



HI-SMART: BALÍK VYŠŠIEHO VZDELÁVANIA PRE TAKMER NULOVÚ SPOTREBU
ENERGIE A NÁVRH INTELIGENTNÝCH BUDOV

MODULE # 2

ČASŤ 6: DYNAMICKÉ TEPELNOIZOLAČNÉ SYSTÉMY

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



STU

SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA



2.6.1 DYNAMICKÁ TEPELNÁ IZOLÁCIA AKO PRÍSTUP K NZEB

Dva rozhodujúce faktory pre energeticky efektívne stavebníctvo sú dodávky energie z udržateľných zdrojov počas celého roka a efektívne využívanie vyrobenej energie s minimálnymi stratami. Sektor budov sa na celosvetovej spotrebe energie podieľa približne 40 %. Izolačné systémy budov možno rozdeliť do dvoch kategórií: konvenčné a dynamické izolácie. Cieľom oboch je znížiť tepelné straty obvodového plášťa budovy zvýšením tepelného odporu stavebnej konštrukcie (strechy a fasády). Spotreba energie v Európe rastie ročným tempom 1,5 % v dôsledku hospodárskeho rastu, rozširovania stavebného sektora a rozvoja služieb v budovách, najmä systémov HVAC.

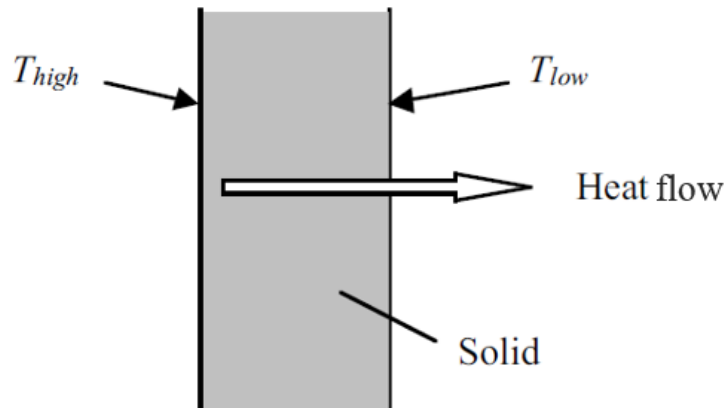
Potenciál úspor energie prostredníctvom riadenia prevádzky existujúcich budov je pritom značný (Pérez-Lombard et al., 2008). Európska únia preukázala svoje odhodlanie riešiť tento problém zavedením iniciatívy "2020 do roku 2020", v rámci ktorej sa plánuje zníženie emisií energie o 20 % a zvýšenie podielu energie z obnoviteľných zdrojov o 20 % v roku 2020 v porovnaní s úrovňou v roku 1990. Na splnenie týchto cieľov bolo potrebné zaviesť niekoľko zákonov a predpisov, ktoré by viedli stavebný sektor k budovám s nulovou spotrebou energie (Net-Zero Energy Building - NZEB) (Európska únia, 2010). Jedným z týchto prístupov je používanie dynamickej tepelnej izolácie v obvodových plášťoch budov. V navrhovanej kapitole sa skúmajú rôzne štruktúry tepelnej izolácie budov. Ďalej klasifikuje pozadie dynamickej (aktívnej) izolácie, navrhuje porovnávacie skúmanie rôznych matematických modelov, experimentálnych štúdií a numerických simulácií, ktoré sa používajú v literatúre.

2.6.2 ŠÍRENIE SA TEPLA V BUDOVÁCH

V tejto časti sa uvádzajú procesy šírenia sa tepla v budovách pre tri spôsoby: vedením, prúdením a sálaním.

ŠÍRENIE SA TEPLA VEDENÍM

Existujú tri základné formy procesov šírenia sa tepla. Prvou je vedenie, ktoré je definované ako prenos tepla cez medziprodukty, ktorý nezahŕňa pohyb látky (látka je nehybná). Obrázok 2.0.1 znázorňuje pevný blok (v tomto prípade stavebná stena) s jedným povrchom s vyššou teplotou a druhým s nižšou teplotou, tento typ šírenia sa tepla môže nastať v pevnom stave, keď jeho molekuly majú rozdielnu teplotu. Pri vedení sa energia prenáša vo vnútri a cez samotné teleso, na rozdiel od ostatných spôsobov prenosu tepla.



Obrázok 2.0.1: Prenos tepla vedením.

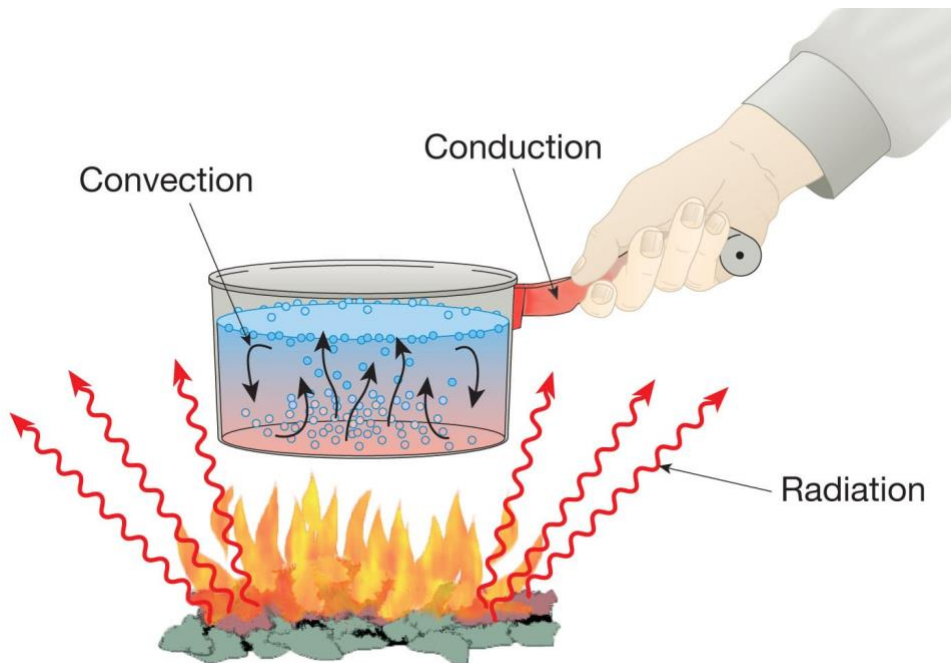
ŠÍRENIE SA TEPLA PRÚDENÍM

Šírenie tepla prúdiacou tekutinou (kvapalinou alebo plynom) alebo konvekciou je druhým typom spôsobu šírenia sa tepla. Pri konvekcii sa energia prenáša prostredníctvom hromadného prenosu nerovnomerne rozloženej teploty kvapaliny. Existujú dva typy konvekčného prenosu tepla, voľný a vynútený.

- Voľná konvekcia (alebo prirodzená konvekcia): Vzniká v dôsledku rozdielu teplôt kvapaliny, čo vedie k rozdielu hustoty, a tým k vztlakovej sile.
- Nútená konvekcia: K umelo vyvolanej konvekcii dochádza vtedy, keď je kvapalina nútená prúdiť cez povrch pomocou vonkajšieho zdroja, ako je napríklad ventilátor alebo čerpadlo.

