



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**STUDIUM TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ
V KONSTRUKCI PASIVNÍCH DOMŮ**

STUDY OF THERMAL INSULATION MATERIALS IN THE CONSTRUCTION OF PASSIVE
HOUSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Hana Kornelová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Hana Kornelová
Název	Studium tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů
Vedoucí práce	Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. NAGY, Eugen, Nízkoenergetický a energeticky pasivní dům, Jaga group, 2009.
2. SMOLA, Josef, Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů, Grada, 2011.
3. HAZUCHA, Juraj, Konstrukční detaily pro pasivní a nulové domy: doporučení pro návrh a stavbu, Grada Publishing, 2016.
4. Van STRAATEN, J.F., Thermal Performance of Building. Elsevier Publ.Co., 1967.
5. HALAHYJA, Martin, CHMÚRNY, Ivan, STERNOVÁ, Zuzana, Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov, Jaga, 1998.
6. ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov
7. Tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce bude věnována problematice tepelně izolačních materiálů pro využití v konstrukcích pasivních domů. Důraz by měl být kladen na možnosti využití různých tepelně izolačních materiálů pro konstrukce stěn pasivních domů, se zaměřením na vlastnosti izolačních materiálů a jejich vhodnosti použití, včetně vlivu na tepelně izolační vlastnosti konstrukce. V teoretické práci by měly být formou rešerše shrnuty mechanické i tepelně izolační vlastnosti používaných izolantů a jejich vhodnost pro využití v konstrukci. Dále bude pozornost věnována možnostem kotvení izolačních materiálů v konstrukcích pasivních domů a zabudování izolačních materiálů v konstrukci. V tomto směru by měla být provedena rešerše o možných systémech kotvení s popisem principů jejich fungování a primárních vlastností. V rámci praktické části bude provedeno hodnocení vlastností používaných tepelně izolačních materiálů pro pasivní domy s ohledem na získané poznatky z tuzemské i zahraniční literatury. Dále budou v praktické části vyhodnoceny také možnosti kotvení izolačních materiálů. Pozornost bude také věnována zabudování izolačního materiálu s konstrukcí pasivního domu.

Pro vypracování bakalářské práce bude využita uvedená literatura, doplněná o vlastní zdroje. Rozsah práce cca 40 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V této práci jsou popsány mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných typů tepelných izolací a jejich vhodnost využití v konstrukcích pasivních domů. Další část práce je věnována možnostem kotvení izolačních materiálů. Cílem práce je porovnání vlastností tepelných izolantů a jejich kotvení s ohledem na energetickou náročnost pasivních domů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetická náročnost, pasivní dům, tepelně izolační materiály, kotevní prvky

ABSTRACT

This thesis describes mechanical and physical properties of selected types of isolations and the suitability of their use in passive house construction. Next part is focused on the possibilities of isolation materials anchoring. The aims of the thesis is to compare the properties of thermal insulants and their anchorages with regard to energy demands of passive houses.

KEYWORDS

Energy performance, passive house, thermal insulation materials, anchoring elements

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Hana Kornelová *Studium tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů*. Brno, 2020. 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Studium tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

Hana Kornelová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studium tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Hana Kornelová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D., za jeho ochotu, cenné rady, užitečné připomínky, čas a hlavně trpělivost při zpracování mé bakalářské práce.

A hlavně mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. CÍL PRÁCE.....	11
3. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1.1. Základní rozdělení budov z pohledu energetické náročnosti.....	13
1.2. Pasivní budova	15
1.2.1. Obecná definice pasivního domu.....	15
1.2.2. Požadavky na pasivní dům.....	15
1.2.3. Výhody pasivního domu	16
1.2.4. Nevýhody pasivního domu	16
1.2.5. Základní principy pasivního domu	17
1.3. Návrh pasivního domu.....	17
1.3.1. Umístění a orientace domu.....	18
1.3.2. Tvar domu.....	19
1.3.3. Tepelná a vzduchotěsná obálka domu.....	20
1.4. Konstrukce obvodových stěn pasivních domů.....	22
1.5. Tepelné izolace pasivních domů	24
1.5.1. Základní sledované charakteristiky	24
1.5.2. Druhy tepelných izolací	26
1.5.3. Tradiční tepelné izolace	27
1.5.3.1. Pěnový polystyren	27
1.5.3.2. Minerální vlna.....	32
1.5.3.3. Polyuretanová pěna	34
1.5.4. Moderní tepelné izolace.....	34
1.5.4.1. Vakuové izolační panely.....	34
1.5.5. Přírodní organické tepelné izolace.....	36
1.5.5.1. Celulóza	37
1.5.5.2. Sláma	38
1.6. Zateplování obvodových konstrukcí u pasivních domů.....	41
1.6.1. Vnější zateplovací systémy	41
1.6.2. Vnitřní zateplovací systémy.....	43
1.6.3. Sendvičové zdivo.....	44
1.7. KOTVENÍ KONTAKTNÍCH ZATEPLOVACÍCH SYSTÉMŮ.....	46
1.7.1. Kontaktní lepený systém	46
1.7.2. Kontaktní lepený systém s kotvami.....	46
1.7.2.1. Zatlučovací talířové hmoždinky	48

1.7.2.2. Šroubovací talířové hmoždinky	50
4. PRAKTICKÁ ČÁST	51
4.1. Tepelně izolační materiály	51
4.1.1. Porovnání z hlediska součinitele tepelné vodivosti	51
4.1.2. Porovnání z hlediska ceny	56
4.2. Mechanické kotvení izolačních materiálů	57
5. ZÁVĚR.....	60
6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY	63
7. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
8. SEZNAM TABULEK.....	70
9. SEZNAM ZKRATEK.....	70

1. ÚVOD

Žijeme v době, kdy vlivem rostoucího počtu obyvatel, zvyšující se životní úrovní nebo rozvoje průmyslu a zemědělství, roste světová spotřeba energie. Ta má za následek zvýšení produkce nejvýznamnějšího skleníkového plynu, oxidu uhličitého, který způsobuje vznik skleníkového efektu. Ten má neblahý vliv na změnu klimatu – globálního oteplování. Vzniká jednak přírodními procesy, ale v poslední době k jeho vzniku značně přispívá spalování uhlíkatých paliv, zejména fosilních, za účelem výroby energie. Významným producentem emisí je také průmysl a stavební průmysl je dominantní částí. Mezi emise, které vyčíslují nejrůznější studie, nepatří jen emise související s výrobou stavebních materiálů, ale také přidružené části, jako je například doprava, zpracování materiálů a v neposlední řadě jsou uvažovány také emise, které spočívají v provozování hotového stavebního díla.

Úspora energie se spolu s ochranou životního prostředí tedy řadí k největším výzvám této doby. Řada států si dala za cíl do roku 2030 snížit své emise oxidu uhličitého o několik desítek procent a plánují rozsáhlé změny směrem k čistější energii.

Jako slibný prostředek ke snížení spotřeby energie a tím k redukci uhlíkové stopy se dnes stávají budovy s nízkou spotřebou energie, které vychází z principu využívání pasivních tepelných zisků a snaží se maximalizovat energetické zisky v dílčích částech, které byly donedávna opomíjeny. Snahou je současně využít maximálně energii, která je do provozu stavebního díla vložena. Díky pokroku a technologiím, které se promítají nejen ve stavebním průmyslu, je koncepce a myšlenka v tomto směru zcela odlišná, než byly úvahy při výstavbě v nedávných letech. Především komplexní řešení přispívá k možnostem výstavby pasivních domů, a to nejen díky kvalitní izolaci a dalším nezbytným prvkům, ale především souhrnným řešením pro využití energetických příjmů s minimalizací ztrát.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce je studium tepelně izolačních materiálů, které jsou využívány anebo jsou vhodné pro využití do konstrukcí pasivních domů. Konkrétně bude práce věnována obecnému popisu standardů pasivních domů, požadavků a principů, které jsou spjaty s pasivním domem se zaměřením využití tepelně izolačních materiálů. Součástí popisu pasivního domu budou také výhody a nevýhody těchto typů budov. Pozornost bude dále věnována vybraným tepelně izolačním materiálům, které jsou vhodné anebo se využívají v konstrukcích pasivních domů a budou popsány jejich tepelně izolační a mechanické vlastnosti. V souvislosti s popisem izolačních materiálů budou zmíněny i skladby konstrukcí, kde jsou tepelně izolační materiály zabudovány včetně skladby zateplení obvodových konstrukcí pro pasivní domy. Se zateplením konstrukcí souvisí také kotvení tepelně izolačních materiálů, proto budou popsány také systémy kotvení těchto materiálů. V praktické části budou porovnány tepelně izolační materiály z pohledu tepelně izolačních vlastností a porovnána bude také ekonomická náročnost těchto izolačních materiálů. Dále bude v praktické části navázáno na teoretické poznatky v oblasti kotvení tepelně izolačních materiálů v konstrukci.

3. TEORETICKÁ ČÁST

Aktuální směr ve stavebním průmyslu počítá v rámci udržitelnosti a rozvoje ve výstavbě se snižováním energetické náročnosti, protože stavební průmysl patří mezi tři největší oblasti, které zásadně ovlivňují životní prostředí. Obecně je snahou vytvářet vyšší hodnoty při využití menšího objemu zdrojů, a tím minimalizovat dopad na životní prostředí. Stavební průmysl je tedy jednou z oblastí, kde je třeba určit velké změny, které by měly mít za následek především snížení spotřeby energie, snížení emise skleníkových plynů a také snížení spotřeby vody.

Podle Evropské komise spotřebovávají obytné domy 40 % celkové energie v rámci Evropské unie a jsou tak značným zdrojem emisí. Vzhledem k tomu, že se tento sektor rozrůstá, lze předpokládat zvyšování spotřeby energie a nebylo by možné dodržet závazky Kjótského protokolu. V návaznosti na požadavky o snížení energetické potřeby vstoupila od začátku roku 2020 v platnost Směrnice o energetické náročnosti budov z roku 2010, která s sebou přinesla změny ve stavebním zákoně. Směrnice ve zkratce říká, že rodinné domy postavené od začátku roku 2020 musí mít o pětinu nižší spotřebu energie než ty již stojící. Měly by tak splnit požadavky na maximální spotřebu energie na vytápění pro pasivní nebo nízkoenergetické domy, které uvádí norma ČSN 73 0540 - 2. Samotné požadavky, jsou definovány ve vyhlášce č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov. Splnění všech požadavků si vyžádá úpravu konstrukcí či vhodně zvolených materiálů, například silnější vrstvu zateplení nebo progresivní technologie a materiály, což bude mít za následek vyšší pořizovací cenu stavby [1-4].

Energetická náročnost budovy vyjadřuje množství energie, které je nezbytné k pokrytí potřeby energie spojené s užíváním budovy – to zahrnuje teplo na vytápění, chlazení, větrání, vlhkost vzduchu, ohřev vody, ale i osvětlení. Energetická náročnost budovy je nově podchycena v zákoně o hospodaření s energií č. 3/2020 Sb. [5].

K podání informací o energetické náročnosti budovy slouží tzv. průkaz energetické náročnosti budovy (dále jen „PENB“), který je součástí energetického posudku budovy. Energetický posudek je rozbořením budovy z hlediska hospodaření s energiemi. PENB udává energetickou náročnost stanovenou výpočtem ze všech energií, které do budovy vstupují. Zároveň jsou započítány i energie potřebné pro zařízení, která tyto procesy zajišťují (topná zařízení, tepelná čerpadla, zařízení klimatizační, větrací, vzduchotechnické jednotky atd.). Celkové množství roční dodané energie je děleno celkovou podlahovou plochou budovy a výsledkem je měrná roční spotřeba energie na metr čtvereční – vyjádřená v kWh/m² za rok.

Podle získaných výsledných hodnot je budova zařazena do odpovídající třídy energetické náročnosti, jak je uvedeno v tabulce č. 1, kde je možno vidět všech sedm tříd energetické náročnosti, které jsou členěny v závislosti na druhu budovy.

Druh budovy	Třída energetické náročnosti budovy spotřeba energie v kWh/rok						
	A	B	C	D	E	F	G
	Mimořádně úsporná	Úsporná	Vyhovující	Nevyhovující	Nehospodárná	Velmi nehospodárná	Mimořádně nehospodárná
Rodinný dům	< 51	51-97	98-142	143-191	192-240	241-286	> 286
Bytový dům	< 43	43-82	83-120	121-162	163-205	206-245	> 245
Hotel a restaurace	< 102	102-200	201-294	295-389	390-488	489-590	> 590
Administrativní	< 62	62-123	124-179	180-236	237-293	294-345	> 345
Nemocnice	< 109	109-210	211-310	311-415	416-520	521-625	> 625
Vzdělávací zařízení	< 47	47-89	90-130	131-174	175-220	221-265	> 265
Sportovní zařízení	< 53	53-102	103-145	146-194	195-245	246-297	> 297
Obchodní	< 67	67-121	122-183	184-241	242-300	301-362	> 362

Tabulka 1: Klasifikační třídy hodnocení energetické náročnosti budovy, měrné spotřeby energie udávány v kWh/(m².rok) [3]

Na energetickém štítku rodinného domu by měla být od roku 2020 třída energetické náročnosti budovy minimálně B. Uvádí se, že rodinné domy postavené před rokem 1990 mají průměrnou spotřebu energie okolo 269 kWh/m² za rok, přičemž aktuálně se domy pohybují v rozmezí 30–70 kWh/m². Pasivní dům se musí vejít do 15 kWh/m² za rok [3, 6].

1.1. Základní rozdělení budov z pohledu energetické náročnosti

Z pohledu energetické náročnosti se v dnešní době budovy dělí do pěti základních typů. Jde o standardní, nízkoenergetickou, pasivní, nulovou a aktivní budovu.

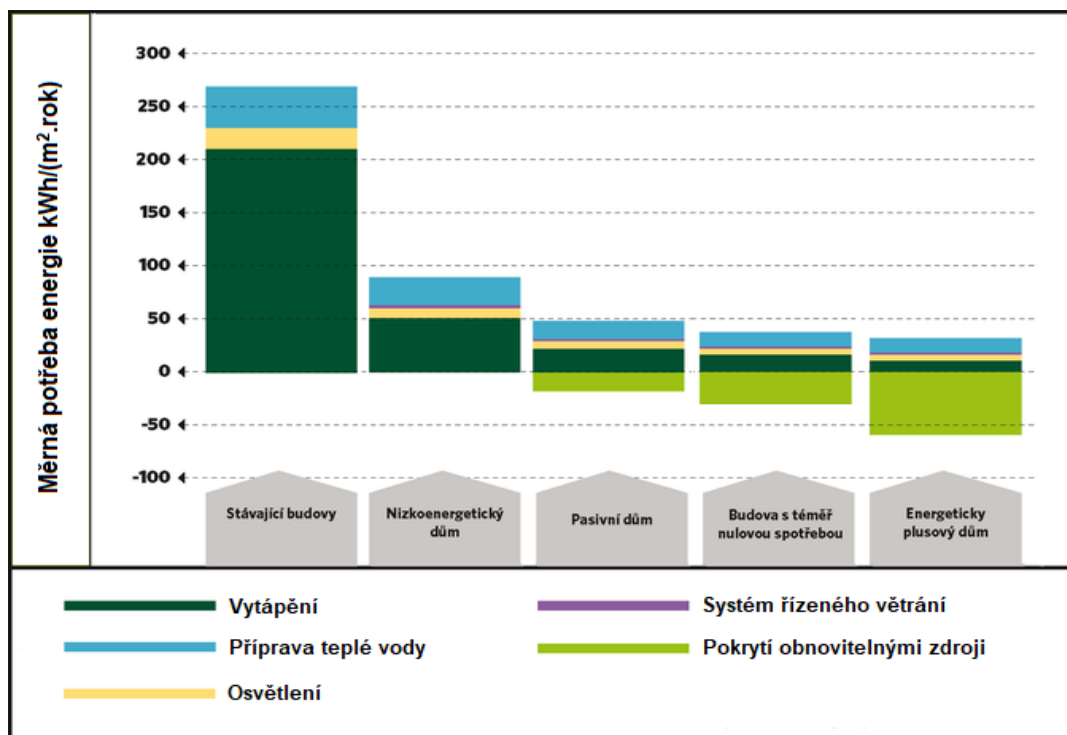
Nejvíce energeticky náročným typem je budova standardní. Typické jsou pro ni nízké náklady při výstavbě, topení pomocí zastaralé otopné soustavy, která je zároveň velkým zdrojem emisí a větrání je zajištěno pouze otevíráním netěsnících oken. Budova je nezateplená a špatně izolovaná, což má za následek vysokou roční plošnou spotřebu energie na vytápění, o hodnotě až 210 kWh/(m².rok). U nízkoenergetické budovy se roční plošná spotřeba energie na vytápění musí dostat pod 50 kWh/(m².rok), aby této hodnoty budova dosáhla, musí být postavena podle kritérií zaměřených na minimalizaci energetických ztrát při provozu budovy. K tomu napomáhá řízené strojní větrání, zateplení konstrukce, otopná soustava o nižším výkonu a využívání obnovitelných zdrojů energie. Přísnějším typem nízkoenergetické budovy, s roční plošnou spotřebou energie na vytápění do 15 kWh/(m².rok), je pasivní budova.

