikai modellt dolgoztak ki a dinamikus termikus rendszer alkalmazásának értékelésére a fal három helyén. Az eredmények azt mutatták, hogy a belső falak felületi hőmérsékletében kisebb az ingadozás, ha a csőrendszert a belső oldalon helyezik el; ennek megfelelően jobb beltéri hőkomfort jön létre.

(Kisilewicz et al., 2019) kísérletileg egy nyíregyházi családi házat vizsgáltak. Az épület falait egy csőrendszerrel kapcsolták össze, amelyben glikol (hűtőközeg) keringett. A kapcsolt tekercset egy talajhőcserélőhöz kapcsolták, amely 1,75 m-rel a talajszint alatt helyezkedik el. Ez a hógát javította a hőkomfortot nyáron és télen, és 63%-kal csökkentette a hővesztéséget a hagyományos statikus szigetelőanyagokhoz képest, amint azt a 2.6.11. ábra mutatja. Egy másik innovatív rendszer (Al-Nimr et al., 2009) az épületburkolatok dinamikus szigetelési rendszerét javasolta, amely szintén folyadékokon alapul. A rendszer egy mozgatható válaszfalból áll két rés között, amelyet különböző vezetőképességű és hőtágulású folyadékokkal töltöttek ki. Mindkét folyadék egy vezérlőrendszerhez és kis tartályokhoz van

csatlakoztatva. A rés két oldalán lévő két folyadék mennyiségének szabályozásával a teljes falszerkezet hőellenállása szabályozható.



2.6.11. ábra a) Az épület nyugati homlokzatának áttekintése b) A hőcserélő elrendezése a földszinti falban (Kisilewicz et al., 2019)

(Figiel & Leciej-Pirczewska, 2020) Az aktív hőszigetelés használatából eredő energiateljesítményt és CO₂-kibocsátást vizsgálták. A falszerkezetbe vízbázisú Thermo aktív falszigetelőt szereltek, ahol a rendszer csövei aktív hógátat biztosítanak a külső és a fűtött tér közötti hőátadáshoz. A kutatást a lengyel meteorológiai bázis alapján, mérsékelt éghajlaton, egy egylakásos családi ház esetében hajtották végre.

Egyre több erőfeszítés történik az épület dinamikus szigetelésének a fázisváltó anyagokkal (PCM) való integrálására is. (Kishore et al., 2020) ezt az integrációt vizsgálta, bemutatva a technika alkalmazásának hatását különböző éghajlati viszonyok esetén. Az eredmények az éves hőnyereség 15-72%-os csökkenését és 7-38%-os megtakarítást mutattak a hővesztéssel szemben.

(B) DINAMIKUS SZIGETELÉS ADAPTÍV SZIGETELÉSI TECHNOLÓGIÁK

A dinamikus konvekciós szigetelés levegővel vagy folyadékkal történő alkalmazásának előnyei ellenére a módszer számos kihívással jár. Ezek a kihívások a rendszer kialakításának összetettségével és a folyadék keringetéséhez szükséges mechanikai alkatrészekkel kapcsolatosak. A következő szakasz más lehetőségeket vizsgál meg, amelyeket a DI kutatói a technológia épületek homlokzatába történő integrálása érdekében tettek..

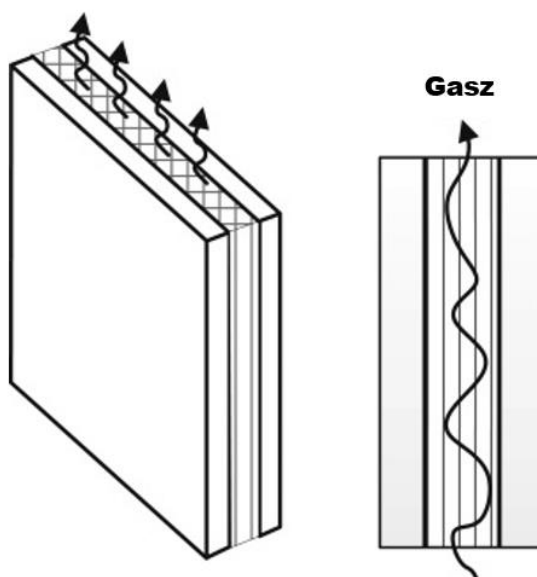
1) TERMODIÓDÁK HASZNÁLATA

Az első módszer kétirányú termodiódát használ, amely az egyik irányban képes hőt átadni, a másik irányban pedig szigetelést biztosítani. Varga és munkatársai (Varga et al., 2002) a kétirányú termodióda különböző tervezési változatait vizsgálták hűtési évszakos körülmények között. Az eredmények azt mutatták, hogy a hőmérsékletkülönbségtől függően a látszólagos vezetőképesség a hőátadás irányában háromszor-öttször nagyobb volt. Chun et al. (Chun et al., 2009) szintén javasolt egy kísérletsorozatot a kétirányú termodióda

teljesítményének vizsgálatára, és arra, hogy hogyan befolyásolná azt különböző munkafolyadékok és működési feltételek használata. Az eredmények azt mutatták, hogy ez a rendszer a környezetből elnyelt sugárzás akár 40%-át is át tudja vinni a beltérbe.