ŠÍRENIE SA TEPLA SÁLANÍM

Pri šírení sa tepla žiarením sa energia môže prenášať priestorom bez existencie látky. Môže sa vyskytovať v priestore (vákuu) alebo v akomkoľvek priehľadnom prostredí (pevnom, kvapalnom a plynnom). Sálanie má zásadný význam pre telesá so sálavou teplotou, ako je napríklad slnko, kde sa energia prenáša elektromagnetickým žiarením. Napriek tomu všetky existujúce telesá vyžarujú energiu vo fotónoch, ktoré sa šíria náhodným smerom a majú náhodnú fázu a frekvenciu. Obrázok 2.0.2 znázorňuje všeobecné znázornenie troch spôsobov prenosu tepla.



Obrázok 2.0.2 Základné spôsoby šírenia sa tepla (vedenie, prúdenie a sálanie) (Dokumentácia SimWiki).

2.6.3 POZADIE TEPELNEJ IZOLÁCIE

Tepelná izolácia obvodových plášťov budov zohráva významnú úlohu pri úspore energie tým, že vytvára dodatočnú vrstvu s vysokým tepelným odporom medzi vnútorným a vonkajším prostredím. Hlavným cieľom je nájsť materiály s čo najvyšším tepelným odporom pri čo najnižších nákladoch. Použitím statických tepelnoizolačných materiálov sa znížia tepelné straty z fasád budov vznikajúce v dôsledku teplotného rozdielu medzi interiérom a exteriérom. Naproti tomu iným riešením je dynamická izolácia s premenlivým tepelným odporom. V praxi sú výhodnejšie materiály s väčšími hodnotami R (tepelný odpor) z dôvodu vyššej úrovne tepelnej izolácie. Dynamickú tepelnú izoláciu možno dosiahnuť tak, že sa do izolačnej vrstvy pridá tečúca kvapalina, ktorá dokáže zachytiť tepelné straty v celom obvodovom plášti budovy. Touto tekutinou môže byť buď voda, vzduch, alebo chladivo.

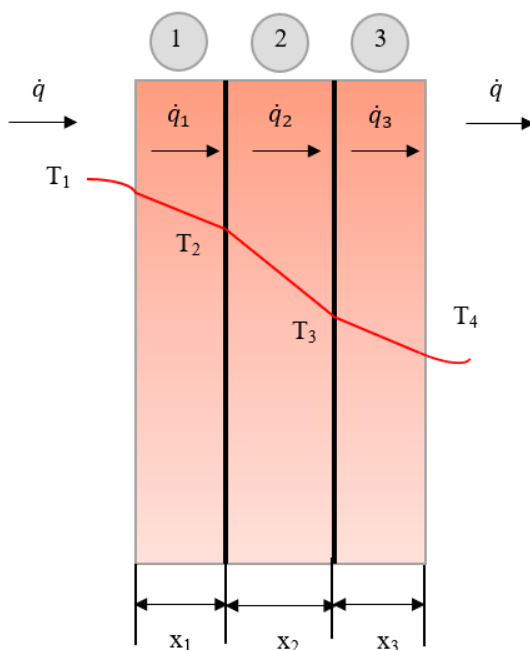
TEPELNÁ IZOLÁCIA V OBYTNÝCH BUDOVÁCH

Tepelnoizolačné materiály sa používajú na zníženie toku tepelnej energie cez zložené obvodové plášte budov (steny a strecha) vďaka ich vysokým hodnotám tepelného odporu R. Tepelnoizolačné materiály môžu byť vláknité, časticové, fóliové, plechové alebo kompozitné z chemicky alebo mechanicky viazaných materiálov. Izolačné materiály majú tieto funkcie:

1. Úsporu energie znížením miery tepelných strát alebo tepelných ziskov potrubí, kanálov, zariadení a stavebných konštrukcií.
2. Reguláciu povrchovej teploty stavebných konštrukcií a zariadení pre pohodlie a ochranu osôb.
3. Zabránenie kondenzácii vlhkosti na povrchu stavebných konštrukcií.
4. Zníženie teplotných výkyvov v klimatizovanom priestore pre osobné pohodlie.
5. Zabezpečenie požiarnej ochrany.
6. Zníženie úrovne hluku a vibrácií.
7. Zníženie rastu plesní.

ŠÍRENIE SA TEPLA CEZ STENU KOMPOZITNÝCH VRSTVIEV

Vo vrstvách kompozitných stien (alebo strechy) je dominantným spôsobom šírenia sa tepla vedenie, pretože energia horúcejšej molekuly sa prenáša na chladnejšiu molekulu. Steny budov sa zvyčajne stavajú z niekoľkých vrstiev, ako je znázornené na Obrázok 2.0.3, ktorý znázorňuje schematický diagram prechodu tepla v trojvrstvovej stene. Pri ustálených podmienkach je hodnota tepelného toku cez vrstvy steny rovnaká pre každú vrstvu.



Obrázok 2.0.3 Schéma šírenia sa tepla v kompozitnej stene.

$$\dot{q} = \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 \quad (0-1)$$

Fourier zistil, že tepelný tok vedením (\dot{q}/A) v danom smere je priamo úmerný rozdielu teplôt ΔT v smere tepelného toku a nepriamo úmerný vzdialenosti Δx v tom istom smere. Fourierov zákon je teda vyjadrený takto:

$$\frac{\dot{q}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (0-2)$$

Kde;

\dot{q} = rýchlosť šírenia sa tepla vedením [W]

A = plocha prestupu tepla [m²]

K = súčiniteľ tepelnej vodivosti materiálu [-]

dT = rozdiel teplôt [K]

dx = rozdiel vzdialeností (dĺžka úseku) [m]

Použitím rovnice (0-2) pre číslo úseku (1) v Obrázok 2.0.3 možno rovnicu prepísať takto:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_1 - T_2}{x1/k1} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond1}} \quad 0-3)$$

Kde: $R_{cond} = \frac{x}{k}$ je tepelný odpor pri šírení sa tepla vedením (statický tepelný odpor) v [m².K/W], ktorý je analogický tepelnému odporu elektrického obvodu, ako ukazuje nasledujúci obrázok:



Obrázok 2.0.4 Analógia statického tepelného odporu a elektrického odporu e

Okrem tepelného odporu pri šírení sa tepla vedením (pri prechode tepla) pre stenu z kompozitných vrstiev je vzduch v kontakte s vonkajším a vnútorným povrchom steny zo stagnujúcich tenkých vrstiev vzduchu prilahlých k týmto povrchom. Odpor každej strany je daný vzťahom $(1/h)$, kde h je súčiniteľ prestupu tepla vzduchovou vrstvou alebo konvekciou. Tepelný odpor každej vnútornej a vonkajšej vrstvy vzduchu závisí od geometrie steny, rýchlosti prúdenia vzduchu, smeru tepelného toku a typu konvekčného prenosu tepla (voľný alebo nútený). Preto použitím rovnice (0-2) pre celú stenu kompozitných vrstiev dostaneme nasledujúcu rovnicu:

$$\frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_i - T_o}{R_i + (R_1 + R_2 + R_3) + R_e} \quad (0-4)$$

Kde R_i a R_e sú vnútorný a vonkajší odpor príslušných tenkých vzduchových vrstiev pri prestupe tepla.