Tato budova je navržena bez jakéhokoliv klasického systému vytápění nebo chlazení, ale zároveň zajišťuje pohodlné vnitřní klima během celého roku, a to díky řízenému strojnímu větrání a s maximálním využitím obnovitelných zdrojů energie [7-9].

Pod hodnotu 5 kWh(m².rok) musí mít roční spotřebu energie na vytápění budova nulová. U těchto budov je celková roční spotřeba energie stejná, nebo dokonce menší než energie přijatá z obnovitelných zdrojů, a to díky velmi nízké energetické náročnosti budovy – využitím velkého množství fotovoltaických panelů. Obecně jsou parametry nulových budov minimálně na úrovni pasivních domů [10, 11].

Nejméně energeticky náročným typem je budova aktivní, neboli plusová, která na svůj provoz nevyužívá žádnou energii získanou z fosilních paliv nebo jaderné energie. Z obnovitelných zdrojů dokáže vyrobit tolik energie, kolik sama spotřebuje, případně o něco víc. Přebytky pak ukládá pro pozdější využití. Příkladem jsou fotovoltaické panely umístěné na střeše a fasádě domu, které energii vyrábí bez emisí CO₂, a tedy bez negativního vlivu na životní prostředí [12].

Porovnání jednotlivých typů budov z ohledu energetické náročnosti je znázorněno na obrázku č. 1, kde je vidět měrná potřeba energie pro jednotlivé typy budov, kterých jak bylo zmíněno výše, je pět. Z obrázku je patrné, že energie potřebná na vytápění klesá od standardní budovy po pasivní dům až o 93 %. Spolu s ní díky úspornějším elektro spotřebičům klesá i spotřeba energie na ohřev teplé vody a osvětlení.



Obrázek 1: Porovnání energetické náročnosti jednotlivých budov [13]

1.2. Pasivní budova

Pasivní budova neboli pasivní dům, jako jeden z mála typů budov, je celkem jasně a jednoznačně definován a je tedy známo, co si pod takovým domem či stavbou představit. Zároveň lze s celkem vysokou mírou přesnosti říct, kdy se s ohledem na danou ekonomickou situaci investice do výstavby pasivního domu vrátí. Myšlenkou pasivního domu je minimalizovat spotřebu energie a zároveň zajistit kvalitní vnitřní prostředí [14, 15].

1.2.1. Obecná definice pasivního domu

Název „pasivní dům“ vychází z principu využívání pasivních tepelných zisků v budově. Jedná se o vnitřní zisky z tepla vyzařovaného lidmi a spotřebiči, vnější zisky ze slunečního záření procházejícího okny. Roční spotřeba tepla by měla být menší než $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$ [16].

Dalším charakteristickým znakem by měl být vysoký stupeň zateplení, který s sebou přináší výbornou tepelnou pohodu, vzduchotěsná obálka budovy, bez tepelných mostů a díky nepřetržitému větracímu systému se zpětným získáváním odpadního tepla, jenž neustále zajišťuje čistý čerstvý vzduch v celém domě, by měly zůstat konstrukce budov suché a bez poruch [17-20].

1.2.2. Požadavky na pasivní dům

Požadavky na pasivní dům musí splňovat specifické nároky a pro jejich ověření a potvrzení, že se jedná o dům či budovu splňující standardy pro pasivní dům, může být vydán certifikát, který potvrzuje, že se skutečně jedná o pasivní dům. Na mezinárodní úrovni má velkou důležitost certifikát Passivhaus Institutu (PHI) v Darmstadtu. V případě PHI se nejedná jen o legislativní rámec, ale kromě projektové dokumentace jsou dokládány také certifikáty materiálů, kompletní fotodokumentace o provádění stavby atd.

Požadavky, které musí splňovat dům, aby bylo možné jej označovat jako pasivní.

- měrná roční potřeba tepla na vytápění je maximálně $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,
- celková potřeba primární energie spojená s provozem budovy včetně domácích spotřebičů je nižší než $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Primární energie vyjadřuje množství energie spotřebované při výrobě určitého zdroje i se ztrátami při distribuci, a tudíž nám dává komplexnější pohled na spotřebu dle zvoleného zdroje. Použijeme-li jako zdroj například elektřinu, musíme díky neefektivní výrobě při výpočtu primární energie vynásobit výsledek třemi. V konečném důsledku to vyjadřuje i výši provozních nákladů ve vztahu k použitému zdroji energie,

- neprůvzdušnost obálky budovy n_{50} je ověřována tlakovou zkouškou a nesmí překročit hodnotu 0,6/hod, což znamená, že při přetlaku nebo podtlaku 50 Pa se nesmí za hodinu vyměnit netěsnostmi v obálce více než 60 % vnitřního objemu vzduchu [19, 21, 22].

1.2.3. Výhody pasivního domu

Pasivní dům se díky využívání pasivních tepelných zisků vytopí téměř sám. Obejde se tedy bez klasické topné soustavy, která bývá ve většině případech velký zdroj emisí CO₂ a její údržba a provoz stojí nemalé peníze. Stačí pouze malý zdroj tepla, který pokryje zbytkovou potřebu tepla. Pasivní dům spotřebuje zhruba desetkrát méně tepla na vytápění ve srovnání s běžnou stavbou, což je méně než 15 kWh/(m²·rok). Neodmyslitelnou součástí pasivního domu je větrací systém se zpětným získáváním odpadního tepla. Systém tedy neustále zajišťuje přívod čistého a čerstvého vzduchu a společně s vysokým stupněm zateplení přináší do domu výbornou tepelnou pohodu a příjemné teploty v zimě i v létě. Díky vzduchotěsné obálce budovy bez tepelných mostů a nepřetržitým větráním, zůstávají konstrukce suché a bezporuchové a zajišťují vysoký komfort bydlení [17].

1.2.4. Nevýhody pasivního domu

Kvůli povolené nízké spotřebě tepla na vytápění, musí být u pasivní budovy zajištěna vynikající tepelná izolace a vzduchotěsnost. To s sebou nese pořízení kvalitnějších, a tím pádem také finančně náročnějších stavebních prvků. Což má za důsledek zvýšení pořizovacích nákladů na výstavbu, a to cca o čtvrtinu. Důraz je kladen hlavně na kvalitní zpracování oken z pohledu netěsnosti a tepelné izolace, především na tepelnou izolaci celé budovy. Tyto dva prvky jsou základním předpokladem pro dokonalé zajištění požadovaných tepelně izolačních vlastností.

Aby nedošlo ke vzniku tepelných mostů, kondenzaci vlhkosti a následného výskytu plísní, znehodnocení konstrukce a úniku tepla, jsou kladeny vyšší nároky na provedení jednotlivých detailů. Zpracování detailů bývá častým problémem vzniku stavebních vad, a to nejen u pasivních domů, kde je správné zpracování detailů konstrukce velmi důležité. Z architektonického hlediska je nevýhodou zpravidla malá tvarová variabilita, která při návrhu pasivního domu silně omezuje výstavbu komplikovaných tvarů s různými výčnělky, atypickými doplňky či estetickými konstrukčními prvky [17].

1.2.5. Základní principy pasivního domu

Koncepce pasivního domu je v podstatě velmi jednoduchá. Jde o maximální zamezení úniku tepla, tj. tepelným ztrátám směrem do exteriéru, které se blíží téměř nule a přitom co nejefektivněji využít tepelné zisky, které jsou k dispozici. Tím lze dosáhnout výrazného snížení výkonu zdroje tepla, objemu technologií i celkové závislosti objektu na dodávkách energie. Jednoduše řečeno, malé tepelné ztráty pasivního domu lze pokrýt prakticky čímkoliv.

Koncept pasivního domu je založen na následujících dvou principech:

- optimalizace základních prvků, mezi které patří tvar budovy, orientace vzhledem ke světovým stranám, obvodové stěny a výplně otvorů.
- minimalizace tepelných ztrát, které máme dvojího druhu - ztráty prostupem a ztráty ventilací. Ztráty prostupem lze redukovat kvalitnější izolací obvodových stěn a výplní otvorů. Ztráty ventilací se redukují vzduchotěsným uzavřením budovy. Následně lze využívat tepelných zisků ze slunečního záření procházejícího okny a zisků interních – emise tepla lidmi a spotřebiči [23, 24].

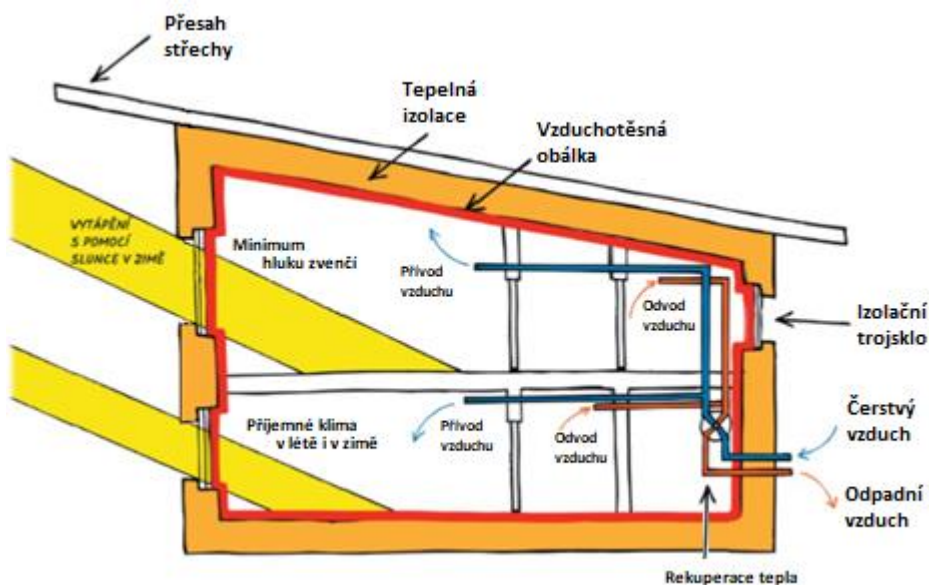
1.3. Návrh pasivního domu

Ve fázi návrhu lze dosáhnout nejvíce úspor za nejnižší náklady. Nedodržení základních zásad návrhu, zejména jako je kompaktní tvar, orientace ke světovým stranám či prosklení, může snadno zmařit snahu o dosažení pasivního domu. V některých případech lze kompenzovat malé porušení těchto zásad navýšením kvality ostatních prvků, to se však negativně projeví na ceně stavby.

Návrh pasivního domu je ovlivňován:

- kompaktním tvarem budovy, jde o dosažení co nejnižšího poměru ochlazovaných ploch konstrukcí k objemu budovy,
- umístěním budovy na pozemku, kdy je upřednostňována řadová a bloková výstavba (možnost společně využívat i některá technická zařízení či zdroje tepla),
- kvalitní izolační obálkou budovy,
- jižní orientací budovy, pokud je možná, kdy největší plocha oken směřuje na jih,
- solárními zisky,
- řízeným větráním s rekuperací tepla s použitím přiměřeného doplňkového zdroje tepla,
- letním stíněním proti přehřívání,
- správnou vnitřní dispozicí s ohledem na světové strany [17, 21].

Základní principy fungování pasivního domu, které lze uvažovat, jsou schematicky znázorněny na obrázku č. 2. Jedná se o základní úvahy při návrhu pasivního domu. Jak můžeme vidět, důraz je kladen na tepelnou izolaci, vzduchotěsnou obálku, přesah střechy nebo na výměnu vzduchu v objektu.



Obrázek 2: Schématické znázornění principů fungování pasivního domu [14]

1.3.1. Umístění a orientace domu

K nejdůležitějším a nejčastěji studovaným parametrům, které ovlivňují návrh pasivní budovy, je orientace. Cílem je správné situování a orientace pasivního domu na pozemku, a to především k běžným klimatickým podmínkám, které v daném místě panují. Na každou stavbu působí vnější klimatické vlivy, jako například slunce, vítr, déšť, vlhkost a teplota vzduchu. Tyto parametry je nutné zohlednit.

Správnou volbou pozemku se mohou tyto vlivy potlačit. Ideální pozemek pro stavbu pasivního domu má ze severní strany přístup na obslužnou komunikaci, tak aby z jihu zbylo dostatek prostoru jak pro zahradu a zeleň, ale rovněž pro volný a ničím nestíněný prostor umožňující solární zisky prosklených ploch účelově orientovaných na jih, případně jihozápad nebo jihovýchod. Obecně platí, že jižní orientace je optimální pro získání tepla v zimě a pro řízení slunečního záření v létě. Zohledňuje se tak i atraktivnost výhledového pole z hlavních obytných místností [9, 22, 25-28].

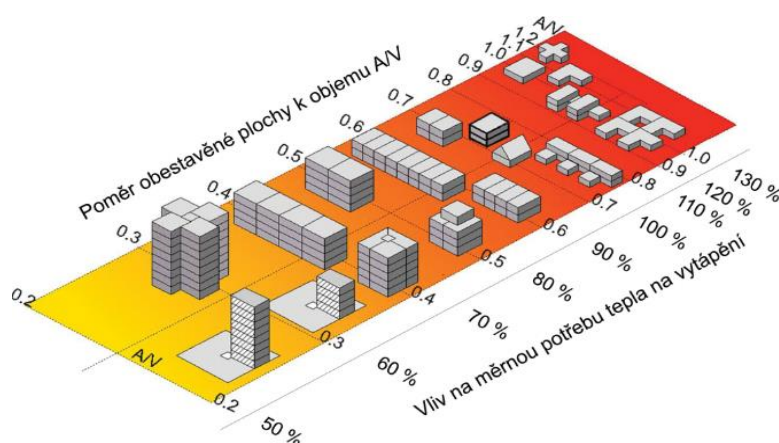
Z optimální orientace budovy plyne několik výhod. Nespornými výhodami může být například: snížení použití složitých pasivních systémů a spotřeby energie, zvýšení množství denního světla a díky tomu snížení energetické náročnosti na umělé světlo. Zvýšení výkonu solárních kolektorů [27].

1.3.2. Tvar domu

Ideálně navržený tvar pasivního domku by měl být kompaktní, málo členitý. Tvar budovy ovlivňuje množství přijaté sluneční energie a s tím spojenou celkovou spotřebu energie. U správně navržené budovy by měl být poměr mezi jejím vnějším povrchem a celkovým objemem (poměr A/V), co nejmenší, s minimem zlomů. Z tohoto hlediska je nejideálnějším tvarem pro pasivní dům koule, případně polokoule. Ve většině projektů není tento ideální tvar však dosažitelný, problémem je samotná konstrukce a místy i design. Proto jsou při návrhu pasivního domu používány jiné tvary, nejčastěji tvar krychle či kvádrů. Méně vhodné, ale zároveň možné jsou půdorysy ve tvaru L nebo I. Z důvodu prostupu tepla obvodovými stěnami, je snaha o omezení volně stojících domů a upřednostňování řadové a blokové výstavby.

Celková plocha fasády a střechy, která přijímá sluneční záření, ovlivňuje společně s tvarem budovy vnější povrch. Vnější povrch budovy je spjat s velikostí energetických ztrát. Vhodným typem střechy z hlediska tvaru je střecha pultová s mírným sklonem, na kterou je možné osadit solární panely, nebo střecha plochá pokrytá vegetačním krytem [25, 28, 29].