2) TÖBBRÉTEGŰ SZIGETELÉS

Egy másik mechanizmus a többrétegű szigetelés használata, amely lehetővé teszi a magas és alacsony R-értékek közötti váltást. Kimber és társai (Kimber et al., 2014) új többfunkciós szigetelést javasoltak, ahol vékony polimer membránokat helyeznek el a falon belül, hogy légrétegeket hozzanak létre, így a természetes konvekció hatása elhanyagolhatóvá válik. A cikk mind a szigetelő, mind a vezető konfigurációkra összpontosított a tipikus körülmények között. Az alacsony R-értékek elérése érdekében a levegőt eltávolítják, és a rétegeket összenyomják, így a polimer membránokon keresztül csak a vezetési hőátadás marad. Park és munkatársai (Park et al., 2015) a dinamikus szigetelőanyagok használatának hatását értékelték a fűtési és hűtési energia végfelhasználására. Három amerikai éghajlatú, egyzónás lakóépületet elemeztek. A szigetelőanyagok merev cellás panelek, amelyeket az épület külső falüregében helyeztek el. A szerelvény ömlesztett hővezető képességét változó vezetőképességű inert gázok (szén-dioxid, nitrogén, hélium) hozzáadásával állították be, ezáltal befolyásolva az épületburkolaton keresztül történő hőátadási sebességet, amint azt a 2.6.12. ábra szemlélteti. A szigetelőközeg a beltéri-kültéri hőmérsékletkülönbségeken alapuló napi, heti vagy szezonális szabályozási stratégiák segítségével állítható be.

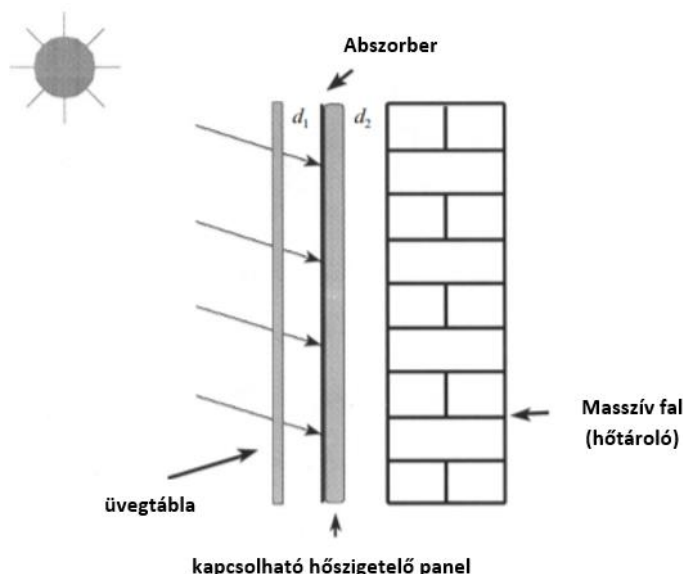


2.6.12. ábra Többrétegű dinamikus szigetelés működési elve változó vezetőképességű inert gázok alkalmazásával (Park et al., 2015)

3) NYOMÁS ALATT LÉVŐ GÁZ HASZNÁLATA

A gáznyomással változó ellenállás (dinamikus U-érték) kialakítására többféle megközelítést alkalmaztak. Benson és társai (Benson et al., 1994) a változó vezetőképességű vákuumszigetelés koncepcióját mutatták be. A rendszer hőellenállás-különbségét a vákuumburkolathoz rögzített kis fémhidrid hőmérsékletének elektronikus beállításával érték el. A tervezési megfigyeléseket összevetették a laboratóriumi kísérletekből származó, próbapados mintákkal végzett eredményekkel. Javasoltak néhány lehetséges autóiipari alkalmazást is erre a változó vezetőképességű vákuumszigetelő rendszerre. Berge és munkatársai (Berge et al., 2015) a légnyomás szabályozásával módszert dolgoztak ki a levegő hővezető képességének modulálására egy vákuumszigetelő panel és aerogél takaró nanopórusos füstölt szilícium-dioxid szerkezetében. Az eredmények azt mutatták, hogy a füstölt szilícium-dioxid esetében a hővezető képesség körülbelül háromszoros, aerogél takaró esetében pedig kevesebb mint kétszeres változást mutatott, amikor a nyomás 1 és 100 kPa között változott.