Celkový tepelný odpor pri prechode tepla zo vzduchu na jednej strane zloženej steny s počtom n vrstiev do vzduchu na druhej strane je daný takto:

$$R_{tot} = R_e + \sum_{j=1}^n (R_{cond})_j + R_i \quad (0-5)$$

Celkový súčiniteľ prechodu tepla steny alebo súčiniteľ prechodu tepla U v $[W/m^2.K]$ je definovaný takto:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (0-6)$$

Nakoniec sa rýchlosť prechodu tepla v stene kompozitných vrstiev vyjadrí takto:

$$\dot{q} = UA(T_i - T_o) \quad (0-7)$$

V poslednom čase sa vynakladá veľké úsilie na dosiahnutie budovy s takmer nulovou spotrebou energie (NZEB). V priebehu rokov predstavili inžinieri budov niekoľko nových riešení na zníženie spotreby energie budov vyladením prechodu tepla cez obal budovy. Jedným z týchto prístupov je regulácia celkového súčiniteľa prechodu tepla obalových konštrukcií budovy, čím sa zníži celkové U_{tot} (alebo sa zvýši celkový tepelný odpor R_{tot}). V nasledujúcich častiach sa skúmajú rôzne štruktúry tepelnej izolácie budov. Okrem toho klasifikuje pozadie dynamickej (aktívnej) izolácie, navrhuje porovnávacie skúmanie rôznych matematických modelov, experimentálnych štúdií a numerických simulácií používaných v literatúre.

2.6.4 TEPELNÁ IZOLÁCIA BUDOV

Použitím statických izolačných materiálov sa znížia tepelné straty z fasád budov v dôsledku teplotného rozdielu medzi interiérom a exteriérom. Naproti tomu iným riešením je dynamická izolácia s premenlivým tepelným odporom.

KONVENČNÁ (STATICKÁ) TEPELNÁ IZOLÁCIA

V súčasnosti je k dispozícii viacero statických izolačných materiálov, od tradičných/konvenčných až po vysokoúčinné tepelné izolácie, pričom posledne menované

vykazujú oveľa nižšie hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti. Pri výbere izolačného materiálu je cieľom získať najlepšie možné hodnoty tepelnej izolácie výberom vyššieho tepelného odporu. To zahŕňa použitie materiálov so zníženou tepelnou vodivosťou, aby sa dosiahol najnižší možný súčiniteľ prechodu tepla (hodnota U) na fasáde budovy. Tabuľka 0-1 ukazuje porovnanie tepelnej vodivosti niektorých z najmodernejších statických (vysokoučinných) tepelnoizolačných materiálov (Jelle, 2011).

Tabuľka 0-1 Porovnanie bežnej (statickej) a vysokoučinnnej tepelnej izolácie (Jelle, 2011)

	Materiál	Tepelná vodivosť [mW/(mK)]
Konvenčné	Celulóza	40-50
	Korok	
	Minerálna vlna	
	Expandovaný polystyrén (EPS)	30-40
	Extrudovaný polystyrén (XPS)	
	Polyuretán (PUR)	20-30
Najmodernejšie technológie (Vysoký výkon)	Aerogély	13-14
	Vákuové izolačné panely (VIP)	3-4
	Vákuové izolačné materiály (VIM)	
	Plynové izolačné materiály (GIM)	< 4
	Nanoizolačné materiály (NIM)	

Izolačná schopnosť budovy závisí od mnohých faktorov vrátane jej tepelnej zotrvačnosti, schopnosti pohlcovať vlhkosť a vzduchotesnosti, nielen od typu a hrúbky izolačného materiálu. (Bokalders a Block, 2010). V zime napríklad staticky vyššia úroveň izolácie pomôže znížiť tepelné straty budov, ale zároveň obmedzí tok tepla cez stenu, keď je to potenciálne cenné. Na druhej strane, v letných prípadoch je potrebné odvádzať teplo zhromaždené v priestoroch budovy v dôsledku vnútorného zaťaženia a solárnych ziskov cez okná počas dňa. Pri vysoko izolovaných budovách je pravdepodobnejšie, že sa vyskytnú výrazné problémy s prehrievaním, pretože vnútorná teplota rýchlejšie reaguje na slnečné a vnútorné zisky. Tradičný spôsob myslenia je taký, že vyššia konštantná hodnota R pre obvodový plášť vždy znižuje spotrebu energie a prevádzkové náklady na energiu. Niektoré nedávne štúdie však túto teóriu kritizovali, keď preukázali, že zvýšenie tepelného odporu nad určitú hranicu môže zvýšiť celkovú ročnú spotrebu energie. Preto je potrebné vyvinúť novú technológiu v oblasti izolácie budov, aby sa prekonal nevýhody používania tradičných statických izolačných materiálov a pokročilo sa k dosiahnutiu koncepcie budov s takmer nulovou spotrebou energie (NZEB).

DYNAMICKÁ IZOLÁCIA

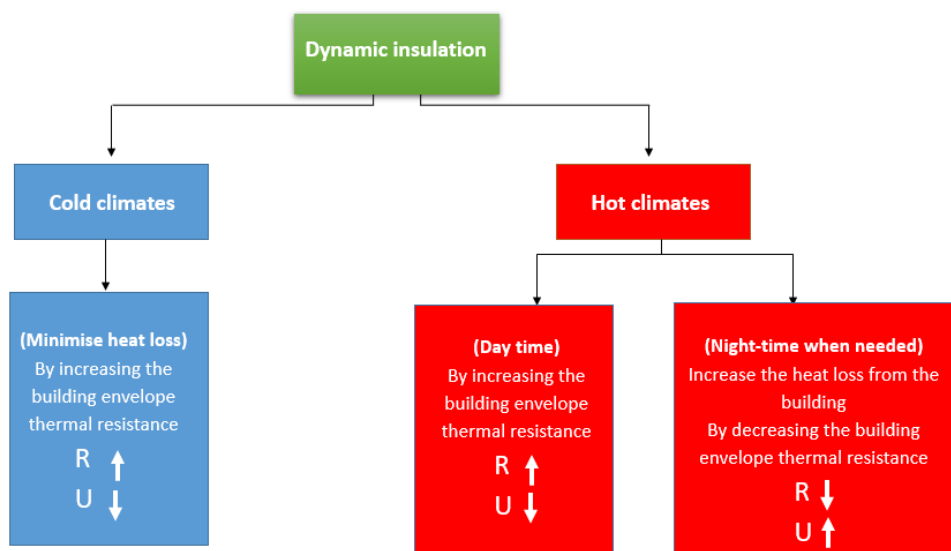
Dynamická izolácia (DI) alebo (aktívna izolácia) znamená schopnosť regulovať tepelný odpor obvodového plášťa "hodnotu R alebo U-hodnotu", čo umožňuje regulovať rýchlosť prestupu tepla v budove. Okrem toho možno DI integrovať do stavebnej konštrukcie stien a striech

ako výmenník tepla, a potom sa vetraný vonkajší vzduch môže v zime buď predhrievať, alebo v lete predchladzovať. V súlade s tým už nie sú straty prestupom tepla v obvodovom plášti konštantné.