Na obrázku č. 3 je ve spodní části znázorněn vliv tvaru objektu na potřebu tepla na vytápění, kde je porovnána velikost ochlazovaných ploch při stejném objemu stavby. V horní části je ukázáno, že seskupené objekty jako je řadová zástavba nebo bytové domy dosahují pasivního standardu snadněji než samostatně stojící objekty. Jak je z obrázku patrné, již s vhodně zvoleným tvarem budovy je zásadně ovlivněna měrná spotřeba tepla na vytápění.

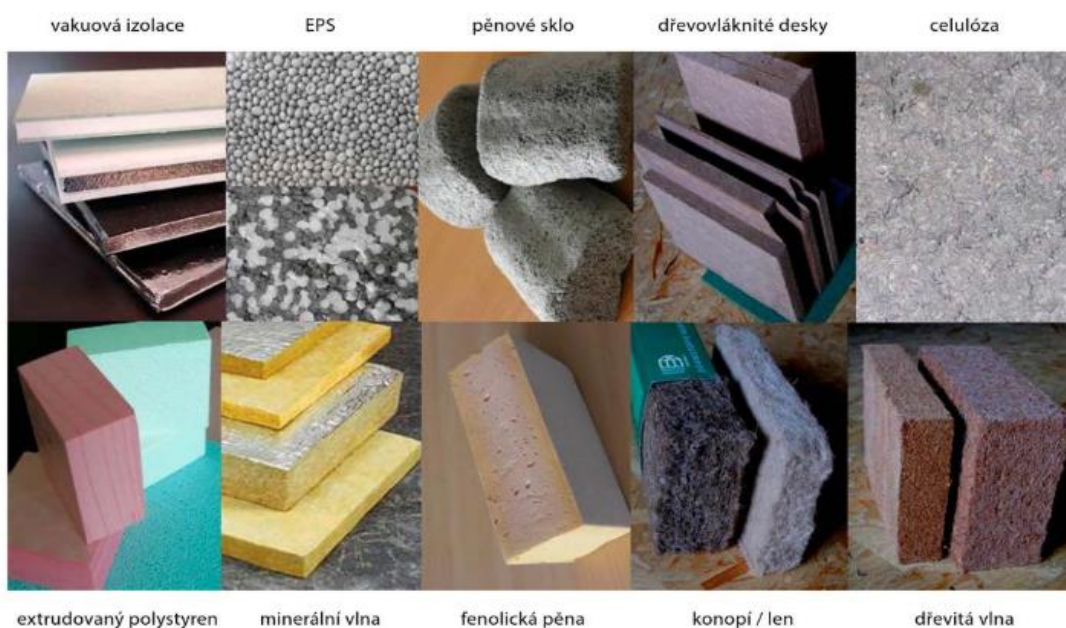


Obrázek 3: Vliv tvaru objektu na tepelné ztráty [30]

1.3.3. Tepelná a vzduchotěsná obálka domu

Kvalitní tepelná izolace je velmi důležitá pro snížení úniku tepla skrze konstrukci, tedy k zamezení tepelným ztrátám. Tato část konstrukce je zásadním prvkem a je třeba zvolit kvalitní a parametrově vyhovující tepelně izolační materiál. Velmi důležité je také kvalitní provedení, tj. správná implementace v konstrukci včetně všech detailů, napojení či kotvení. Kvalitní zateplení není důležité jen u stěn, ale také u střechy, podlahy nebo základů. U všech těchto konstrukcí musí být splněna kritéria pasivního domu, tj. součinitel prostupu tepla $U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Zpravidla to znamená vyšší mocnosti vrstev tepelně izolačního materiálu. Tloušťky izolací se běžně pohybují v rozmezí 20-30 cm, ale pochopitelně záleží na charakteristikách konkrétních izolačních materiálů, především na součiniteli tepelné vodivosti. Vnější obálka domu musí být provedena vzduchotěsně a bez tepelných mostů. Musí plynule navazovat mezi stěnami, střechou a podlahou se základy. Výsledkem je dobrá tepelná pohoda a výrazné snížení nákladů na vytápění. V dobře navrženém a postaveném pasivním domě nevznikají tepelné mosty, konstrukce tedy nemá místa, kde je izolace oslabena a nedochází tam k úniku tepla [14, 31].

Na obrázku č. 4 jsou uvedeny často používané tepelné izolace při zateplování pasivního domu.



Obrázek 4: Druhy tepelných izolací [32]

Vzduchotěsnost domu je parametr referující o kvalitě provedení pasivního domu. Se zvyšující se průvzdušností budovy značně narůstají tepelné ztráty a tím se zvyšuje riziko kondenzace vlhkosti v konstrukci. Vzduch nesmí unikat konstrukcí domu, ale vyměňovat se svými „plícemi“ – řízeným větráním. Malými otvory a netěsnostmi v obálce by nedocházelo pouze k úniku tepla, ale i vlhkosti. Čímž vzniká nebezpečí, že vnitřní vlhkost bude kondenzovat přímo v konstrukci a tím by mohla značně snížit její životnost. Současně má těsnost obálky vliv i na efektivitu zpětného zisku tepla větracího systému, jelikož se vzduch vyměňuje netěsnostmi místo toho, aby procházel rekuperačním výměníkem [17, 33].

K ověření vzduchotěsnosti budovy se používá tzv. test neprůvzdušnosti. Test neprůvzdušnosti, neboli Blower door test, se provádí metodou tlakového spádu. Kdy se utěsní všechny otvory v budově a ventilátor umístěný ve vhodném otvoru obvodové stěny, vytváří v budově tlakový rozdíl, podtlak nebo přetlak. Měřením objemového toku u ventilátoru pak vyhodnocovací jednotka vypočte průměrnou hodnotu intenzity výměny vzduchu n_{50} . U pasivních domů nesmí překročit hodnotu 0,6/hod [18, 34, 35].

Výpočet intenzity výměny vzduchu je prováděn dle vztahu:

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V}$$

kde:

n_{50} ... Intenzita výměny vzduchu [h^{-1}]

V_{50} ...Objemový tok vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa [m^3/h]

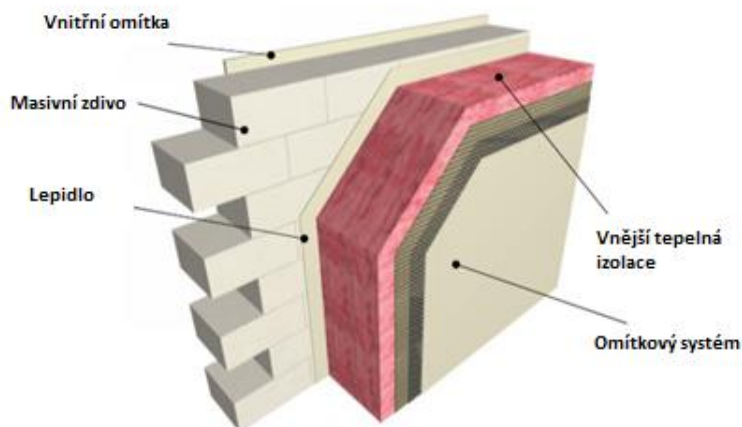
V ...Objem vnitřního vzduchu měřené budovy nebo měřené ucelené části budovy [m^3]

1.4. Konstrukce obvodových stěn pasivních domů

U pasivního domu by všechny neprůhledné obvodové konstrukce měly být izolovány tak, aby součinitel prostupu tepla U byl nižší než $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Při těchto nárocích již tradiční jednovrstvé stavební materiály nevyhoví, je tedy nutno použít vícevrstvé materiály, kdy se na nosnou část o minimální tloušťce přidá silná vrstva tepelné izolace. Bez větších problémů je možné používat běžně dostupné tepelné izolace (minerální vlny, pěnový polystyren apod.). Tloušťky izolací se mění v závislosti na typu konstrukce a použitém tepelně izolačním materiálu, ale běžně se pohybují od 50 do 400 mm [18].

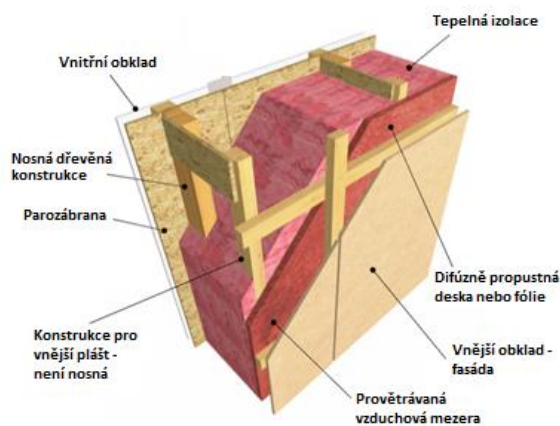
Pro pasivní domy jsou nejvhodnější konstrukce, které dokážou zabezpečit dostatečnou izolační schopnost při co nejmenší tloušťce stěn. Obecně lze stěnové konstrukční systémy rozdělit na těžké (masivní) a lehké (převážně dřevostavby). Volba konstrukčního materiálu bývá do značné míry ovlivněna náklady na stavbu nebo přímo užitnými vlastnostmi. Dřevostavby jsou po omítnutí k nerozeznání od běžných domů a některé masivní stavby obložené dřevem mohou na první pohled vypadat jako dřevostavby.

Na obrázku č. 5 můžeme vidět, že masivní obvodová stěna se skládá z nosného zdiva, lepidla, tepelné izolace a vnitřní a vnější omítky. Je možné použít v podstatě všechny materiály, např. cihly, vápenopískové bloky, beton, pórobeton apod. Aby bylo využito dobrých vlastností masivních staveb (akumulace tepla, akustický útlum), je nutné volit materiály s větší objemovou hmotností i pevností, které zabezpečí v co nejmenší tloušťce statickou únosnost. Vnější strana konstrukce je opatřena vhodným tepelně izolačním materiálem, s vysokou tepelně izolační schopností. Tloušťka masivní stěny závisí na typu použitého materiálu a tloušťce konstrukce, ale běžně se pohybuje kolem 520 mm.

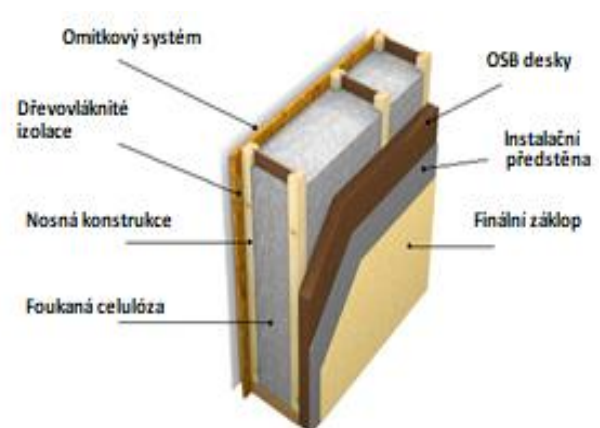


Obrázek 5: Skladba masivní kontaktní obvodové stěny [36]

U dřevostaveb, na obrázku č. 6, se dřevo užívá jen jako konstrukční prvek v množství potřebném pro statickou únosnost. Kdyby byla použita pouze dřevěná konstrukce bez tepelné izolace jako u srubů, musela by být stěna pro splnění tepelně-izolačních požadavků tlustá asi 1 m. Nosné prvky jsou skryty uvnitř stěny a výsledkem je pak její menší tloušťka než u masivních staveb. Lehká konstrukce dřevostavby nevyžaduje natolik staticky únosné základy a umožňuje postavit dům nad terénem, čímž odpadá nutnost hydroizolace spodní stavby, protiradonových opatření a eliminují se tepelné mosty při napojení na základy. Skladba obvodových stěn je buď provětrávaná, která je znázorněna na obrázku č. 7. nebo neovětrávaná (kontaktní), na obrázku č. 6.



Obrázek 7: Skladba lehké provětrávané obvodové stěny [37]



Obrázek 6: Skladba lehké neovětrávané obvodové stěny [38]

Z hlediska montáže se pasivní dřevostavby dělí, jako u běžných staveb, na stavěné přímo na místě realizace stavby nebo prefabrikované panelové konstrukce, kdy se jedná o sendvičové panely, které se jen osazují na místě realizace. Tloušťka lehké stěny bývá kolem 480 mm [18, 32].

U staveb pasivních domů jsou hojně používány oba typy. Mnohdy záleží na vkusu investora. Oproti masivní konstrukci jsou dřevostavby lehké, pružné, prodyšné, ekologické, mají velkou variabilitu stavebních materiálů, a to jak dřeva, tak i tepelných izolací. Další výhodou dřevostavby je její krátká doba výstavby, nižší cena, malá tloušťka a výborně tepelně izolují, což snižuje náklady na vytápění.

Masivní konstrukce jsou naopak pevnější, těžší, neprodyšné, ale lépe akumulují teplo, mají lepší akustické vlastnosti.

1.5. Tepelné izolace pasivních domů

Důležité je, aby stavba jako celek (obvodový plášť včetně střechy, oken atd.) dosáhla požadovaných tepelně technických parametrů pro pasivní stavby. Do nich se zahrnují tepelně izolační schopnosti, vzduchotěsnost konstrukce, způsob vytápění a větrání (rekuperace tepla) a využití pasivních solárních zisků. Co nejučinnější tepelná izolace stavby je ovšem, spolu s vhodným tvarem a dispozicí stavby, základním předpokladem k dosažení nízké energetické náročnosti za přijatelnou cenu [39-41].

Tepelné izolace jsou hodnoceny podle několika parametrů, které určují jejich vlastnosti, možnosti použití a s tím související vhodnost pro konkrétní aplikaci v konstrukci dle požadovaných vlastností výsledné konstrukce.

1.5.1. Základní sledované charakteristiky

Součinitel tepelné vodivosti

Je nejdůležitější parametr, kterým se posuzují tepelně technické vlastnosti materiálu. Definuje schopnost materiálu vést teplo, to znamená šířit teplo ze zahřáté části konstrukce do její chladnější části. Značí se řeckým písmenem λ a jednotkou je $W/(m \cdot K)$. Vyjadřuje množství tepla, které projde za ustálené teploty a času plochou, o jednotkové tloušťce při rozdílu teplot 1 K. Platí, že čím je součinitel tepelné vodivosti vyšší, tím materiál lépe vede teplo, hůře izoluje.

$$\lambda = \frac{q}{-grad(\theta)}$$

kde:

λ ...součinitel tepelné vodivosti [$W/(m \cdot K)$]

q ...hustota tepelného toku [W/m^2]

$grad(\theta)$...gradient teploty [K/m]

Tepelný odpor

Udává míru odporu proti pronikání tepla. Čím vyšší je tepelný odpor materiálu či konstrukce, tím pomaleji teplo prochází. Značí se R a jednotku je $(m^2 \cdot K)/W$.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

kde:

R ...tepelný odpor [$(m^2 \cdot K)/W$]

d ...tloušťka vrstvy [m]

λ ...součinitel tepelné vodivosti [$W/(m \cdot K)$]

Součinitel prostupu tepla

Charakterizuje tepelně izolační schopnost konstrukce. Vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukcí o ploše 1 m² při rozdílu teplot jejích povrchů 1 K. Značí se U a jednotka je [W/(m²·K)].

$$U = \frac{1}{R}$$

kde:

U...součinitel prostupu tepla [W/(m²·K)]

R...odpor konstrukce při prostupu tepla [(m²·K)/W]

Součinitel difúzní vodivosti

Udává schopnost materiálu propouštět vodní páru. Značí se řeckým písmenem δ_p a jednotou je s = kg/(s·m·Pa).

$$\delta_p = \frac{g}{-\text{grad}(\rho_v)}$$

kde:

δ_p ...součinitel difúzní vodivosti [s]

g...vektor hustoty ustáleného difundujícího toku vodní páry [kg/(m²·s)]

grad(ρ_v)...gradient částečného tlaku vodní páry [Pa/m]

Faktor difúzního odporu

Vyjadřuje schopnost materiálu propouštět vodní páru difúzí. Jinak řečeno, kolikrát lépe propouští vodní páru nehybná vrstva vzduchu než stejná tloušťka daného materiálu. Značí se řeckým písmenem μ a je to bezrozměrná veličina. Úzce souvisí s paropropustností. Platí, že čím vyšší je faktor difúzního odporu materiálu, tím menší množství vodní páry přes tento materiál difunduje [42].

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

kde:

μ ...faktor difúzního odporu [-]

δ_a ...součinitel difúzní vodivosti vzduchu [s]

δ ...součinitel difúzní vodivosti materiálu [s]

Třída reakce na oheň (ČSN EN 13501-1)

Materiály se podle stupně hořlavosti řadí do sedmi tříd, od nehořlavých A1, A2, až po lehce hořlavé E, F. Izolační materiály by neměly přispívat k šíření požáru, z toho důvodu by měly být používány materiály s co nejnižší hořlavostí.