Az épületek homlokzatainak napfényes fűtésére Horn és társai (Ronny et al., 2000) számítógépes szimulációkat végeztek kapcsolható hőszigetelésre, amint azt a 2.6.13. ábra mutatja. A módszer fémhidriddel állítja be a hidrogéngáz nyomását a panel belsejében, és így a hővezető képességet körülbelül a felére változtatja. A 2.6.2. táblázat összefoglalja a rendelkezésre álló dinamikus szigetelési rendszerek szakirodalmának áttekintését.



2.6.13. ábra Egy kapcsolható hőszigeteléssel ellátott épület homlokzatának oldalnézete (Ronny et al., 2000)

2.6.2 Táblázat: A dinamikus hőszigetelési rendszerek szakirodalmának áttekintése

Mechanizmus	Leírás	Megközelítés	Referencia
Konvekció (levegő)	Az előmelegített levegő a szigetelésen keresztül a hidegebb külső levegőből a fűtött épületbe áramlik..	Kísérleti mérések összehasonlítása egy matematikai modellel	(Brunsell, 1994)
	Hőátadási tanulmány dinamikus szigetelésű lakófalhoz.	Numerikus elemzés	(Morrison et al., 1992)
	Üreges tér dinamikus szigetelés (VSDI).	Áramlásszimuláció Solidworks segítségével	(Imbabi, 2012)
	Moduláris légzőpanel	1-D analitikus modell	(Imbabi, 2006)
	Légáteresztő épület szellőzéssel ellátott burkolati elemek.	Numerikus elemzés (véges differenciák módszere FDM) MATLAB segítségével	(Ascione et al., 2015)
	Áttetsző dinamikus szigetelőrendszer burkolata kapcsolható szigeteléssel.	Kísérleti mérések és szimulációs ábrázolás TRNSYS segítségével	(Pflug et al., 2015)
Konvekció (folyadék)	Közvetlen kapcsolat a homlokzati elem és a talajhőcserélő között.	Kísérleti mérések	(Kisilewicz et al., 2019)
	Aktív hangoló épületfalba ágyazott kapilláris csőhálózat.	Matematikai modell és MATLAB-elemzés	(Niu & Yu, 2016)
	Mozgatható válaszfal két, különböző hőtani tulajdonságú folyadékkal töltött rész között.	Analitikus hőátadási modell	(Al-Nimr et al., 2009)
	Vizes alapú termoaktív falzáróelem.	Kísérleti mérések	(Figiel & Leciej-Pirczewska, 2020)

Adaptív szigetelési technológiák

Termodiódák	Kétirányú termodióda panelek.	Kísérleti mérések és analitikus hőátadási modell	(Varga et al., 2002)
Többrétegű rétegek	Kétirányú termodióda.	Kísérleti mérések	(Chun et al., 2009)
	Összeomló számú légrétegek.	Matematikai modell	(Kimber et al., 2014)
Gáznymás	Dinamikus szigetelőpanelek szabályozható hőellenállással.	Szimulációs ábrázolás	(Park et al., 2015)
	Változtatható vezetőképességű szigetelés	Kísérleti mérések és matematikai modell	(Benson et al., 1994)
Mechanizmus	Változó nyomás az aerogél takarón.	Kísérleti mérések és szimulációs ábrázolás	(Berge et al., 2015)
	Hidrogén adszorpciója/deabszorpciója.	Szimulációs ábrázolás	(Horn et al., 2000)

2.6.5 HIVATKOZÁSOK

Al-Nimr, M. A., Asfar, K. R., & Abbadi, T. T. (2009). Design of a smart thermal insulation system. *Heat Transfer Engineering*, 30(9), 762–769.
<https://doi.org/10.1080/01457630802678664>

Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2015). Dynamic insulation of the building envelope: Numerical modeling under transient conditions and coupling with nocturnal free cooling. *Applied Thermal Engineering*, 84, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.039>

Baker, P. H., & Phd, B. (2003). The thermal performance of a prototype dynamically insulated wall. *Building Serv. Eng. Res. Technol*, 24, 25–34.
<https://doi.org/10.1191/0143624403bt0570a>