Dynamická tepelná izolácia = Konvenčná tepelná izolácia + Dynamická tepelná výmena v obvodovom plášti

Hlavnou funkciou dynamickej izolácie je udržiavať vo vnútri vhodný teplotný rozsah, aby sa minimalizovala spotreba energie a s ňou spojené emisie oxidu uhličitého. Dynamickú izoláciu možno tiež realizovať vo väčšine klimatických podmienok, pretože rozdiel vnútorných a vonkajších teplôt na ňu nemá výrazný vplyv. Obrázok 2.0.5 znázorňuje dostupné stratégie využitia, t.j. to, ako je dynamická izolácia schopná fungovať. Napríklad v chladných klimatických podmienkach je cieľom minimalizovať tepelné straty z teplého interiéru do chladného exteriéru cez obvodový plášť budovy zvýšením tepelného odporu, "R-hodnoty" (resp. znížením súčiniteľa prechodu tepla, t.j. "U-hodnoty"). Na druhej strane v lete, keď je vonku veľmi teplo a vnútri chladno, je cieľom zvýšiť tepelný odpor, aby sa udržal požadovaný vnútorný stav. Okrem toho sa v niektorých budovách používajú pasívne stratégie vykurovania/chladienia, pri ktorých sa môže použiť dynamická izolácia i na zvýšenie tepelných strát v nočných hodinách znížením hodnoty R, resp. "zvýšením súčiniteľa prechodu tepla U". Na základe toho možno smer prúdenia vetraného vzduchu a tepelného toku klasifikovať do dvoch prevádzkových režimov dynamickej izolácie:

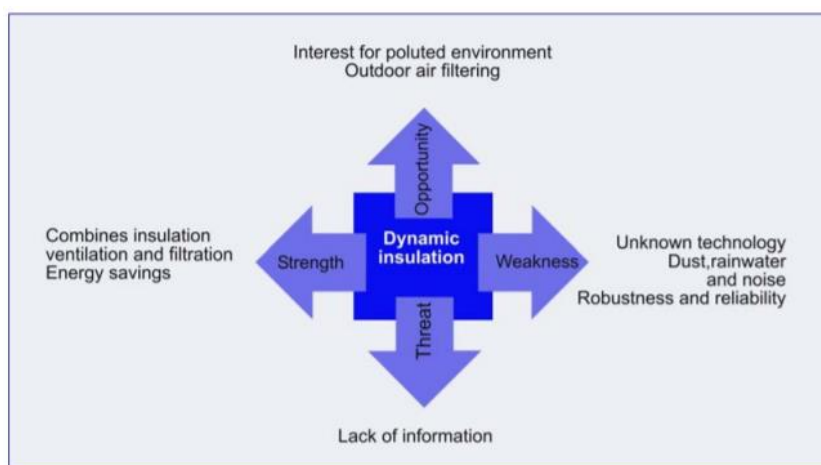
- Výmenník tepla Proflux, prúd vzduchu a tepelný tok sa pohybujú v rovnakých smeroch.
- Výmenník tepla Contraflux, prúd vzduchu a tepelný tok sa pohybujú v opačných smeroch.



Obrázok 2.0.5 Možné stratégie dynamickej izolácie v závislosti od klímy a účelu použitia.

Koncepcia DI bola prvýkrát vyvinutá v 60. rokoch 20. storočia v poľnohospodárskych budovách v Nórsku, ktoré využívali dynamicky izolované stropy, pričom sa zistilo, že bežný prívod vzduchu do stodoly, ťahaný prirodzeným komínovým vetraním, vymieňa teplo s uskladnenými materiálmi v senníku (Morrison a kol., 1992). V 80. rokoch 20. storočia však výskumníci začali skúmať fyziku dynamickej izolácie. Bartussek ako prvý použil túto myšlienku v domácej konfigurácii. S vhodným konštrukčným detailom sa dosiahla nulová hodnota U bez prievanu v dvoch nórskejších obytných stavbách, ktoré boli dynamicky izolované (Baker a Phd, 2003). Aj keď bola koncepcia dynamickej izolácie navrhnutá pred viac ako 30 rokmi, pre jej rôznorodé problémy a neistoty sa zatiaľ v projektovaní budov nevyužívala. Obrázok 2.0.6 zhŕňa analýzu silných a slabých stránok, príležitostí a hrozieb (SWOT analýza), ktoré má technológia dynamickej izolácie. Napriek úvahám a problémom spojeným s používaním tejto technológie v budovách má tieto výhody:

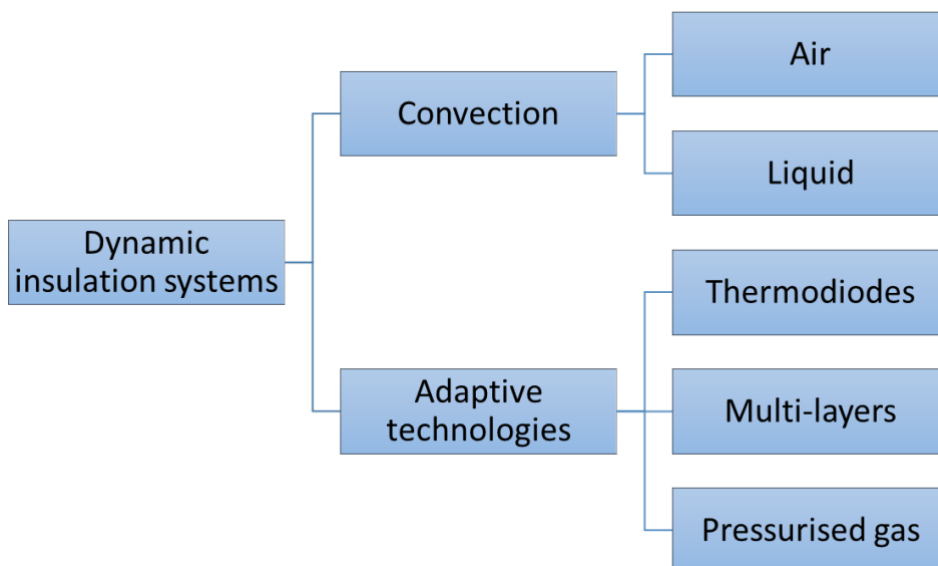
1. Systém môže fungovať ako výmenník tepla, t. j. vnútorné vetranie sa môže v zime predhrievať a v lete predchladzovať.
2. DI môže fungovať ako filter, ktorý dokáže zachytiť častice s priemerom menším ako 0,5 μm a väčším ako 5 μm (Taylor et al., 1998), čím sa zabezpečí lepšia kvalita vzduchu v interiéri.
3. Dynamická izolácia obmedzuje prestup vodných pár do vnútorného prostredia v protiprúdovom režime, čím znižuje nebezpečenstvo medzipriestorovej kondenzácie a tvorby plesní. (van der Aa et al., 2011).
4. Keďže tepelné straty cez stavebnú konštrukciu by boli pri použití DI oveľa menšie, predstavovalo by to lepšie riešenie ako použitie konvenčného pláštá budovy. Budú existovať ľahké, lacnejšie a tenšie steny a strechy (van der Aa et al., 2011).



Obrázok 2.0.6 SWOT analýza pre využívanie dynamickej izolácie (van der Aa et al., 2011).

DOSTUPNÉ APLIKÁCIE

Pre dynamickú izoláciu existuje niekoľko štruktúr rozdelených podľa typu kvapaliny a typu cirkulácie, ako znázorňuje Obrázok 2.0.7. Nasledujúca časť bude vychádzať z predchádzajúcich štúdií vykonaných podľa dostupnej literatúry.



Obrázok 2.0.7 Dostupné dynamické izolačné systémy na základe typu/cirkulácie kvapaliny.

(A) DYNAMICKÁ IZOLÁCIA KONVEKCIU

Základný princíp dynamickej izolácie spočíva v tom, že do statickej izolačnej vrstvy sa pridáva tečúca kvapalina. Pretekajúcou tekutinou môže byť najmä (vzduch), voda alebo chladivo. Jej cieľom je preto minimalizovať tepelné straty obvodového plášťa budovy tým, že umožňuje účinný predohrev vetracieho vzduchu a zachytenie tepelných strát cez obvodový plášť. Pre zjednodušenie sa v tejto kapitole DI spracúva na základe zimného obdobia, takže tepelné straty budú smerovať zvnútra von. V zimnom období bude dynamická izolácia:

- Znižovať tepelné straty cez stenu/strop,
- Súčasne dodávať do vnútorného priestoru predohriaty vzduch.