Akumulace tepla

Jedním z důležitých parametrů je také akumulace tepla, jedná se o schopnost materiálu ukládat přebytečnou tepelnou energii v době jejího přebytku, ale jakmile teplota v okolním prostoru klesne, odevzdává ho zpět. Jako příklad lze uvést ohřátou stěnu, která po vyvětrání nebo po přerušení dodávky tepla předá naakumulované teplo zpět do místnosti. Tato vlastnost souvisí s objemovou hmotností materiálu, při vyšších objemových hmotnostech se zvyšuje schopnost akumulace, ale naopak se snižuje součinitel tepelné vodivosti. Ideální materiál k akumulaci tepla je ten, který má vysokou tepelnou kapacitu.

Dlouhodobá životnost

Je doba, po kterou tepelně izolační materiály nedegradují, neztrácí svůj tvar ani vlastnosti. Čím kratší doba životnosti tepelné izolace, tím častější zásahy do stavby, které se negativně podepisují na životnosti konstrukce a na ekonomické stránce provozu budovy. Mnohdy se dá životnost materiálu prodloužit správnou a častou údržbou.

1.5.2. Druhy tepelných izolací

K zateplení pasivních domů lze použít velmi mnoho druhů tepelně izolačních materiálů. Vzájemně se od sebe liší především materiálovou bází, což je prvotní informace o druhu izolantu. Kromě vstupních surovin, jsou izolace rozlišovány také na základě výrobního postupu, součinitele tepelné vodivosti, nasákavosti nebo životnosti. Izolace lze rozdělit z několika hledisek, podle použitých materiálů na anorganické a organické, podle použití na izolace vnitřní a vnější. Nebo podle stupně vývoje a součinitele tepelné vodivosti na tradiční izolace, moderní izolace a na tzv. izolace zítřka.

Jako izolace zítřka jsou brány materiály a řešení, o nichž se uvažuje jako o vysoce výkonných tepelně izolačních materiálech budoucnosti, s minimální tepelnou vodivostí. Například vakuové izolační materiály, plynové izolační materiály, nanoizolační materiály, dynamické izolační materiály nebo NanoCon [39, 40].

1.5.3. Tradiční tepelné izolace

Tradiční tepelné izolace vykazují nízkou tepelnou vodivost v rozmezí 0,02 až 0,04 W/(m·K) a z hlediska vývoje se řadí k těm starším. U pasivních domů se hojně používá například pěnový polystyren, minerální vlna nebo polyurethan [39, 43].

1.5.3.1. Pěnový polystyren

Díky nízkému součiniteli tepelné vodivosti a cenové dostupnosti, patří pěnový polystyren k nejrozšířenějším a nejdostupnějším tepelným izolacím, a při zateplování pasivních domů, nejvíce používaný. Podle rozdílného způsobu výroby se pěnový polystyren dělí na expandovaný (zpeňovatelný), který můžeme vidět na obrázku č. 9, a extrudovaný (vytlačovaný), zachycený na obrázku č. 8.



Obrázek 9: Expandovaný pěnový polystyren [45]



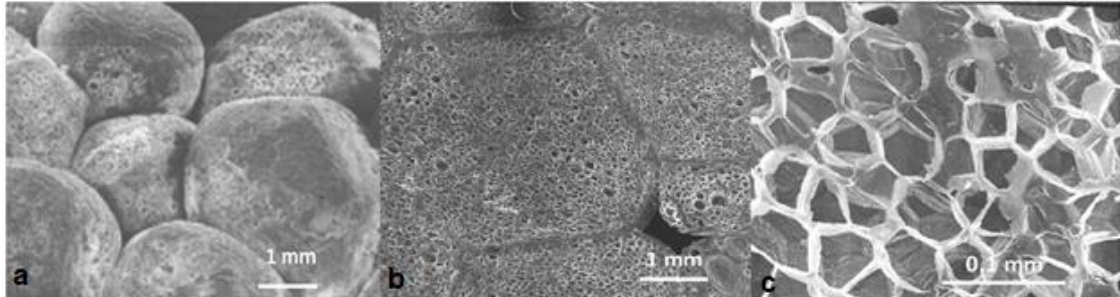
Obrázek 8: Extrudovaný pěnový polystyren [44]

Expandovaný pěnový polystyren

Pěnový expandovaný polystyren (dále jen „EPS“) není lehký jen co se týče váhy, dá se také lehce zpracovat, má výborné tepelně izolační vlastnosti a je cenově dostupný. Kvůli tomu patří k nejrozšířenějším tepelně izolačním materiálům.

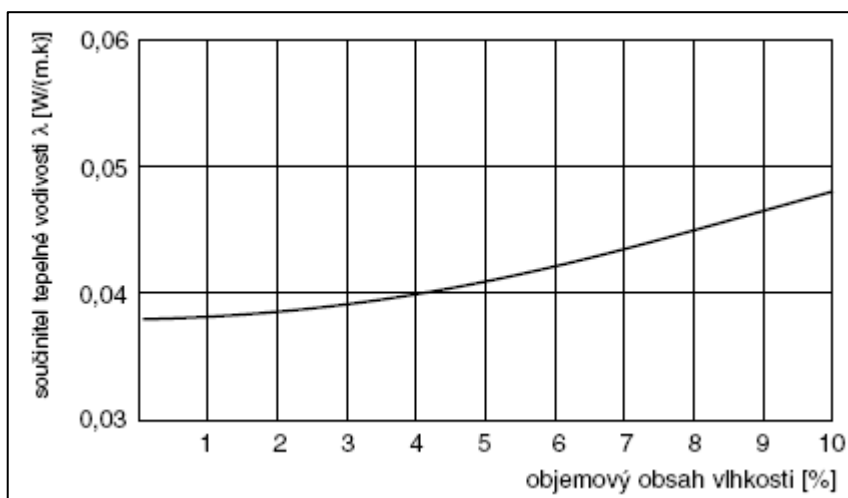
Základní surovinou pro výrobu EPS je zpeňovatelný polystyren. Samotná výroba má tři fáze. První fází je předpěnění, kdy perle polystyrenu jsou pomocí syté vodní páry zahřívány na teplotu kolem 90 °C, vlivem čehož dochází k jejich expanzi. Svůj objem oproti původnímu stavu zvětší až padesátkrát a uvnitř vznikne buněčná struktura. Druhou fází je meziuskladnění v provzdušňovacích sílech, kde vypěněné perle během chlazení zlepšují své vlastnosti. Konečnou fází je vytváření, kde se forma vyplní předpěněnými perlami a vystaví se opět působení syté vodní páry. Perle změkknou, expandují, vzájemně se svaří a vytvoří kompaktní blok.

Z obrázku č. 10 je patrné, že u finální fáze výroby, při znovu napěňování a následnému svaření, kuličky polystyrenu nedolehnou zcela k sobě a místy mezi nimi zůstávají vzduchové póry. Což má za následek nižší mechanické vlastnosti a vyšší nasákavost, než u extrudovaného polystyrenu.



Obrázek 10: Struktura EPS pod elektronickým mikroskopem – a) perle, b) rozříznuté perle a uzavřené buňky, c) uzavřené buňky [43]

Jelikož hmota, ze které je deska polystyrenu složená, obsahuje 2 % polystyrenu a zbytek, tedy 98 % tvoří vzduch, má polystyren velmi nízkou objemovou hmotnost a díky tomu, že má vzduch velmi malou tepelnou vodivost a je rovnoměrně rozmístěn v desce polystyrenu, dosahuje EPS nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti, $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, který je závislý na obsahu vlhkosti nebo objemové hmotnosti. Navíc, kvůli tomu že se jedná o vzduch, je polystyren velmi stabilní a jeho vlastnosti jsou při správném zacházení neměnné, což je pro životnost tepelné izolace důležitá vlastnost. Z obrázku č. 11 je sice zřejmé, že tepelná vodivost se zvyšuje s rostoucím obsahem vlhkosti. Avšak tato závislost nemá pro praxi skoro žádný význam, protože jak je uvedeno dále v textu, nasákavost při dlouhodobém ponoření nepřesahuje 5 %. Tepelně izolační vlastnosti se tedy moc nezhorší.



Obrázek 11: Závislost tepelné vodivosti na obsahu vlhkosti v EPS [46]

Jelikož EPS není rozpustný ve vodě a má uzavřenou buněčnou strukturu, nepohlcují buňky ve své struktuře téměř žádnou vodu. K tomu může docházet do určité míry jenom v pórech mezi vzájemně svařenými částicemi pěnové hmoty. Tento fakt způsobuje, že se tepelně izolační a ani mechanické vlastnosti EPS významně nemění ani při dlouhodobém působení vody. Navíc se po vysušení hodnoty vracejí na původní velikost, zatímco u řady jiných izolačních materiálů dochází i po krátkodobém působení vody k přechodné nebo nevratné ztrátě izolační schopnosti. Na rozdíl od vody může vodní pára, která je obsažena ve vzduchu, procházet stěnami buněk a tím i vrstvou izolace EPS. Nasákavost EPS je od 3 do 5 %.

Objemová hmotnost se u EPS pohybuje mezi 15 až 40 kg/m³ a dosahuje 50 až 250 kPa pevnosti v tlaku při 10% stlačení. Pevnost v tahu, která je důležitá při použití na fasádách, dosahuje až 150 kPa. Díky své buněčné struktuře má značnou tuhost, což je výhodné u aplikací, kde je vyžadována minimální deformace při zatížení. Co se týká hořlavosti, řadí se do třídy E.

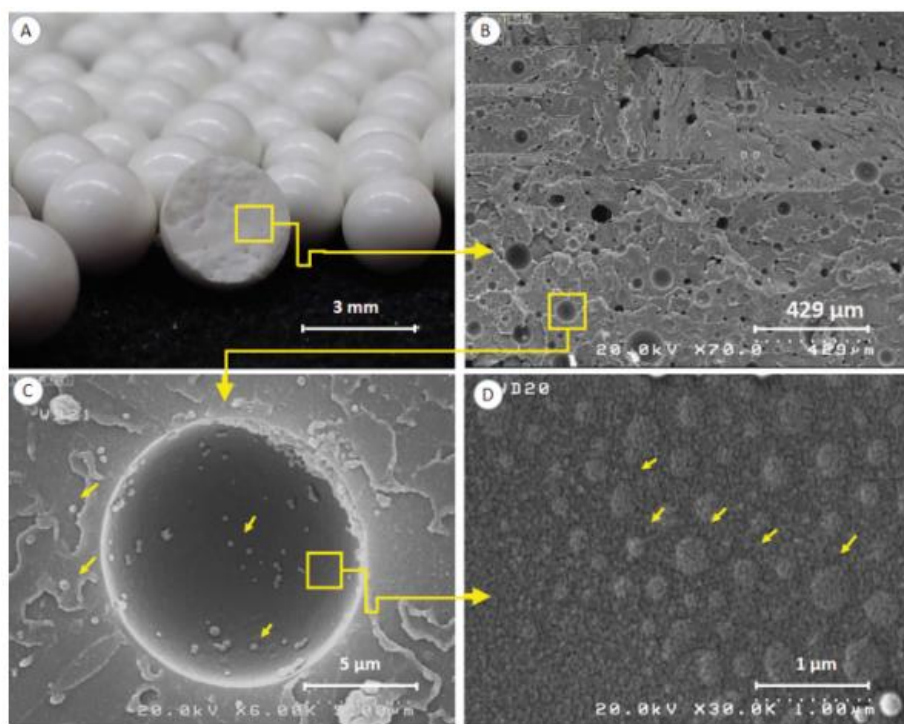
EPS nevytváří živnou půdu pro mikroorganismy. Nehnije, neplesniví a netrouchniví. Dlouhodobé působení UV záření způsobuje žloutnutí EPS, jeho degradaci, proto musí být před slunečním zářením chráněn.

Mnohé studie zaměřující se na toxicitu EPS ukazují, že po dobu několika let se z EPS uvolňuje malé množství styrenu. Množství uvolněného plynu není nijak závratné, a na lidské zdraví tedy nemá neblahý vliv. Zvláště pokud je EPS použito jako externí zateplení a styren se uvolňuje do okolí [46-49].

Při výstavbě pasivního domu bývá kvůli svému nízkému součiniteli tepelné vodivosti, dobré tuhosti a relativně nízké nasákavosti používán v místech, kde nedochází k velkému zatížení a přímému kontaktu s vodou. Tedy jako zateplení fasád v systému ETICS, podlah, stropů a krovů nebo v systémech ICF. EPS lze velmi dobře a hladce opracovávat, broušením, řezáním a vrtáním. Velmi dobře snáší běžné stavební hmoty bez známek poškození, bez ztráty tepelné odolnosti.

Nové studie, které se zabývají výrobou pěnového polystyrenu popisují novou generaci expandovaných polystyrenů, která používá místo těkavé organické sloučeniny, pentanu, jako nadouvadlo vodu (dále jen „WEPS“). Jeví se jako slibná tepelná izolace šetrná k životnímu prostředí. U WEPS je problém ten, že polystyrenová matrice není schopna během expanze a skladování zadržet nadouvadlo, vodu. Aby odchodu vody z matrice bylo zabráněno, byla nedávno navržena nová cesta syntézy, ve které byly použity přírodní polymerní nanočástice. Například celulóznové nanofibrily (dále jen „CNF“) nebo škrobové nanočástice, ke stabilizaci vodních mikročástic uvnitř polystyrenové kuličky. CNF nemají jen klíčovou roli při stabilizaci kapiček vody uvnitř polystyrenových kuliček, ale zvyšují pevnost matrice, během expanze se nanosféry lokalizují v buněčné stěně a tu vyztuží.

Na obrázku č. 12 je možné vidět mikroskopické snímky struktury CNFWEPS při odlišném zvětšení.

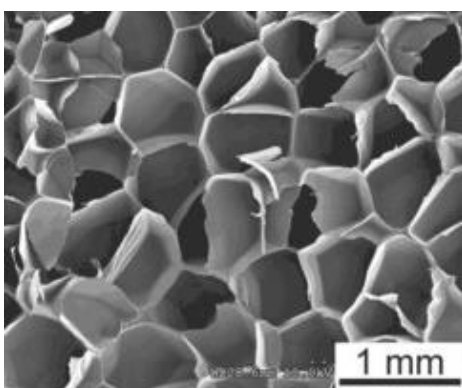


Obrázek 12: a) kompaktní kuličky CNFWEPS, b) průřez kompaktní kuličkou, c) místo kapiček vody, d) místo kapiček vody při větším zvětšení [50]

Vodou expandovaný polystyren obsahující celulóznové nanofibrily (CNFWEPS) je v porovnání s EPS téměř totožný, kromě vlivu na životní prostředí. V budoucnu se tedy může stát, že EPS bude plně CNFWEPS nahrazen [50].

Extrudovaný polystyren – XPS

Metoda výroby extrudovaného polystyrenu (dále jen „XPS“) je založena na zahřátí polystyrenového polymeru společně s dalšími přísadami v extrudéru. Tam se vytvoří tekutá pěna, která se protlačí skrze vytvářecí ústí a zchladí v chladicí části extrudéru za sníženého tlaku, což má za následek vznik uzavřené struktury, která je vidět na obrázku č. 13.



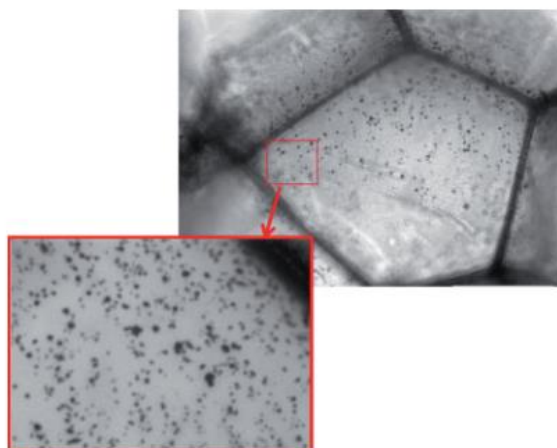
Obrázek 13: Struktura XPS pod elektronickým mikroskopem [51]

Uzavřená struktura pórů zaručuje téměř nulovou nasákavost a velkou pevnost v tlaku, která se pohybuje při 10% stlačení od 150 do 700 kPa. Díky uzavřené struktuře má XPS o něco nižší součinitel tepelné vodivosti, 0,030–0,040 W/(m·K), než EPS. Objemová hmotnost bývá mezi 30 až 150 kg/m³.