- Benson, D. K., Potter, T. F., & Tracy, C. E. (1994, March 1). Design of a variable-conductance vacuum insulation. *SAE Technical Papers*.
<https://doi.org/10.4271/940315>
- Berge, A., Hagentoft, C. E., Wahlgren, P., & Adl-Zarrabi, B. (2015). Effect from a Variable U-Value in Adaptive Building Components with Controlled Internal Air Pressure. *Energy Procedia*, 78, 376–381.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.677>
- Bokalders, V., & Block, Maria. (2010). *The whole building handbook : how to design healthy, efficient and sustainable buildings*. 689.
- Brunsell, J. T. (1994). *The performance of dynamic insulation in two residential buildings*. / AIVC (No. 15th). AIVC Conference.
<https://www.aivc.org/resource/performance-dynamic-insulation-two-residential-buildings>
- Chun, W., Ko, Y. J., Lee, H. J., Han, H., Kim, J. T., & Chen, K. (2009). Effects of working fluids on the performance of a bi-directional thermodiode for solar energy utilization in buildings. *Solar Energy*, 83(3), 409–419.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.09.001>
- Claes, K., Klein, R., De Couvreur, G. H., Versele, A., & Breesch, H. (2010). The net-zero building “Solar 2002”: Learning from an early example. *SB10 Euregional Conference Sustainable Building*.
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). (2010). *Official Journal of the European Union.*, 53, 13–35.
- Fawaier, M., Bokor, B., & Horváth, M. (2021). Wall heat loss recapture evaluation of transpired solar collectors for different climates: A European case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 100836. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100836>
- Figiel, E., & Leciej-Pirczewska, D. (2020). Outer wall with thermal barrier. Impact of the barrier on heat losses and CO2 emissions. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 29(2), 223–233.
<https://doi.org/10.22630/PNIKS.2020.29.2.19>
- Imbabi, M. S. E. (2006). Modular breathing panels for energy efficient, healthy building construction. *Renewable Energy*, 31(5), 729–738.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.009>

- Imbabi, M. S. E. (2012). A passive–active dynamic insulation system for all climates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 247–258.
<https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2013.03.002>
- 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(10), 2549–2563. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.05.015>
- Kimber, M., Clark, W. W., & Schaefer, L. (2014). Conceptual analysis and design of a partitioned multifunctional smart insulation. *Applied Energy*, 114, 310–319.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.067>
- Kishore, R. A., Bianchi, M. V. A., Booten, C., Vidal, J., & Jackson, R. (2020). Enhancing building energy performance by effectively using phase change material and dynamic insulation in walls. *Applied Energy*, 283, 116306.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116306>
- Kisilewicz, T., Fedorczyk-Cisak, M., & Barkanyi, T. (2019). Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. *Energy and Buildings*, 205, 109541. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109541>
- Morrison, I. D., Karagiozis, A. N., & Kumaran, K. (1992). *Thermal Performance Of A Residential Dynamic Wall*.
- Niu, F., & Yu, Y. (2016). Location and optimization analysis of capillary tube network embedded in active tuning building wall. *Energy*, 97, 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.094>
- Park, B., Srubar, W. V., & Krarti, M. (2015). Energy performance analysis of variable thermal resistance envelopes in residential buildings. *Energy and Buildings*, 103, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.061>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.007>
- Pflug, T., Kuhn, T. E., Nörenberg, R., Glück, A., Nestle, N., & Maurer, C. (2015). Closed translucent façade elements with switchable U-value - A novel option for energy management via the facade. *Energy and Buildings*, 86, 66–73.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.082>
- Ronny, H., Rene, N., Michael, M., Jorg, H., Roland, C., & Jochen, F. (2000). Switchable thermal insulation: Results of computer simulations for optimisation in building

applications. *High Temperatures -High Pressures*, 32, 669–675.
<https://doi.org/10.1068/htwu531>

Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L., & Huang, D. (2007). Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls. *Energy and Buildings*, 39(8), 962–974. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.11.003>

Taylor, B. J., Webster, R., & Imbabi, M. S. (1998). The building envelope as an air filter. *Building and Environment*, 34(3), 353–361. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00017-1)

van der Aa, A., Heiselberg, P., & Perino, M. (2011). *DESIGNING WITH RESPONSIVE BUILDING COMPONENTS*. https://iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_44_RBE_Design_Guide.pdf

Varga, S., Oliveira, A. C., & Afonso, C. F. (2002). Characterisation of thermal diode panels for use in the cooling season in buildings. *Energy and Buildings*, 34(3), 227–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00090-1)

What Is Heat Transfer? | SimWiki Documentation | SimScale. (n.d.). Retrieved August 9, 2021, from <https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>

A projektet az Európai Bizottság támogatta. A kiadványban megjelentek nem szükségszerűen tükrözik az Európai Bizottság nézeteit.

Az Európai Unió
Erasmus+ programjának
társfinanszírozásával



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