1) DYNAMICKÁ IZOLÁCIA POMOCOU VZDUCHU

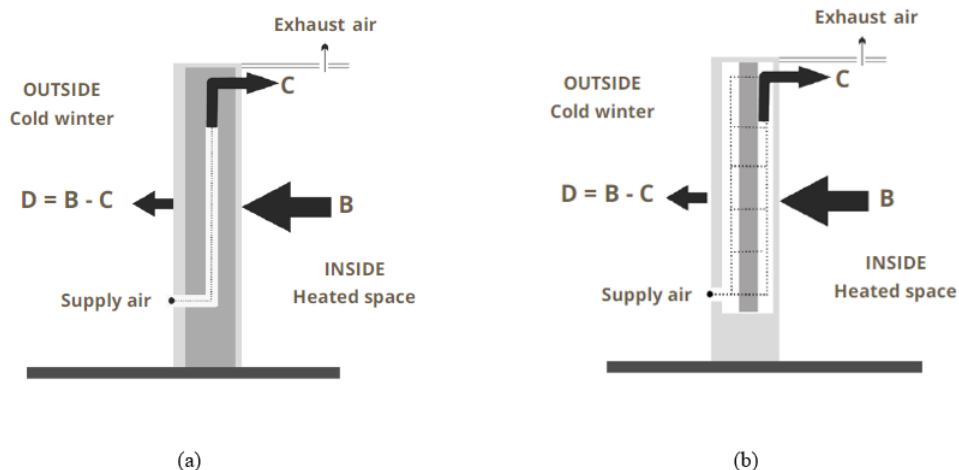
Považuje sa za najbežnejšie použitie dynamickej tepelnej izolácie. Keďže prúdiaci vzduch sa ohrieva alebo ochladzuje podľa prevádzkových podmienok, steny slúžia ako výmenník tepla

a tento jav zvyšuje energetickú hospodárnosť celého systému budovy. Variabilné hodnoty R sú dosiahnuteľné tým, že vonkajší vzduch preniká do dutín stien a následne cez kanály umiestnené v stenách do vnútorných priestorov. (Brunsell, 1994) definoval dynamickú izoláciu ako konštrukciu, pri ktorej sa vzduch pretláča cez izoláciu, zvyčajne z chladnejšieho vonkajšieho vzduchu, do vykurovanej budovy, aby sa dosiahla teoretická nulová hodnota U. V súčasnosti sú k dispozícii dve kategórie technológií dynamickej izolácie:

- Dutiny v stene na cirkuláciu vzduchu. V týchto dutinách je pohyb vzduchu zvyčajne rovnobežný so stenou, ktorá funguje ako výmenník tepla.
- Použitie „dýchajúcich“ stien, čo je konštrukcia stien prepúšťajúca vzduch, ktorá umožňuje prechod vzduchu. Vzájomné pôsobenie plynovej a pevnej fázy môže slúžiť aj ako výmenník tepla v protiprúdovom režime.

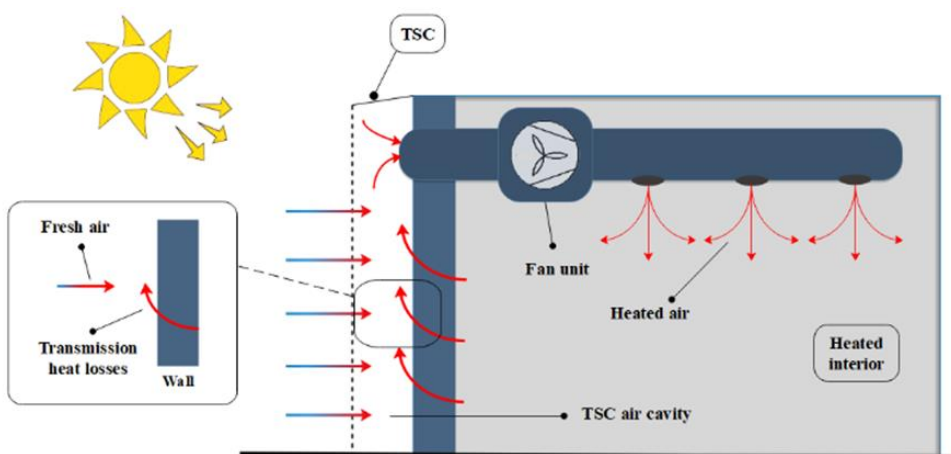
Prvá kategória sa často nazýva parietodynamická izolácia (prúdenie vzduchu prebieha rovnobežne s rovinou steny), pričom obrázok 2.6.8 (a) ukazuje, že použité materiály sú ideálne vzduchotesné a prechody môžu byť utesnené alebo odkryté. Druhá kategória sa nazýva permodynamická izolácia (prúdenie vzduchu prechádza kolmo na rovinu steny), čo znázorňuje obrázok 2.6.8 (b). V tomto type konfigurácia pozostáva z troch vrstiev: Vonkajšia vrstva, ktorá je vystavená vonkajšiemu okolitému vzduchu; „dýchajúca“ vrstva, ktorá pozostáva z porézneho materiálu, ktorý umožňuje prúdenie vzduchu do interiéru vďaka výslednému rozdielu tlakov (nízky pokles tlaku medzi interiérom a exteriérom); treťou vrstvou je vzduchová medzera medzi prvou a druhou vrstvou. „Dýchajúce“ steny sa skúmali ako prístup k distribuovanému systému prívodu vetracieho vzduchu, kde stena funguje ako zdroj prívodu, výmenník tepla a filter znečisťujúcich látok vo vzduchu (Imbabi, 2006).

Dôležitým príkladom parietodynamickej izolácie je integrácia solárnej energie a dynamických úspor izolácie pomocou transpiračného solárneho kolektora (TSC), ktorý sa považuje za jeden z najspoľahlivejších a nákladovo najefektívnejších systémov na solárne vykurovanie priestorov. Okrem primárnej povinnosti TSC predhrievať vetraný vzduch ho možno považovať aj za účinný nástroj na zabezpečenie dodatočnej aktívnej izolácie na fasáde budovy, kde bol nainštalovaný. Obrázok 2.0.9 znázorňuje princíp fungovania transpiračného slnečného kolektora a spôsob, akým by sa mohol považovať za aktívny izolačný systém (Fawaier a kol., 2021).



Obrázok 2.0.8 (a) Parietodynamická konštrukcia steny. (b) Permodynamická konštrukcia steny (Imbabi, 2012).