Jako EPS, tak i XPS musí být před UV zářením chráněn a řadí se do třídy hořlavosti E. Oproti EPS má XPS lepší vlastnosti, jako větší pevnost, nenasákavost a zejména lepší tepelně izolační vlastnosti, kvůli kterým se nejčastěji používá.

U pasivních domů se používá zejména do konstrukcí staticky zatěžovaných a exponovaných vodou. Zateplení suterénních prostor, zejména tam, kde se izoluje pod terénem, tedy kde může deska XPS přijít do styku se zemí a vodou, kterým velmi dobře odolává. Zateplení soklů budov, střech s opačným pořadím vrstev atd.

Ke zlepšení vlastností XPS, se do matrice trvale přidávají aditiva, uhlíkové částice, jako jsou saze nebo grafit, která mají za následek zlepšení účinnosti materiálu a nižší tepelnou vodivost. Jako nadouvadlo se v zásadě používá oxid uhličitý.



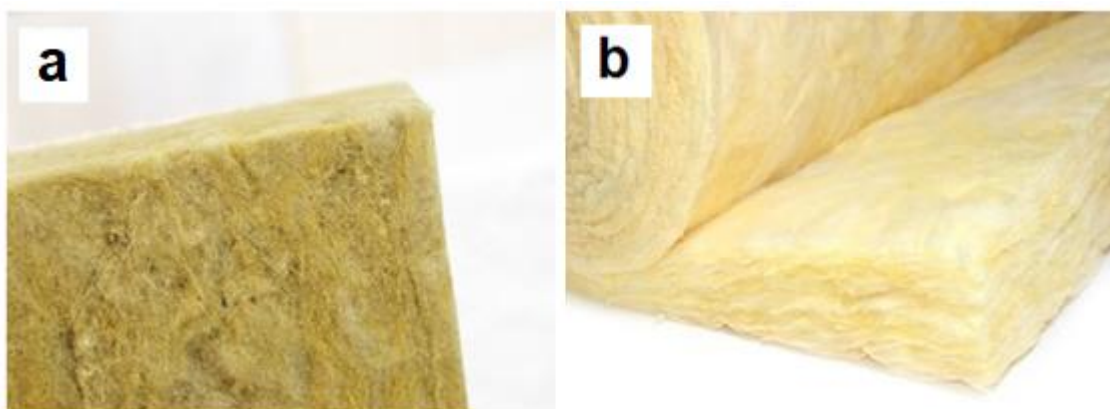
Obrázek 14: Mikroskopický snímek stěny XPS s uhlíkovými částicemi [98]

Na obrázku č. 14 je struktura uzavřené buňky XPS s viditelnými částicemi uhlíku. Které v porovnání s klasickým XPS přináší větší odolnost proti vlhkosti, vyšší mechanickou pevnost a o něco nižší tepelnou vodivost - $0,032 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [98].

1.5.3.2. Minerální vlna

Minerální vlna (dále jen „MW“) patří k nejrozšířenějším tepelně izolačním materiálům, jak u klasické výstavby, tak u pasivních domů. A to díky poměru ceny, vlastností a výsledného efektu a hlavně díky vysoké požární odolnosti.

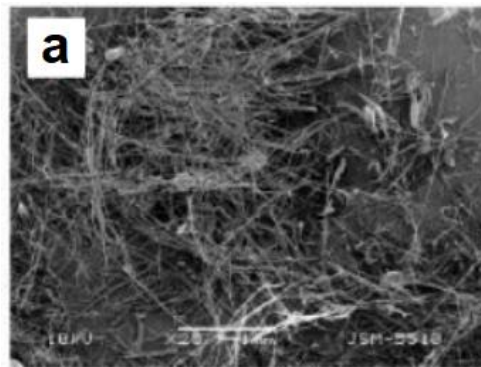
Vyrábí se tavením hornin. Podle použité horniny (vstupní suroviny) se dělí minerální vlna na dva typy. Na kamennou vlnu za použití čediče, můžeme vidět na obrázku č. 15a, a skelnou vlnu za použití křemene na obrázku č. 15b.



Obrázek 15: Minerální vlna - a) kamenná vlna, b) skelná vlna [53]

Skelná vlna se vyrábí z borosilikátového skla při teplotě kolem 1400 ° C, kde se zahřátá hmota protahuje rotujícími tryskami, čímž se vytváří vlákna. Kamenná vlna se vyrábí z tavícího se kamene (čediče) při asi 1500 ° C, kde se zahřátá hmota vyhodí z kola nebo disku, čímž se vytvoří vlákna. Do skelné a kamenné vlny se přidává olej na snižování prachu a fenolová pryskyřice, aby se vlákna spojila a zlepšily vlastnosti produktu.

Díky čediči a křemenu má vlna vysoký bod tání, odolává proto ohni. Z toho důvodu minerální vlna spadá v klasifikaci reakce na oheň do třídy A1. Významnou předností minerálních tepelných izolací je i nízký difúzní odpor ($\mu = 1$), a tím vysoká paropropustnost, což znamená, že se zkondenzovaná vlhkost v obvodové zdi může odpařovat ven. Díky této vlastnosti se minerální vlna často úspěšně používá v difúzně otevřených konstrukcích nebo u dvouplášťových střeš. Neměla by však být dlouhodobě vystavována vlhku. Na obrázku č. 16 je mikroskopický snímek minerální vlny.



Obrázek 16: Mikroskopický snímek minerální vlny [54]

MW se vyrábí v několika variantách lišících se objemovou hmotností, což má za následek změnu součinitele tepelné vodivosti. Kdy zároveň s rostoucí objemovou hmotností, roste i pevnost, ale součinitel tepelné vodivosti klesá. Například při objemové hmotnosti 30 kg/m³ bývá tepelná vodivost kolem 0,04 W/(m·K) a při objemové hmotnosti 90 kg/m³ se tepelná vodivost sníží na 0,03 W/(m·K). Součinitel tepelné vodivosti se u obou typů MW pohybuje mezi 0,034 a 0,043 W/(m·K). Objemová hmotnost u skelné vlny se pohybuje mezi 15-35 kg/m³, na rozdíl od kamenné vlny, u které se díky roztavenému čediči, dosahuje až 100 kg/m³ [39, 53, 55, 56].

Výrobky z MW mohou být perforovány, řezány a upravovány na staveništi bez ztráty tepelné odolnosti. Při výstavbě pasivního domu se desky používají pro zatížené izolace stavebních konstrukcí, do kontaktních zateplovacích systémů ETICS, provětrávaných fasád a jako výplňové izolace do rámových dřevostaveb.

1.5.3.3. Polyuretanová pěna

Polyuretanová pěna (dále jen „PUR“) je vyráběna jako rozpínavá pěna na staveništi, která je vstříkována do konstrukcí a následně dochází k jejímu vytvrzení nebo ve formě tvrdých desek. Typická hodnota součinitele tepelné vodivosti je sice mezi 0,024 až 0,028 W/(m·K), ale v případě PUR pěny dochází ke stárnutí, které spočívá v difúzi plynů obsažených v pěnových buňkách, v důsledku čehož se izolační vlastnosti materiálu zhoršují.

Vzniká expanzním procesem, kdy se uzavřené póry vyplňují expanzními plyny, jako jsou fluorované uhlovodíky, oxid uhličitý nebo hexan.

Je třeba si uvědomit, že i když je PUR při běžném použití relativně bezpečný, v případě požáru uvolňuje velmi jedovaté plyny, jako kyanovodík nebo izokyanáty, které vzbuzují vážné zdravotní problémy [57].

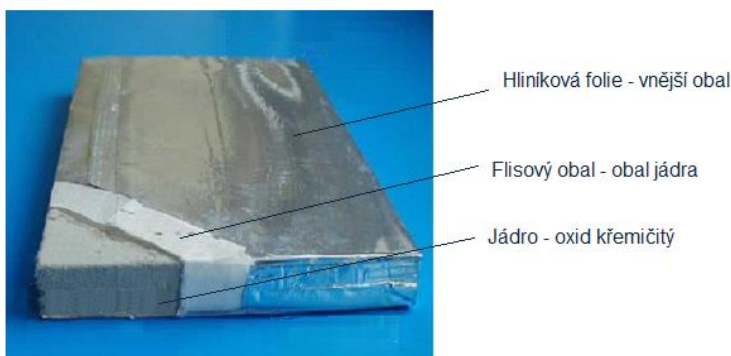
1.5.4. Moderní tepelné izolace

Moderní tepelné izolace jsou v dnešní době považovány za materiály s nejnižší možnou tepelnou vodivostí, až desetkrát menší než u tradičních izolací. Ideální k zateplení pasivních domů. Řadí se mezi ně vakuové izolační panely, plynem plněné panely, aerogely nebo materiály pro změnu fáze. Většina těchto izolací je stále ve vývoji [40].

1.5.4.1. Vakuové izolační panely

Na první pohled se vakuové izolační panely (dále jen „VIP“) pro zateplení pasivních domů zdají jako ideální řešení. Protože nízké tepelné vodivosti v kombinaci s malou tloušťkou se nedá nic vytknout. Vakuové panely ale mají i své nevýhody.

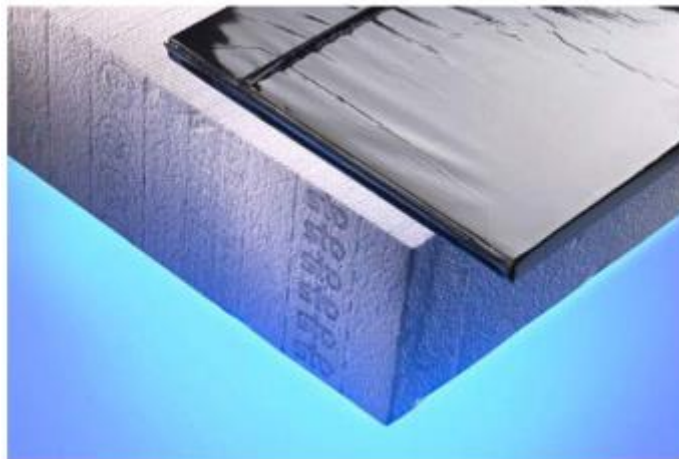
Myšlenka a princip VIP je velmi prostá. Vzduch je sice dobrý izolant, ale vakuum je podstatně lepší. Pokud není nic (v tomto případě ani vzduch), co by přenášelo teplo vedením, bude se teplo šířit sáláním. Přenos tepla sáláním je méně efektivní než vedením, a vakuová izolace tak izoluje lépe, než tradiční izolační materiály.



Obrázek 17: Skladba vakuového izolačního panelu [58]

Na obrázku č. 17 je vidět skladba VIP. Je tvořen z otevřeného porézního jádra, lze si jej představit jako krystalickou síť tvořenou z velmi tenkých vláken oxidu křemičitého, které je schopno zajistit panelu stálý tvar, aniž by došlo k jeho zborcení. Z této vysoce porézní struktury jádra chráněného několika vrstvami metalizovaného laminátu je odčerpán vzduch. Aby nedošlo k poškození panelu a následného vniku vzduchu, musí být obal pevný a neprodyšný, a proto je obal z plastu, který je navíc pokován slabou vrstvou hliníku.

Jak už bylo zmíněno, největší výhodou VIP je velmi nízký součinitel tepelné vodivosti, který se u kvalitních panelů pohybuje okolo $0,004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, desetkrát menší než u tradičních izolací. Z toho důvodu se může VIP vyrábět a používat v mnohem menších tloušťkách, mnohdy má VIP až šestkrát menší tloušťku než tradiční izolace. Porovnání tlouštěk izolací je na obrázku č. 18.



Obrázek 18: Porovnání tloušťky vakuového izolačního panelu s tradiční izolací [40]

Objemová hmotnost je v rozmezí 180 až $210 \text{ kg}/\text{m}^3$ a pevnost v tlaku při 10% deformaci dosahuje 150 kPa . Kvůli špatné schopnosti odolávat ohni se řadí do třídy E reakce na oheň. Odolává teplotám od -40 do $+80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vakuové panely se ve stavebnictví už pár let vyskytují, ale stále nejsou úplně běžné. Jedním z důvodů je jejich vysoká pořizovací cena, kdy za 1 m^2 zaplatíme přes 2500 Kč . Dalším důvodem je, že VIP nelze na stavbě nijak upravovat, přizpůsobovat vlastní potřebě nebo perforovat. Došlo by k poškození panelu a následné ztrátě tepelně izolačních vlastností.

Posledním důvodem a zároveň tím nejzásadnějším je, že vlivem stárnutí dochází ke zvyšování tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti hned po výrobě sice dosahuje $0,004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ale vlivem působení různých faktorů, především difúzí vzduchu a vlhkosti skrz obal do jádra, dochází ke zhoršení kvality vakua v jádře a tepelná vodivost roste. Avšak k prvnímu selhání VIP může dojít již v prvních dnech po výrobě, kdy švy nemusí být kvalitně utěsněny a může dojít k rychlému zvýšení vnitřního tlaku plynu, nebo může dojít k poškození obalu během převozu nebo instalace na stavbě.

Tento problém je rozebírán v několika studiích, ve kterých se vývojáři snaží přijít na vhodné řešení, jak tento problém vyřešit. Jedním z nich je přidání getrů (aktivní materiál, který chemicky váže nebo adsorbuje atomy či molekuly plynu a při daných podmínkách je dále neuvolňuje) a vysoušedel do jádra. To ale vnik vzduchu do jádra jen odloží nebo zpomalí, tepelná vodivost se bude i tak zvyšovat.

Další studie se zabývala vlivem vysoké teploty na životnost a tepelnou vodivost VIP. Bylo prokázáno, že při působení vysoké teploty na VIP, dochází k trvalému růstu tepelné vodivosti. Za pět let až o 8 %. Studie došla k závěru, že je nutné opatření ke zmírnění expozice VIP. Nejvhodnějším řešením je přidat na stranu, na kterou působí vysoké teploty, další izolační vrstvy, například XPS nebo MW.

Vakuové panely se používají často při řešení náročnějších detailů, především izolace ostění oken nebo parapetů. Obecně, použití vakuových izolačních panelů dává smysl v případech, kdy potřebujeme kvalitně zaizolovat plochu budovy, a přitom použít co nejtenčí vrstvu izolace. Jedná se především o zateplení podlah stávajících objektů, zateplení průjezdů nebo o vnitřní zateplení, které je pouze nouzovým řešením [59-64].

1.5.5. Přírodní organické tepelné izolace

Jedna věc je energetická náročnost provozu pasivního domu, druhá věc je energetická náročnost výroby a dopravy materiálů, na které je potřeba značné množství energie. Snaha o snížení produkce CO_2 není tedy jen u provozu pasivních domů, ale i u výroby materiálů na jeho výstavbu. Z tohoto důvodu přichází v oblibu přírodní organické materiály, které při zpracování CO_2 buď vůbec neprodukují nebo jen malé, skoro zanedbatelné množství.

V posledních letech, hlavně při výstavbě nízkoenergetických domů, roste o takové materiály zájem. Především kvůli tomu, že jsou obnovitelné, recyklovatelné, netoxické, šetrné k životnímu prostředí a vyžadují minimum energie na výrobu.

Přírodní organické tepelné izolace jsou buď živočišné nebo rostlinné. Mezi živočišné patří ovčí vlna nebo kachní peří a mezi rostlinné celulóza, konopí, len a sláma.

1.5.5.1. Celulóza

Jde o tepelnou izolaci z celulózových vláken, obrázku č. 19, která se vyrábí metodou recyklace papíru. Ve výrobě je rozemletím a rozvlákněním papíru získáno celulózové vlákno, které je následně smícháno s přísadami zajišťujícími odolnost proti hnilobě, požáru a hlodavcům.