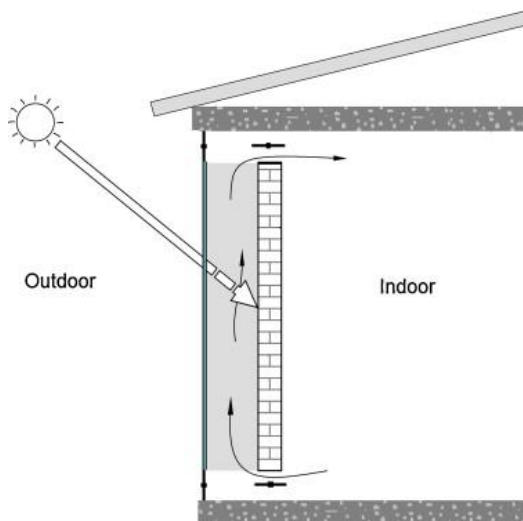
TSC by teda malo tri významné výhody, ktoré možno získať jeho použitím v budovách. Prvou je spoľahlivé riešenie na zabezpečenie vetrania (vykurovania/vykurovania) v budovách, druhú možno považovať za tepelnú bariéru, ktorá môže blokovať tepelné straty z vykurovaného interiéru do chladného okolia, a treťou je, že keď je TSC v prevádzkovom režime, vzduchotechnická jednotka bude schopná rekuperovať straty prenosového tepla vo vnútri vzduchovej dutiny TSC (tepelná bariéra v druhej výhode).



Obrázok 2.0.9: Princíp činnosti transpiračného snečného kolektora ako dynamického izolátora (Fawaier a kol., 2021).

Trombeho stena je ďalšou aplikáciou, kde vzduch cirkuluje v dôsledku nepriameho prenosu tepla spôsobeného slnkom. Preto bude existovať dynamická izolácia (Kisilewicz et al., 2019). Trombeho stenu (alebo solárnu stenu) pôvodne patentoval v roku 1881 Morse, ale popularizoval ju až Trombe, ktorý si podobný systém patentoval v roku 1972.

Obrázok 2.6.10 znázorňuje princíp fungovania Trombeho steny ako dodatočnej dynamickej izolácie. Mnohé štúdie skúmali Trombeho stenu ako dynamický izolant a ukázali ako znižuje tepelné straty a zlepšuje úroveň kvality vzduchu v interiéri (Shen et al., 2007) a (Claes a kol., 2010).



Obrázok 2.0.10: Dynamický izolačný účinok Trombeho steny je výsledkom pohybu vzduchu vo vzduchovej dutine fasády (Shen et al., 2007).

Späť k literatúre a k vývoju parietodynamických izolačných systémov. (Imbabi, 2012) predstavila novú konfiguráciu dynamickej izolácie prázdneho priestoru (VSDI), ktorá zabezpečuje účinnú obálku budovy a vyššiu kvalitu vnútorného vzduchu v tenkostenných konštrukciách. Základnou koncepciou je obmedzenie pohybu vzduchu v rámci spolupôsobiaceho prázdneho priestoru vymedzeného jednou alebo viacerými vrstvami izolačného materiálu a konštrukciou steny. Hypotéza štúdie mala simuláciu prúdenia pomocou programu Solidworks pre nízko nákladovú konvenčnú statickú izoláciu spojenú s účinným vetraním. Bola vykonaná aj ďalšia štúdia o konvekcii vzduchu DI (Ascione et al., 2015), v ktorej použili metódu konečných diferencií s využitím kódu MATLAB na skúmanie prechodových podmienok dynamickej izolácie v chladných ročných obdobiach. Energetická účinnosť dynamickej izolácie sa meria pomocou "dynamickej hodnoty U", ktorá sa mení pri prúdení vzduchu cez vzduchovú dutinu. (Pflug a kol., 2015) predstavili nový spôsob realizácie prepínateľnej hodnoty U prostredníctvom riadenia konvekcie vzduchu v uzavretom prvku. Simulačné znázornenie pomocou TRNSYS sa použilo na overenie experimentálnych výsledkov použitia tejto myšlienky pre chladiace obdobie. Prepínanie vodivo-izolačnej hodnoty U môže znížiť potrebu chladenia až o 29,6 %. V tejto kapitole Tabuľka 2.6-2 sumarizuje dostupnú literatúru o typoch dynamickej izolácie použitých v texte.

2) DYNAMICKÁ IZOLÁCIA POMOCOU KVAPALINY

Druhý, kvapalinový systém dynamickej izolácie sa realizuje pomocou kvapalín ako je voda alebo chladivo. Pri tomto type je vo vnútri konštrukcie vonkajšieho plášťa budovy umiestnený systém potrubí, v ktorom cirkuluje vykurovacie a chladiace médium v závislosti od požadovanej aplikácie. Skúmala sa aj nová konštrukcia steny budovy s použitím kapilárnej rúrkovej siete s termálnou vodou nízkej kvality. V tej súvislosti bol vyvinutý matematický model na vyhodnotenie použitia dynamického tepelného systému na troch miestach v stene. Výsledky ukázali menšie kolísanie vnútornej povrchovej teploty stien, keď je rúrkový systém umiestnený na vnútornej strane; vytvorí sa tým lepší vnútorný tepelný komfort.

(Kisilewicz et al., 2019) experimentálne skúmali rodinný dom v Nyíregyháze v Maďarsku. Steny budovy boli spojené so systémom potrubí, v ktorých cirkuloval glykol (chladivo). Spájané potrubie bolo napojené na zemný výmenník tepla umiestnený 1,75 m pod úrovňou terénu. Táto tepelná bariéra zlepšila tepelnú pohodu v lete aj v zime a v porovnaní s bežnými statickými izolačnými materiálmi znížila tepelné straty o 63 % (Obrázok 2.6.11). Ďalší inovatívny systém (Al-Nimr et al., 2009) navrhol dynamický izolačný systém pre obvodové plášte budov, ktorý je tiež založený na kvapalinách. Systém pozostáva z pohyblivej priečky medzi dvoma medzermi vyplnenými kvapalinami s rôznou vodivosťou a tepelnou rozťažnosťou. Obe kvapaliny sú napojené na riadiaci systém a malé nádrže. Reguláciou množstva oboch kvapalín na oboch stranách medzery je možné riadiť tepelný odpor celej stenovej konštrukcie.



Obrázok 2.0.11 (a) Pohľad na západnú fasádu budovy (b) Usporiadanie výmenníka tepla v stene prízemnia (Kisilewicz a kol., 2019).

(Figiel & Leciej-Pirczewska, 2020) skúmali energetickú hospodárnosť a emisie CO₂ v dôsledku použitia aktívnej tepelnej izolácie. V konštrukcii steny bola namontovaná aktívna stenová bariéra Thermo na báze vody, kde systémové rúrky zabezpečujú aktívnu tepelnú bariéru na prenos tepla medzi vonkajším a vykurovaným priestorom. Výskum sa realizoval na pozemku poľskej meteorologickej stanice v miernom podnebí pre rodinný dom.

Zvyšuje sa aj úsilie o integráciu dynamickej izolácie budov s materiálmi s fázovou zmenou (PCM). (Kishore et al., 2020) skúmali túto integráciu a ukázali účinok použitia tejto techniky pre rôzne klimatické podmienky. Výsledky ukázali 15-72 % zníženie ročných tepelných ziskov a 7-38 % úsporu tepelných strát.