Obrázek 19: Tepelná izolace z celulózových vláken [65]

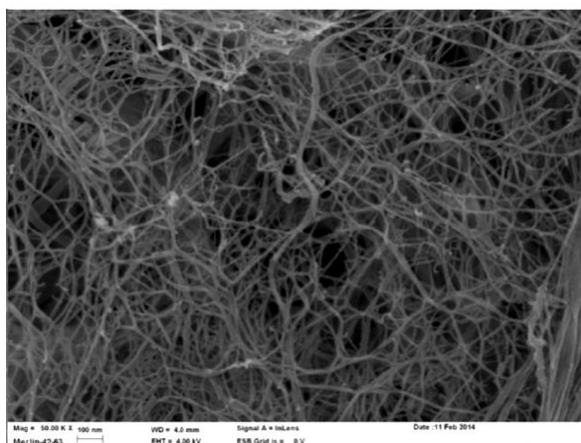
Celulóza se aplikuje strojním foukáním za sucha nebo objemovým plněním do připravených dutin (stěn, střech nebo stropů). Výhodou je, že systém umožňuje izolovat bez spár i komplikovaná a těžko dostupná místa. Při aplikaci nevznikají odřezky a jiný odpad. U volného foukání se objemová hmotnost pohybuje od 30 kg/m³. Při plnění dutin je objemová hmotnost vyšší, až po 70 kg/m³. Při správné aplikaci nedochází k sedání.

Další formou aplikace celulózy je za mokra, celulóza smíchaná s vodou nebo lepidlem je stříkána na stěny nebo stropy v interiéru i exteriéru. Avšak nalezení lidí s kvalifikací k aplikaci mokřým způsobem je relativně obtížné ve srovnání se suchým způsobem nebo skelnými vlákny. Celulóza je přesto levným a efektivním způsobem izolace.

Dosahuje podle způsobu aplikace a objemové hmotnosti 0,039-0,045 W/(m·K) tepelné vodivosti. Řadí se do třídy C-E reakce na oheň, záleží na množství přidané přísady proti ohni. Pomocí buněčné struktury váže vlhkost a transportuje ji. To znamená, že je méně náchylná na případný vnik vodních par do konstrukce, kde se neshlukuje, ale je rozváděna a plošně odpařována. Neznamená to však, že nemusíme izolaci chránit před vlhkostí. Difúzní odpor je nízký, mezi hodnotami 1-3.

Celulóza se používá nejčastěji jako izolace nepochůzných půdních prostor, ale i jako výplň uzavřených dutin stěn [56, 65, 66].

Jak bylo napsáno výše, celulóza má nízkou tepelnou vodivost, díky níž jsou materiály na bázi celulózy užitečné pro tepelnou izolaci. Momentálně se veškerá pozornost ohledně celulózy zaměřuje na materiál hodně podobný, na nanocelulózu. Několik studií ukázalo, že nanocelulóza vykazuje tepelnou vodivost pod $0,025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a je klasifikována jako superizolační materiál. Jedna studie ukázala, že oxidovaná celulósová nanovlákna, vyráběná sušením oxidem uhličitým, vykazují pokles objemové hmotnosti z 37 na $17 \text{ kg}/\text{m}^3$, což má za následek pokles tepelné vodivosti až na $0,018 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [39].



Obrázek 20: Nanocelulósová vlákna pod mikroskopem (vpravo) [67]

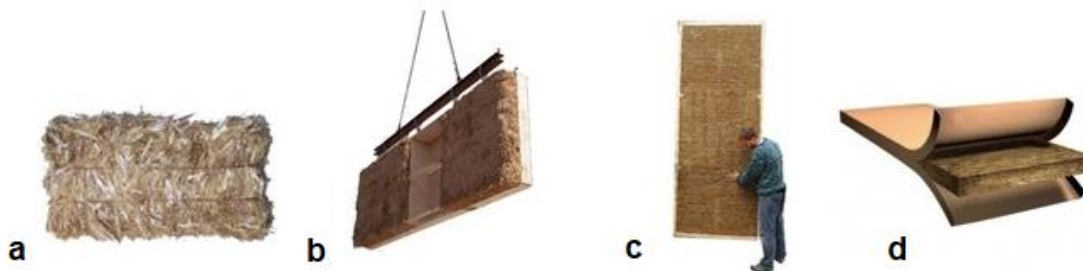
1.5.5.2. Sláma

Sláma je v podstatě odpadní produkt, avšak její obliba a využití ve stavebnictví stále roste, zejména mezi ekologicky smýšlejícími stavebníky. Lze říct, že se jedná o ideální přírodní izolační materiál. Nízká cena, dobré izolační vlastnosti, přírodní původ, trvanlivost, která při správném užití dosahuje až sta let.

Podstatou izolačních vlastností slámy je dvojitý systém vzduchových komor, primární dutiny ve stéblech a mikro-komůrky v obvodových stěnách dutin. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí $0,066$ – $0,081 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, závisí na absolutní vlhkosti materiálu a objemové hmotnosti, 90 – $150 \text{ kg}/\text{m}^3$. Pokud není sláma v konstrukci vystavena přímému zatékání, nebo dlouhodobě v prostředí s vyšší relativní vlhkostí než 80% , pohybuje se úroveň absolutní vlhkosti materiálu v intervalu od 5 do 15% . Sláma je velmi dobrým přirozeným transportérem vodní páry, faktor difuzního odporu se rovná přibližně hodnotě 2 .

Slaměné konstrukce nepředstavují ve stavbě vážné požární riziko. Pokud se sláma slisuje do kompaktního bloku, sníží se tím i množství kyslíku, který podporuje hoření. Proto balíky, ať už volné nebo zabudované, pouze doutnají. Sláma se v konstrukcích vyskytuje zpravidla chráněná dalšími vrstvami, na požární odolnost proto musí být posouzena celá skladba, je klasifikována do třídy C-E reakce na oheň.

Sláma se nejčastěji používá ve formě balíků (obrázek 21a), které lze bez větších úprav použít jako výplně dřevěných skeletových stěn, případně jako vnější zateplení tenkých zděných konstrukcí. Další způsob, jak pracovat s balíky, je příprava individuálních elementů stavby v prostředí montážní haly (obrázek 21b). Jiné řešení je systém prefabrikovaných modulových dílců. Nejedná se již o balíky, ale o rozvolněnou slámu, která je do dřevěných rámu lisována a na povrchu seříznuta do roviny (obrázek 21c). Posledním produktem jsou desky ze silně slisované slámy opatřené na povrchu recyklovaným papírem (obrázek 21d).



Obrázek 21: Technologie použití slámy jako tepelné izolace [68]

Sláma jako tepelná izolace se užívá velmi řídkce. Velmi důležité je oddělení balíků od všech zdrojů vlhkosti omítkou nebo obkladem. V porovnání s průmyslovými izolacemi je u slámy důležité počítat s vyšší pracností vzhledem k nerovnostem a rozměrové nepravidelnosti. Slámu lze použít buď v kombinaci s nosnou stěnou nebo sama sláma může sloužit jako nosná konstrukce [17, 68, 69].

V tabulce č. 2 je uvedeno shrnutí důležitých parametrů nejčastěji používaných tepelných izolací v konstrukcích pasivních domů u nás.

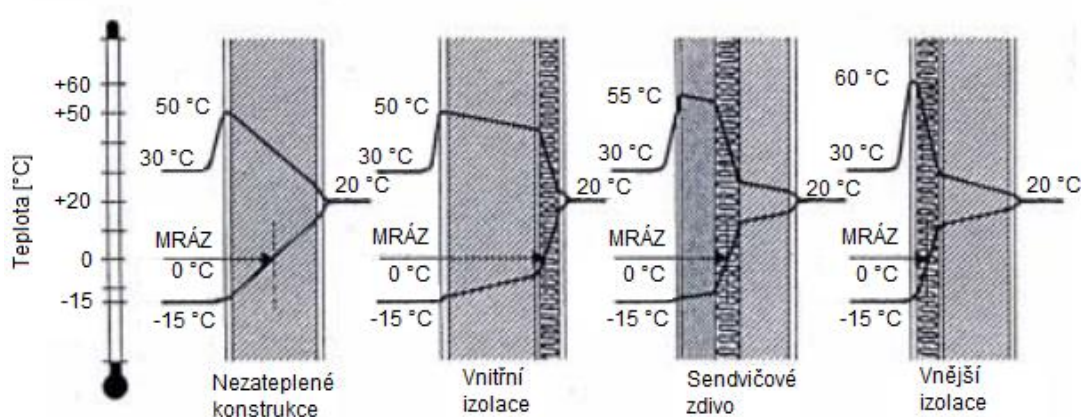
Typ izolace		λ [W/(m.K)]	μ [-]	OH [kg/m ³]	Třída reakce na oheň	Životnost [při správné údržbě]	Cena [Kč/m ²]
EPS		0,035-0,041	20-100	15-40	E	Neměnná	85
XPS		0,030-0,040	180	30-150	E	Neměnná	300
MW	kamenná	0,035-0-043	1	100	A1	Téměř neměnná	250
	skelná			15-35			130
Polyuretan		0,024-0,028	30-100	20	C-E	Prakticky neměnná	450
VIP		0,004	>100 000	180- 210	E	Tepelná vodivost pomalu roste	2000
Celulóza	foukaná	0,039-0,045	2	30	C-E	Neměnná	95
	plněná			70			
Sláma		0,066-0,081	2	90-150	C-E	Neměnné až 100 let	70

Tabulka 2: Parametry tepelných izolací

1.6. Zateplování obvodových konstrukcí u pasivních domů

Jak už bylo zmíněno, obvodové konstrukce pasivních domů musí splnit požadavek na nízký součinitel prostupu tepla, má být menší nebo roven $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Ale málo který zdící prvek tento požadavek dokáže splnit. Proto je naprostá většina pasivních domů určitým způsobem zateplena. Nejčastějším způsobem, jak se zateplují pasivní domy, je použití vnější tepelné izolace, která chrání zdivo před promrznutím. Jiným způsobem zateplení, je méně častá vnitřní izolace nebo sendvičový typ zdiva.

Na obrázku č. 22 je znázorněno porovnání průběhu teplot v konstrukci obvodové stěny v zimním a letním období pro různé polohy zateplení. Z obrázku je zřejmé, že kromě vnější izolace, dochází u zbylých tří případů k promrzání zdiva, a tím zhoršení tepelně izolačních vlastností a životnosti zdiva [31, 70].

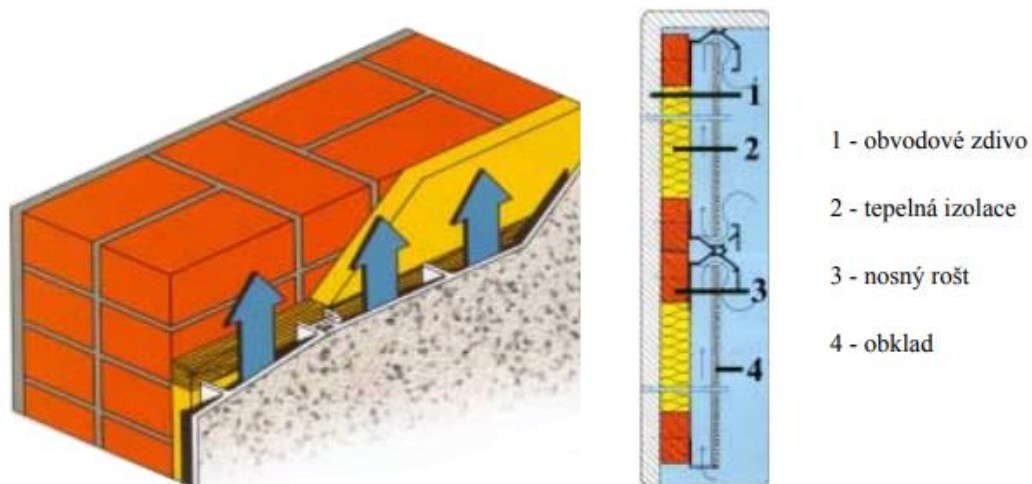


Obrázek 22: Průběhy teplot v obvodové stěně pro různé typy zateplení [70]

1.6.1. Vnější zateplovací systémy

U tohoto typu zateplení je zdivo chráněno před promrzáním a není tolik namáháno výkyvy teplot. K zateplení pasivních domů je vnější izolace ideální. Jelikož se snadněji v konstrukci eliminují tepelné mosty, snižuje se riziko kondenzace vlhkosti ve zdivu a zvýší se akumulační schopnost domu. K nevýhodám patří potřeba lešení a prostoru kolem domu, vyšší pořizovací náklady a nutnost provádět izolace najednou na celé ploše domu, ale ve srovnání s výhodami jsou zanedbatelné.

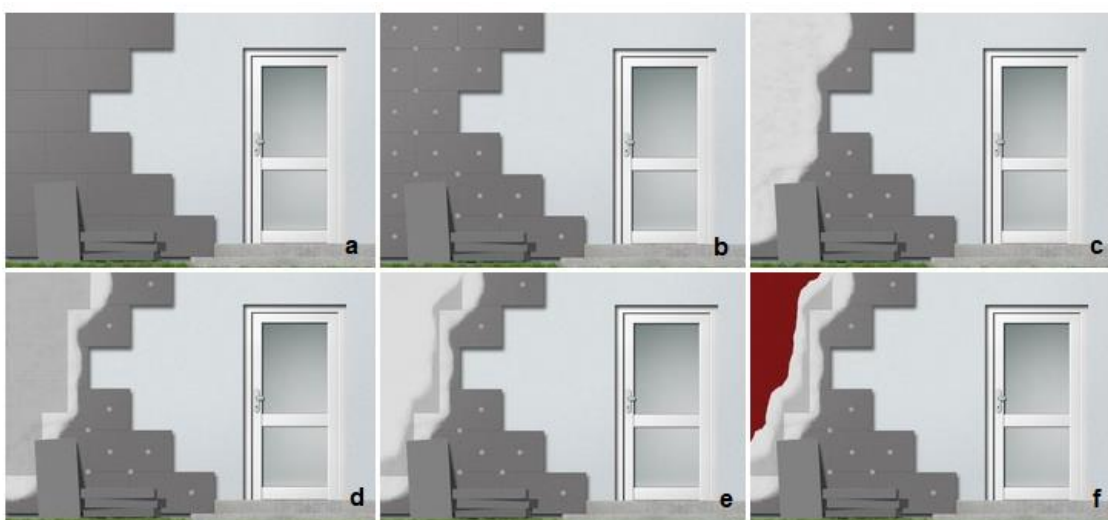
Vnější zateplovací systémy se dělají buď zavěšené nebo kontaktní. Skladba zavěšené fasády je znázorněna na obrázku č. 23. Vnější ochrana proti povětrnostním vlivům u zavěšené fasády, např. dřevěné panely visící na nosné konstrukci, která je do vnější stěny uchycena hmoždinkami a izolována. Mezi izolací a zavěšenou fasádou zůstává asi dvoucentimetrová vzduchová mezera, kterou cirkuluje vzduch, takže případně zvlhlá izolace může vyschnout.



Obrázek 23: Vnější zateplení obkladem s provětrávanou mezerou [63]

Vnější kontaktní zateplovací systém, mezinárodně označovaný zkratkou ETICS (external thermal insulation composite system) je na našem území nejrozšířenějším způsobem zateplování obvodových plášťů budov, a to i u pasivních budov.

Postup aplikace ETICS je znázorněn na obrázku č. 24. Tepelná izolace, nejčastěji jde o EPS nebo MW, se lepí (obrázek 24a) a kotví (obrázek 24b) k připravenému pevnému a soudržnému podkladu. Na tepelnou izolaci se natahuje tzv. základní vrstva (obrázek 24c), složená ze stěrkové hmoty, do které se hladítkem vtláčuje skleněná síťovina (obrázek 24d). Na tu se obvykle natahuje další vrstva stěrkové hmoty (obrázek 24e). Na dokončenou základní vrstvu se obvykle nanáší probarvená omítka se zatíranou nebo rýhovanou strukturou (obrázek 24f) [31, 71, 72].



Obrázek 24: Postup aplikace kontaktního zateplovacího systému [71]

1.6.2. Vnitřní zateplovací systémy

Vnitřní zateplovací systémy nejsou moc rozšířené, u nově postavených pasivních domů se s nimi nesetkáme. Většinou se k nim přistupuje v případech sanací stávajících budov nebo při jejich přestavbě na pasivní standard, kdy vnější zateplení není z konstrukčních důvodů možné, například při zateplení historický fasád nebo štítových stěn, které přiléhají k sousední budově. Nebo při lokálním zateplení, kdy by aplikace tepelné izolace na celou plochu fasády byla finančně náročná.