(B) DYNAMICKÁ IZOLÁCIA ADAPTÍVNE IZOLAČNÉ TECHNOLOGIE

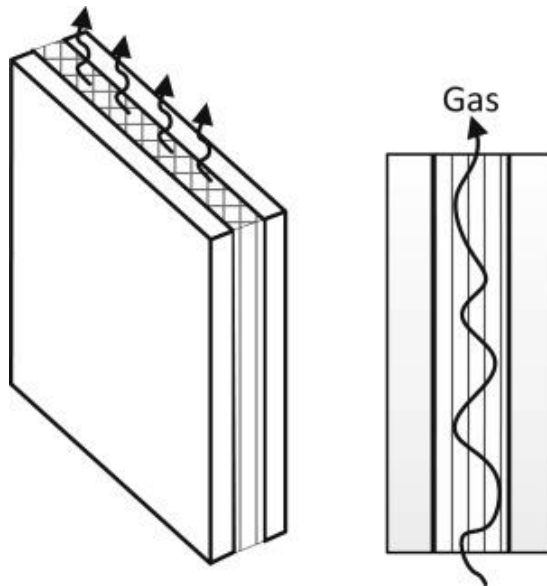
Napriek výhodám použitia dynamickej konvekčnej izolácie s prúdiacim vzduchom alebo kvapalinou má táto metóda niekoľko problémov. Tieto problémy súvisia so zložitou konštrukciou systému a mechanickými komponentmi potrebnými na cirkuláciu kvapaliny. V nasledujúcej časti sa skúmajú ďalšie možnosti, ktoré výskumníci DI urobili na integráciu tejto technológie do fasád budov.

1) POUŽÍVANIE TERMODIÓD

Prvá metóda využíva obojsmernú termodiódu, ktorá môže prenášať teplo v jednom smere a poskytovať izoláciu v druhom smere. Varga a kol. (Varga a kol., 2002) skúmali rôzne konštrukčné varianty obojsmernej termodiódy v podmienkach chladného obdobia. Výsledky ukázali, že zdanlivá vodivosť v závislosti od rozdielu teplôt bola trikrát až päťkrát vyššia v smere prenosu tepla. V tejto súvislosti Chun et al. (Chun et al., 2009) vo svojej štúdii navrhli sériu experimentov na skúmanie výkonnosti obojsmernej termodiódy a jej vplyvu pri použití rôznych pracovných kvapalín a prevádzkových podmienok. Výsledky ukázali, že tento systém by mohol preniesť až 40 % žiarenia absorbovaného z okolia do interiéru.

2) POUŽÍVANIE VIACVRSTVOVÝCH MATERIÁLOV

Ďalším mechanizmom je použitie viacvrstvovej izolácie, ktorá umožňuje prepínanie medzi vysokými a nízkymi hodnotami. R. Kimber a kol. (Kimber a kol., 2014) navrhli novú viacúčelovú izoláciu, pri ktorej sa v stene inštalujú tenké polymérové membrány, ktoré vytvárajú vzduchové vrstvy tak, aby sa vplyv prirodzenej konvekcie stal zanedbateľným. Článok sa zameria na izolačné aj vodivé konfigurácie typických podmienok. Na dosiahnutie nízkych hodnôt R sa odstráni vzduch a vrstvy sa stlačia, pričom zostane len šírenie sa tepla vedením cez polymérové membrány. V tejto súvislosti sa v publikácii venovanej problematike zaoberajú Park et al. (Park a kol., 2015) hodnotením vplyvu použitia dynamických izolačných materiálov na konečnú spotrebu energie na vykurovanie a chladenie. Analyzovali sa tri klimatické podmienky v USA pre jednozónovú obytnú budovu. Izolačným materiálom sú tuhé bunkové panely umiestnené v dutinách vonkajších stien budovy. Objemová tepelná difúznosť zostavy sa upravuje pridávaním inertných plynov s premenlivou vodivosťou (oxid uhličitý, dusík, hélium), čím sa ovplyvňuje rýchlosť prechodu tepla cez obvodový plášť budovy ako znázorňuje obrázok 2.6.12. Izolačné médiá sa môžu upravovať prostredníctvom riadiacich stratégií na základe denných, týždenných alebo sezónnych teplotných rozdielov medzi vnútorným a vonkajším prostredím.

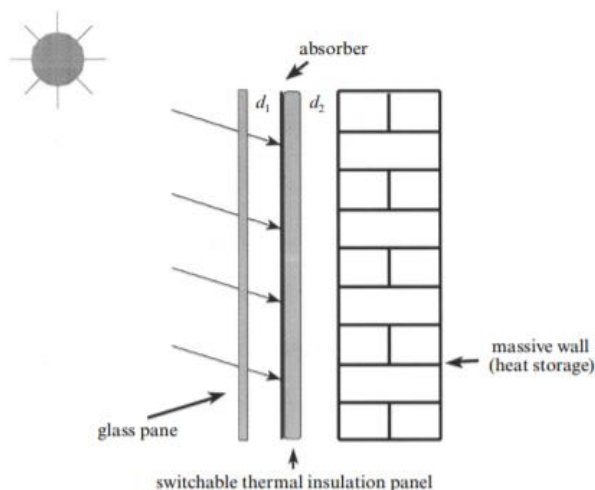


Obrázok 2.0.12 Princíp činnosti viacvrstvej dynamickej izolácie s použitím inertných plynov s premenlivou vodivosťou (Park a kol., 2015).

3) POUŽÍVANIE STLAČENÉHO PLYNU

Bolo implementovaných niekoľko prístupov k návrhu premenlivého odporu (dynamicčná hodnota U) pomocou tlaku plynu. Benson et al. (Benson et al., 1994) predstavili koncepciu vákuovej izolácie s premenlivou vodivosťou. Rozdielny tepelný odpor systému sa dosiahol elektronickým nastavením teploty malého kovového hydridu pripojeného k vákuovému obalu. Pozorovania z návrhu sa porovnali so zisteniami z laboratórnych experimentov so vzorkami v stolovej mierke. Pre tento vákuový izolačný systém s premenlivou vodivosťou boli navrhnuté aj niektoré potenciálne aplikácie v automobilovom priemysle. Reguláciou tlaku vzduchu Berge et al. (Berge et al., 2015) vyvinuli metódu na moduláciu tepelnej vodivosti vzduchu v nanopórovitej štruktúre dymového oxidu kremičitého vo vákuovom izolačnom paneli a aerogélovej prikrývke. Zistenia ukázali zmenu tepelnej vodivosti približne trikrát v prípade dymového oxidu kremičitého a menej ako dvakrát v prípade aerogélovej prikrývky pri tlaku v rozsahu od 1 do 100 kPa.

Počítačové simulácie solárneho ohrevu fasád budov vykonali Horn a kol. (Ronny a kol., 2000) pre prepínateľnú tepelnú izoláciu, ako znázorňuje obrázok 2.6.13. Metóda využíva hydrid kovu na reguláciu tlaku plynného vodíka vo vnútri panelu a tým zmenu tepelnej vodivosti približne o polovicu. Tabuľka 2.6-2 zhrňa prehľad dostupnej literatúry o dynamických izolačných systémoch.



Obrázok 2.0.13 Bočný pohľad na fasádu budovy vybavenú spínanou tepelnou izoláciou (Ronny a kol., 2000).