U vnitřního zateplení převyšují nevýhody nad výhodami, a to jak počtem, tak i významem. Mezi výhody vnitřního zateplení patří to, že lze izolovat jen jednu místnost, k aplikaci zateplovacího systému není nutná výstavba lešení a nemusí být brán ohled na nepříznivý počasí. K nevýhodám se řadí zmenšení užité plochy místnosti a snížení akumulční schopnosti zdiva. Je velká pravděpodobnost, že dojde ke kondenzaci vlhkosti ve stěnách domu, k promrzání vnějšího zdiva a k riziku růstu plísní, zejména v oblasti tepelných mostů. Vnitřní zateplení tedy není vhodná volba ke snížení energetické náročnosti.

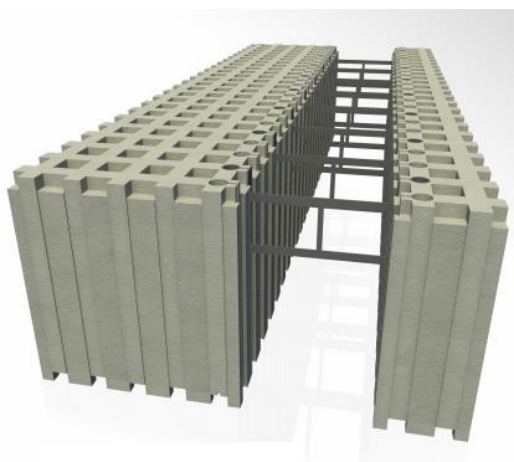
Z důvodu kondenzace vodní páry, která by mohla nastat uvnitř stěny, je nutné použití parozábrany, umístěné u vnitřního povrchu. Jsou to obvykle fóliové materiály s vysokým difúzním odporem. Je třeba však upozornit na rizika, která spočívají v náročnosti na kvalitu provedení této parozábrany a na možnost jejího snadného porušení.

Vnitřní zateplovací systémy jsou buď kontaktní nebo se samostatnou nosnou konstrukcí. Kontaktní systém je velice podobný systému ETICS u vnějšího zateplení. S rozdílem, že vnitřní kontaktní zateplovací systém nemusí odolávat povětrnostním vlivům. Proto jsou kladeny nižší požadavky na kotvení. Jako izolant se nejčastěji používá EPS nebo MW. Systém se samostatnou nosnou konstrukcí je tvořen nosným roštem, který je ukotven na stávající konstrukci, a vyplněn izolací, nejčastěji MW [70, 73, 74].

1.6.3. Sendvičové zdivo

Sendvičové zdivo je v podstatě jakékoliv vhodné spojení stavebního materiálu a izolantu. Buď jde o vrstvu tepelného izolantu, který je z obou stran obestaven zdíciemi prvky nebo o nosnou konstrukci opláštěnou z obou stran vrstvou tepelné izolace. U novostaveb pasivních domů se první varianta neobjevuje, druhé variantě se naopak dostává velké oblibě.

Speciálním a moderním druhem sendvičového zdiva je tzv. ICF systém, jde o systém ztraceného bednění speciálně vyvinut pro výstavbu obvodových a vnitřních nosných stěn pasivních domů. Tvárnice jsou tvořeny dvěma polystyrenovými bloky, uvedeny na obrázku č. 25, které tvoří ztracené bednění. Z těchto bloků se vyskládá základ domu, obvodové stěny, nebo stropy domu a následně se vše zmonolitní, prolije betonem. Jako izolant se používá druh polystyrenu NEOPOR, což je EPS s přísadou grafitu. Oproti klasickému EPS má NEOPOR nižší součinitel prostupu tepla a vyšší pevnost.



Obrázek 25: Ztracené bednění z NEOPORu [75]

Velkou předností systému ICF je rychlá a jednoduchá výstavba. Jde o systém, který je založen na principu stavebnice, kdy všechny prvky do sebe navzájem zapadají. Díky propracovanému systému a návaznosti jednotlivých profilovaných desek a tvárnic dochází k eliminaci tepelných mostů.

Nevýhodou polystyrenu na vnitřní straně je, že při vrtání je nutné vrtat až na nosné betonové jádro. Největší nevýhodou je to, že na vnitřní straně stěny je cca 50 mm tlustá vrstva polystyrenu, která snižuje akumulární schopnost stěny. Z toho důvodu je možné použít obdobnou tvárnici, které má místo vnitřní polystyrenové vrstvy díl z cementotřískových desek [75-77].

Ke spojení vnitřního a vnějšího stěnového polystyrenového dílce do tvarovky slouží tzv. plastová příčka, vyobrazena na obrázku č. 26.



Obrázek 26: Plastové příčky [78]

Plastové příčky jsou při výrobě zapuštěny ztraceného bednění do polystyrenových bloků. Spojení kotvy a bloků musí být tak pevné, aby vydrželo prvotní tlak vyvozený od čerstvě nalitého betonu. Plastové příčky také musí odolávat velkým tahovým napětím vznikajícím při působení čerstvého betonu a následného dotvarování [78].

1.7. KOTVENÍ KONTAKTNÍCH ZATEPLOVACÍCH SYSTÉMŮ

Při kotvení kontaktních zateplovacích systémů u pasivních domů se stejně jako u stávajících budov tepelná izolace buď jen k podkladu domu přilepí, nebo se po nalepení tepelná izolace ještě přikotví. O tom, která varianta bude použita, rozhoduje několik faktorů: výška zateplení, druh nosné konstrukce, typ a tloušťka tepelné izolace.

1.7.1. Kontaktní lepený systém

Bez hmoždinek lze provádět zateplení objektu až do výšky 8 m a do tloušťky izolantu 200 mm. Podkladem musí být v takových případech nové zdivo z pálených nebo vápenopískových tvárnic, případně z monolitického betonu. Pokud bude zajištěn pevný, dostatečně únosný, rovný a suchý podklad bez prachu a jiných nečistot, lze se zcela spolehnout na kvalitní lepicí hmotu. Pro tento čistě lepený systém lze, hlavně kvůli nízké objemové hmotnosti, použít výhradně izolanty z EPS.

V porovnání se systémem používající kotvy, jde o rychlejší a levnější variantu. Fasáda bez hmoždinek také znamená zateplení bez bodových tepelných mostů. Bez hmoždinek lze u standardního rodinného domu ušetřit cca 1 200 děr, což má vliv na neprůvzdušnost obvodové konstrukce. Na fasádě bez bodových tepelných mostů se také neprojevuje tzv. hydrotermický jev, tedy prokreslování hmoždinek při specifických klimatických podmínkách.

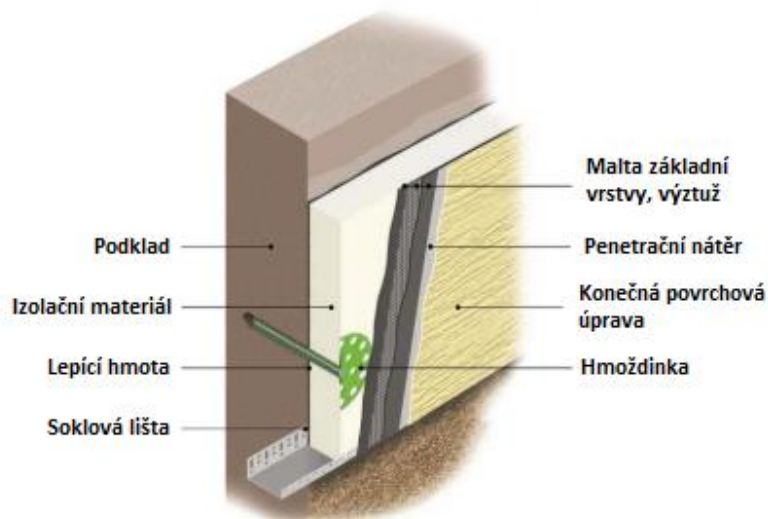
Z výše uvedeného vyplývá, že se jedná o ideální řešení pro zateplení novostaveb rodinných pasivních domů [37].

1.7.2. Kontaktní lepený systém s kotvami

Pokud zateplovaná konstrukce a typ použité izolace nevyhovuje parametrům čistě lepeného systému, je nutné zateplovací systém přikotvit. Kotevní prvky zajišťují stabilitu nalepeného izolantu a chrání zateplovací systém před silnými poryvy a sáním větru. U budov větší výšky chrání kotvení zateplovací systém před možným zhroucením z důvodu vlastní váhy.

Mechanické kotvení tepelně izolační vrstvy fasádními hmoždinkami, zobrazeno na obrázku č. 27, spočívá ve spolehlivém spojení hmoždinky s nosným podkladem. Základní mechanismus, kterým se řídí princip navrhování vhodného typu a počtu fasádních hmoždinek, závisí na síle vyvolané sáním větru, která je zachycená talířkem hmoždinky a přenesená rozpěrnou částí hmoždinky do podkladu [80, 81].

Návrh a posouzení mechanického upevnění ETICS musí být součástí projektové dokumentace, která řeší typ hmoždinek, jejich počet, polohu vůči základní vrstvě a rozmístění hmoždinek v ploše tepelně izolačních desek a v místě jejich styků.



Obrázek 27: Schéma kontaktního kotevního systému [82]

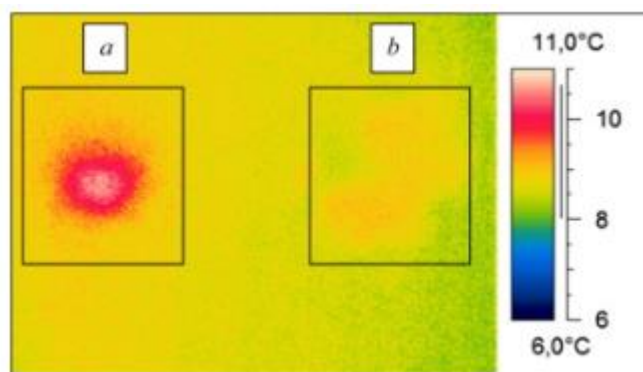
Projektová dokumentace řeší návrh a posouzení ETICS s ohledem na druh a hmotnost tepelné izolace, výšku a umístění stavby, povahu povětrnostních podmínek nebo kategorii podkladu, které jsou definovány podle druhu podkladního materiálu.

- Kategorie A: kotvy do OBYČEJNÉHO BETONU,
- kategorie B: kotvy do PLNÉHO ZDIVA,
- kategorie C: kotvy do DUTÉHO, DĚROVANÉHO ZDIVA,
- kategorie D: kotvy do BETONU Z PÓROVITÉHO KAMENIVA,
- kategorie E: kotvy do POROBETONOVÉ TVÁRNICE bílý, šedý [81].

Kotevní prvky sice chrání nalepený izolant před povětrnostními vlivy, ale mají za následek vznik bodových tepelných mostů a tím zvyšují součinitel tepelné vodivosti izolace, kvůli kterému dochází ke zbytečnému úniku tepla. Aby ke ztrátám tepla nedocházelo nebo se jim co nejvíce zabránilo, zavrtávají se kotvy hlouběji do izolantu a do vzniklého otvoru se vloží zátka, taková jako je na obrázku č. 28, z materiálu použitého tepelného izolantu. Výsledek je vidět na obrázku č. 29 [83].



Obrázek 28: Zátka z minerální vlny [84]



Obrázek 29: Termografické zobrazení vnější stěny v místech, kde byly použity a) bez zátky, b) se zátkou [91]

Každý kotevní systém je charakterizován bodovým činitelem tepelné prostupnosti, který uvádí množství tepla, procházející hmoždinkou jakožto tepelným mostem. Čím vyšší je hodnota, tím větší je přístup tepla hmoždinkou a větší pravděpodobnost vykreslování míst kotvení. Značí se řeckým písmenem χ a jednotkou je W/K. Hmoždinky s plastovým trnem / šroubem mají hodnoty prostupu tepla velmi nízké, často i 0,000 W/K. Hmoždinky s kovovým trnem/šroubem se pohybují kolem 0,002 W/K [90].

Pro nejběžněji používané systémy u pasivních domů je hlavním nosným a stabilizačním prvkem systému kotvící talířová hmoždinka. Podle způsobu montáže je buď zatloukácí, šroubovací nebo nastřelovací.

1.7.2.1. Zatloukávací talířové hmoždinky

Zatloukácích talířových hmoždinek je hned několik typů. První jsou hmoždinky se zatloukáčím trnem, vhodné pro použití do všech druhů podkladních materiálů. Mají vysokou povětrnostní odolnost a disponují snadnou montáží. Nejčastěji se používají k uchycení izolačních desek z pěnového polystyrenu. Zatloukáčící trn se vyrábí buď umělohmotný (polyethylen) nebo ocelový. Kovový trn obvykle poskytuje hmoždince vyšší únosnost a spolehlivější montáž. Pro plastové trny, obrázek č. 30, hovoří cena a minimální přístup tepla hmoždinkou. Obvykle platí, že plastové trny lze dobře použít u bezproblémových a hutných podkladů (beton, plná cihla), a pro lehčí nebo pórovité materiály jsou mnohem vhodnější kovové trny.



Obrázek 30: Talířová hmoždinka se zatloukáčím umělohmotným trnem [84]

Pouzdro hmoždinky a umělohmotný trn je z polyethylenu, ocelový trn je opatřen antikorozií úpravou a plastovým nástřikem, aby bylo zamezeno odchodu tepla. Kotva se vyrábí o délce dřívku až 295 mm a průměru 8 mm.

Postup montáže je znázorněn na obrázku č. 31. Nejprve se vyvrtá otvor požadovaného průměru a hloubky, poté se do vyvrtaného a vyčištěného otvoru vloží hmoždinka a jemnými údery se zatluče. Do zatlučené hmoždinky se vloží umělohmotný nebo kovový trn a zatluče se. Při zatlučování je nutné dbát na to, aby trn hmoždinky a talíř hmoždinky byly v jedné rovině s kotvenou izolací [84-86].



Obrázek 31: Postup montáže hmoždinky se zatlučovací trnem [84]

Kovové zatlučovací hmoždinky, obrázek č. 32, jsou ideální v případech, kdy se klade důraz na požární odolnost zateplení nebo do vlhkých prostor. Jsou vhodné k upevnění izolačních desek z minerální vlny nebo pěnového skla, tedy izolačních materiálů odolných proti požáru.



Obrázek 32: Zatlučovací hmoždinka kovová [84]

Montáž probíhá podobně jako u hmoždinek se zatlučovacími trny. Vyvrtá se otvor požadovaného průměru a délky, vyčistí se a následně se do něj zatluče hmoždinka. Pružná ocel se při zaražení rozepře do kotevního podkladu a tím přenáší zatížení do podkladu. Vyrábí se o délce dřívku až 300 mm a průměru 8 mm.

Poslední druh umělohmotné zatlučovací hmoždinky se vyrábí z polyethylenu, o průměru dřívku 10 mm a délce do 90 mm. Používá se při kotvení pěnových polystyrenů, tedy u těch materiálů, na které nejsou kladeny vysoké nároky na požární odolnost. Montáž je stejná jako u kovových hmoždinek, po vyvrtání otvoru se zatluče skrz tepelný izolant. Po zatlučení se žebírka rozpěrné části zapřou o stěnu vyvrtaného otvoru a vyvíjejí optimální přídržnou sílu [84-86].

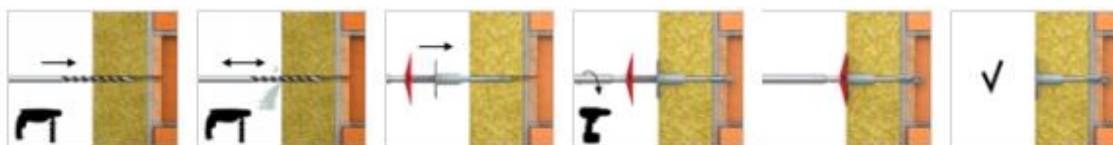
1.7.2.2. Šroubovací talířové hmoždinky

Obecně platí, že šroubovací hmoždinky, v porovnání se zatloukacími, mají spolehlivější montáž a vyšší únosnost, ale na druhou stranu jsou dražší a jejich montáž je pomalejší. Je doporučeno je používat při kotvení do dutých tvárníc nebo pórobetonů, kvůli únosnosti a spolehlivosti. Ale je možné je použít ke kotvení všech podkladů.