Tabuľka 2.0-2 Prehľad dostupnej literatúry o dynamických izolačných systémoch

Mechanizmus	Popis	Prístup	Odkaz
Konvekcia (vzduchu)	Predhriaty vzduch sa cez izoláciu pretláča z chladnejšieho vonkajšieho vzduchu do vykurovanej budovy.	Experimentálne merania v porovnaní s matematickým modelom	(Brunsell, 1994)
	Štúdia prestupu tepla pre dynamickú izoláciu obytnej steny.	Numerická analýza	(Morrison et al., 1992)
	Dynamická izolácia prázdneho priestoru (VSDI).	Simulácia prúdenia pomocou Solidworks	(Imbabi, 2012)
	Modulárny dýchací panel	1-D analytický model	(Imbabi, 2006)
	Vzduchovo priepustná budova, komponenty obálky s vetraním.	Numerická analýza (metóda konečných diferencií FDM) pomocou MATLABu	(Ascione et al., 2015)
Priesvitný obal dynamického izolačného systému s prepínateľnou izoláciou.	Experimentálne merania a simulačné znázornenie pomocou TRNSYS	(Pflug et al., 2015)	

Konvekcia (kvapalina)	Priame prepojenie medzi fasádnym prvkom a zemným výmenníkom tepla.	Experimentálne merania	(Kisilewicz et al., 2019)
	Sieť kapilárnych rúrok zabudovaných do aktívnej tuningovej steny budovy.	Matematický model a analýza MATLAB	(Niu & Yu, 2016)
	Pohyblivá priečka medzi dvoma medzerami vyplnenými kvapalinami s rôznymi tepelnými vlastnosťami.	Analytický model prenosu tepla	(Al-Nimr a kol., 2009)
	Termoaktívna bariéra na báze vody.	Experimentálne merania	(Figiel & Leciej-Pirczewska, 2020)
Adaptívne izolačné technológie			
Termodiódý	Obojsmerné termodiodové panely.	Experimentálne merania a analytický model prenosu tepla	(Varga a kol., 2002)
	Obojsmerná termodiódá.	Experimentálne merania	(Chun et al., 2009)
Viacvrstvé	Znižujúci sa počet vzduchových vrstiev.	Matematický model	(Kimber et al., 2014)
	Dynamické izolačné panely s regulovateľným tepelným odporom.	Simulačné zobrazenie	(Park et al., 2015)
Tlak plynu	Izolácia s premenlivou vodivosťou.	Experimentálne merania a matematický model	(Benson et al., 1994)
	Variabilný tlak na aerogélovú prikrývku.	Experimentálne merania a simulačné znázornenie	(Berge et al., 2015)
	Adsorpcia/deadsorpcia vodíka	Simulačné zobrazenie	(Horn et al., 2000)

2.6.5 ODKAZY

- Al-Nimr, M. A., Asfar, K. R., & Abbadi, T. T. (2009). Návrh inteligentného tepelnoizolačného systému. *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). Dynamická izolácia obvodového plášťa budovy: Numerické modelovanie v prechodových podmienkach a spojenie s nočným voľným chladením. *Applied Thermal Engineering*, 84, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.039>
- Baker, P. H., & Phd, B. (2003). Tepelné vlastnosti prototypu dynamicky izolovanej steny. *Building Serv. Eng. Res. Technol*, 24, 25-34. <https://doi.org/10.1191/0143624403bt057oa>
- Benson, D. K., Potter, T. F., & Tracy, C. E. (1994, 1. marec). Návrh vákuovej izolácie s premenlivou vodivosťou. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/940315>
- Berge, A., Hagentoft, C. E., Wahlgren, P., & Adl-Zarrabi, B. (2015). Vplyv z premenlivej hodnoty U v adaptívnych stavebných komponentoch s riadeným vnútorným tlakom vzduchu. *Energy Procedia*, 78, 376-381. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.677>
- Bokalders, V., & Block, Maria. (2010). *Príručka o celých budovách : ako navrhovať zdravé, efektívne a udržateľné budovy*. 689.
- Brunsell, J. T. (1994). Výkon dynamickej izolácie v dvoch obytných budovách. | AIVC (č. 15). Konferencia AIVC. <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). Vplyv pracovných kvapalín na výkonnosť dvojsmernej termodiódy na využitie slnečnej energie v budovách. *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). Budova s nulovou čistou hodnotou "Solar 2002": Zhodnotenie prvého príkladu. *Euregionálna konferencia SB10 Udržateľná výstavba*.
- Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2010/31/EÚ z 19. mája 2010 o energetickej hospodárnosti budov (prepracované znenie). (2010). *Úradný vestník Európskej únie*, 53, 13-35.
- Fawaier, M., Bokor, B., & Horváth, M. (2021). Hodnotenie rekuperácie tepelných strát steny transpiračných solárnych kolektorov pre rôzne klimatické podmienky: Európska

- prípadová štúdia. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 100836.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100836>
- Figiel, E., & Leciej-Pirczewska, D. (2020). Vonkajšia stena s tepelnou bariérou. Vplyv bariéry na tepelné straty a emisie CO₂. *Vedecká revue Engineering and Environmental Sciences*, 29(2), 223-233. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2020.29.2.19>
- Imbabi, M. S. E. (2006). Modulárne dýchacie panely pre energeticky efektívnu a zdravú výstavbu budov. *Renewable Energy*, 31(5), 729-738.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.009>
- Imbabi, M. S. E. (2012). Pasívno-aktívny dynamický izolačný systém pre všetky klimatické podmienky. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 247-258. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2013.03.002>
- Jelle, B. P. (2011). Tradičné, najmodernejšie a budúce tepelnoizolačné materiály a riešenia v stavebníctve - vlastnosti, požiadavky a možnosti. *Energia a budovy*, 43(10), 2549-2563. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.05.015>
- Kimber, M., Clark, W. W., & Schaefer, L. (2014). Koncepčná analýza a návrh delenej multifunkčnej inteligentnej izolácie. *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). Zvyšovanie energetickej hospodárnosti budov efektívnym využívaním materiálov s fázovou zmenou a dynamickej izolácie v stenách. *Applied Energy*, 283, 116306.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116306>
- Kisilewicz, T., Fedorcak-Cisak, M., & Barkanyi, T. (2019). Aktívna tepelná izolácia ako prvok obmedzujúci tepelné straty cez vonkajšie steny. *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 (Tepelné vlastnosti dynamickej steny obytného domu)*.
- Niu, F., & Yu, Y. (2016). Analýza umiestnenia a optimalizácie siete kapilárnych rúrok vložených do aktívnej tuningovej steny budovy. *Energy*, 97, 36-45.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.094>
- Park, B., Srubar, W. V., & Krarti, M. (2015). Analýza energetickej hospodárnosti obvodových plášťov s premenlivým tepelným odporom v obytných budovách. *Energy and Buildings*, 103, 317-325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.061>

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). Prehľad informácií o spotrebe energie v budovách. *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). Uzavreté priesvitné fasádne prvky s prepínateľnou hodnotou U - nová možnosť energetického manažmentu prostredníctvom fasády. *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). Prepínateľná tepelná izolácia: Výsledky počítačových simulácií pre optimalizáciu v stavebných aplikáciách. *High Temperatures -High Pressures*, 32, 669-675.
<https://doi.org/10.1068/htwu531>

Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L., & Huang, D. (2007). Numerická štúdia tepelného správania klasických alebo kompozitných Trombeho solárnych stien. *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). Obal budovy ako filter vzduchu. *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). *PROJEKTOVANIE S CITLIVÝMI STAVEBNÝMI PRVKAMI*. https://iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_44_RBE_Design_Guide.pdf

Varga, S., Oliveira, A. C., & Afonso, C. F. (2002). Charakterizácia tepelných diódových panelov na použitie v chladiacom období v budovách. *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)

Čo je prenos tepla? | SimWiki Documentation | SimScale. (n.d.). Získané 9. augusta 2021 z webovej stránky <https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>.

Financované Európskou úniou. Vyjadrené názory a postoje sú názormi a vyhláseniami autora(-ov) a nemusia nevyhnutne odrážať názory a stanoviská Európskej únie alebo Európskej výkonnej agentúry pre vzdelávanie a kultúru (EACEA). Európska únia ani EACEA za ne nepreberajú žiadnu zodpovednosť.

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