Obrázek 33: Šroubovací hmoždinka plastová [84]

Postup montáže je znázorněn na obrázku č. 34. Nejprve se vyvrtá otvor o požadované délce a průměru a očistí se. Pak se umístí montážní zařízení do plastové hlavy šroubu a zasune se do vyvrtaného otvoru. Při zašroubování hmoždinky musí být udržována kolmá poloha k fasádě. Nakonec se dotáhne talířová hmoždinka tak, aby odpovídala předepsané hloubce kotvení. Vyrábí se s průměrem dříku 8 mm a délce až 455 mm [84-86].



Obrázek 34: Postup montáže šroubovací hmoždinky [84]

Nízkého prostupu tepla, který je pro dosažení pasivního standardu nutný, se dá docílit buď zvolením izolačního materiálu s nízkým součinitelem tepelné vodivosti nebo zesílením jeho tloušťky. Nejběžnější cestou pro dosažení nízkého prostupu tepla, menšího než $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, je zesílení tloušťky izolačního materiálu, nejčastěji až na 400 mm. Taková tloušťka s sebou ale nese velké zatížení kladené na kotvy, které kotva musí přenést. Zároveň však na trhu není moc kotev, které by měly dostačující délku.

4. PRAKTICKÁ ČÁST

Vybrané tepelně izolační materiály používané k tepelnému zaizolování pasivních budov popsané v teoretické části, mohou být hodnoceny a vzájemně mezi sebou porovnávány z několika hledisek. Záleží vždy na konkrétním požadavku a hodnotícím kritériu, protože je velmi mnoho druhů izolace, a to i v případě izolačních materiálů na stejné nebo majoritní materiálové bázi, se zcela rozdílnými vlastnostmi. Při vhodně zvoleném izolačním materiálu je nezbytné zajistit integraci do celého systému, kde je kladen důraz na kotvení k nosnému systému konstrukce či řešené skladby.

4.1. Tepelně izolační materiály

K výběru tepelné izolace, která by měla být vhodná k zaizolování domu, je možno přistoupit na základě několika parametrů, které materiály charakterizují a vlivů, které budou po zabudování do konstrukce na materiál působit.

Tepelná izolace se do konstrukce aplikuje především z důvodu minimalizace tepelných ztrát v zimním období, ale stejně tak v teplých měsících zabraňuje přehřívání stavby. Z tohoto pohledu závisí kvalita tepelné izolace na jejím součiniteli tepelné vodivosti λ a její celkové tloušťce.

V případě letního období je ale důležité zohlednit, zda tepelná izolace bude dobře sloužit i v horkých dnech. Stejně jako v zimním období snižuje rychlost úniku tepla z teplejšího prostředí (interiéru) do chladnějšího (exteriéru), tak v letním období je tomu stejně. Tepelná izolace snižuje rychlost vniknutí tepla z teplejšího venkovního prostředí do chladnějšího jevu. Izolace tak účinně brání přehřívání vnitřních prostor.

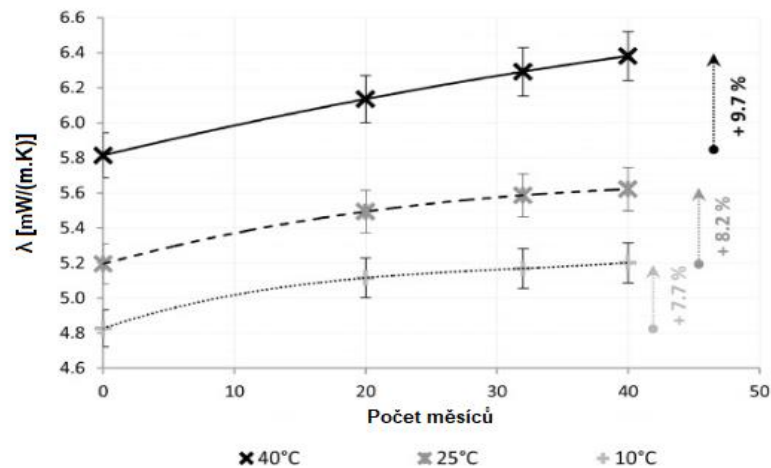
Tepelně izolační materiály jsou porovnávány především z hlediska součinitele tepelné vodivosti, který je po zabudování do konstrukce v čase ovlivněn degradací materiálu vlivem stárnutí. Změny těchto charakteristik jsou známy z mnoha studií, které jsou těmto změnám věnovány. Dalším kritériem pro srovnání může být tloušťka izolačního materiálu, která ovšem souvisí se součinitelem tepelné vodivosti a také pořizovací cena.

4.1.1. Porovnání z hlediska součinitele tepelné vodivosti

Jak bylo zmíněno, je součinitel tepelné vodivosti λ nejdůležitější a nejméně sledovaný parametr při výběru tepelné izolace, zvláště při stavbě pasivních domů. Součinitel tepelné vodivosti definuje schopnost materiálu vést teplo, respektive izolovat. A platí, čím vyšší hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím lépe vede materiál teplo, tzn. hůře izoluje. Z toho důvodu, při výběru izolačního materiálu, je snaha zvolit izolační materiál, který únik tepla sníží na minimum.

Pouze z pohledu, součinitele tepelné vodivosti, se zdá jako nejideálnější řešení vakuový izolační panele. Patří k nejmodernějším a již na trhu dostupným izolacím. Hodnota součinitele tepelné vodivosti dosahuje sice hned po výrobě skvělých $0,005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, ale postupným stárnutím roste. Na hodnotu tepelné vodivosti nemá vliv jen doba stárnutí, ale i průměrná teplota, ve které se VIP po celou dobu nachází.

Závislost součinitele tepelné vodivosti na době stárnutí je znázorněna na obrázku č. 35, který ukazuje průběh růstu součinitele tepelné vodivosti po dobu 40 měsíců, při třech různých teplotách [87].



Obrázek 35: Závislost součinitele tepelné vodivosti na době stárnutí, při různých teplotách [87]

Z grafu vyplývá, že čím nižší teplota prostředí, ve které se VIP nachází, tím bude pronikání molekul plynu skrz obal pomalejší a hodnota tepelné vodivosti nižší. Jelikož teplota v letních měsících na fasádách domů běžně vystoupá až nad $40 \text{ }^\circ\text{C}$, což má za následek nepatrné zvýšení tepelné vodivosti, při aplikaci na stavbě se přidává na externí stranu vrstva EPS.

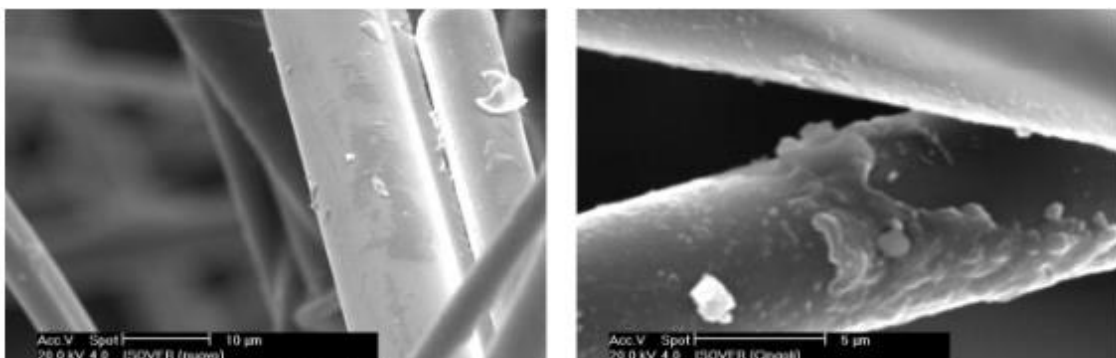
Pokud nedojde k protržení nebo jinému poškození obalu, tepelná vodivost vlivem stárnutí tedy vzroste za 5 let používání cca o 10 %, na $0,005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Během užívání dokonce může vzrůst až na $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, což je srovnatelné s pěnovým polystyrenem. Občas se z nevysvětlitelných důvodů stane, že vakuum z panelů vyprchá a VIP ztratí své tepelně izolační vlastnosti, a zatím není známo, proč se tak děje. VIP už sice na trhu dostupný je, ale firmy a jejich vývojáři se stále snaží problém s nestálou tepelnou vodivostí vyřešit.

Pokud se problémy povedou odstranit, bude VIP jeden z nejžádanějších izolačních materiálů. Je však nutné uvažovat, že takto vyrobené panely musí být zabudovány přesně do konstrukce anebo dodávány přímo ve formě stěnových panelů a nebude možné přímo na stavbě řešit např. rozměrové odchylky či jakkoli panel poupravovat [87, 88].

Dalším, si nepoužívanějším izolantem, je pěnový polystyren. Oba druhy pěnového polystyrenu, jak expandovaný, tak extrudovaný, dosahují podobných hodnot z hlediska tepelné vodivosti. Jejich tepelná vodivost se sice s vodivostí VIP nemůže rovnat, je tak desetkrát větší, ale je velmi používaný a oblíbený.

Důležité je, že tepelná vodivost pěnového polystyrenu, $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, se při správné aplikaci a dodržení postupů dané výrobcem moc nezmění. Jedna studie dokonce ukazuje, že při používání pěnového polystyrenu po dobu více než 50 let, jeho vlastnosti zůstávají nezměněny a jeho životnost uvnitř stavebních konstrukcí je stejná nebo vyšší než životnost ostatních částí stavby [89].

Druhým spotřebitelsky oblíbeným izolačním materiálem je minerální vlna. V některých případech i nezbytným řešením z pohledu požární odolnosti. Jak skelná, tak i minerální vlna má velice podobný součinitel tepelné vodivosti s pěnovým polystyrenem. Součinitel tepelné vodivosti u minerální vaty se pohybuje kolem $0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, a postupem času se nepatrně zvyšuje. Důvodem je vznik nehomogenního a nespojitého povlaku vláken (obrázek č. 36 vpravo), který snižuje hydrofobitu materiálu. Snižená schopnost odpuzovat vodu, způsobená stárnutím materiálu, má za následek zvýšení hodnoty součinitele tepelné vodivosti přibližně o 12 % za 25 let, tedy z $0,040$ na $0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Na obrázku č. 36 je vidět rozdíl mezi vlákny minerální vlny, pár dní po výrobě (vlevo) a vlákny odebrány po 25 letech z fasády rodinného domu (vpravo). Čerstvě vyrobená vlákna jsou téměř hladká, bez stop degradace. Na vláknech starých 25 let je patrný určitý stupeň degradace [90].

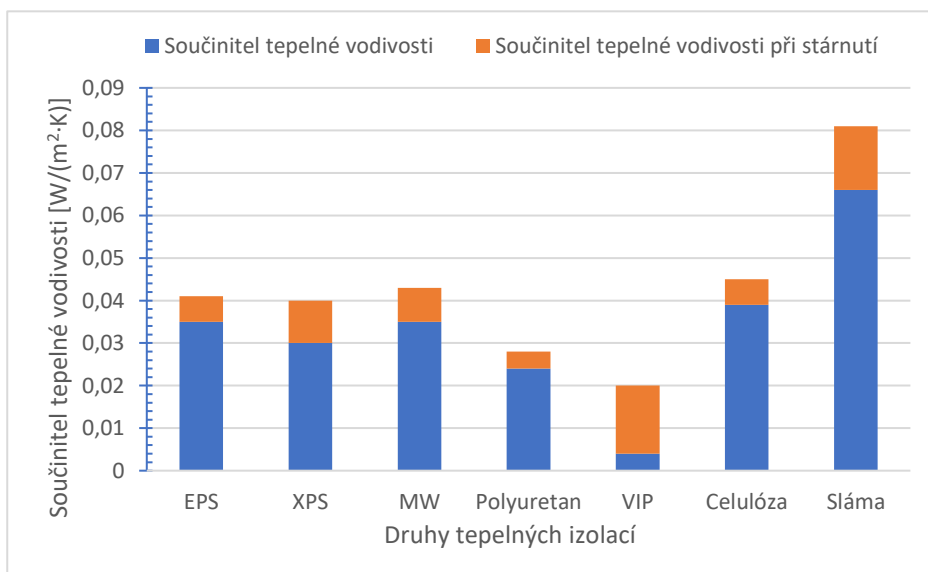


Obrázek 36: Porovnání morfologie vláken mezi novým vzorkem (vlevo) a vzorkem starým 25 let (vpravo) [90]

Ekologicky smýšlející lidé často preferují tepelné izolaci na bázi celulózy, a to jak foukané, tak plněné. Překážkou v pozitivním směru k ekologii nebývá ani vyšší hodnota tepelné vodivosti než u izolací průmyslově vyráběných. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje okolo $0,042 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Jelikož jsou celulózová vlákna přirozeně hygroskopická, má za následek absorpce vody zvýšení tepelné vodivosti. Bylo zjištěno, že při zvýšení vlhkosti o 10 % se součinitel tepelné vodivosti zvýšil o 15 %. Tedy ze $0,042$ na $0,048 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Hodnoty tepelné vodivosti, a to nejen v tomto případě, závisí na objemové hmotnosti, tj. záleží, jak moc je definovaný prostor izolantem naplněn, k jakému stlačení dojde. Obecně závisí součinitel tepelné vodivosti na objemové hmotnosti.

Výhodou je, že po vyschnutí a získání prvotního obsahu vlhkosti, součinitel tepelné vodivosti klesne na původní hodnotu. Z tohoto důvodu se menší kolísání vlhkosti v izolaci zanedbává. Izolační vlastnosti by byly neúčinné pouze tehdy, když by kapilární vlhkost celulózy byla vyšší jak 90 %. To by mohlo nastat v případě za mokra nainstalované celulóze nebo netěsnostmi potrubí, vedené skrze izolaci. Jednou z výhod je také to, že celulózová vlákna nedegradují vlivem stárnutí, tepelná vodivost se nezvyšuje [91].

Hodnoty součinitelů tepelných vodivostí jednotlivých tepelných izolací jsou navzájem porovnávány na obrázku č. 37. V obrázku jsou graficky znázorněny hodnoty tepelné vodivosti, které dosahují tepelné izolace hned po výrobě společně s hodnotami tepelné vodivosti, které tepelné izolace postupem času vlivem stárnutí mohou dosáhnout.



Obrázek 37: Součinitel tepelné vodivosti jednotlivých druhů tepelných izolací

Z obrázku č. 37 je patrné, že VIP vykazuje dle očekávání jednoznačně nejnižší tepelnou vodivost a pokud nedojde k jeho poškození, tak i po letech se s ním ostatní izolace nemohou rovnat. Dalším v pořadí, je polyuretanová pěna, která i po čase vykazuje druhou nejnižší tepelnou vodivost. Dále je vidět, že přírodní organické materiály (celulóza a sláma), se s průmyslově vyráběnými izolacemi nemohou rovnat. Hned po výrobě dosahují nejvyššího součinitele tepelné vodivosti.

Velikost součinitele tepelné vodivosti se podílí na hodnotě prostupu tepla U . U obvodových stěn pasivních domů musí být menší nebo roven $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Jak bylo zmíněno v teoretické části. Prostup tepla materiálů se vypočítá vydělením součinitele tepelné vodivosti tloušťkou materiálu. Z toho plyne, že s klesající tepelnou vodivostí, klesá i potřebná tloušťka materiálu, k dosažení požadovaného prostupu tepla.

Typ izolace	λ [W/(m.K)]	Tloušťka [mm]	Doporučená tloušťka izolace [mm]
Děrovaná cihla	0,090	600	750
Dřevo	0,180	1000	1100
Vzduch	0,026		
EPS	0,035	233	300
XPS	0,032	213	280
MW	0,040	267	300
Pěnový polyuretan	0,028	187	220
VIP	0,008	53	60
Celulóza	0,042	280	320
Sláma	0,050	333	400

Tabulka 3: Doporučené tloušťky jednotlivých tepelných izolací [36]

V tabulce č. 3 jsou uvedeny tloušťky tepelných izolantů, splňující požadavek pasivního standardu na prostup tepla s ohledem na součinitel tepelné vodivosti. Uvedené hodnoty tlouštěk izolací již samy o sobě splňují kritérium na prostup tepla. Ale jak je možné vidět v posledním sloupci, od doporučených a zároveň běžně užívaných tlouštěk izolací se moc neliší. Doporučené tloušťky jsou minimálně o 10 % větší. Z toho vyplývá, že doporučené tloušťky izolačních materiálů, v kombinaci s nosnou konstrukcí, jsou schopné splnit mnohem přísnější kritéria, než která požaduje pasivní dům.

Z tabulky je také možno vyčíst, že kdyby měl být pasivní dům pouze ze dřeva nebo z děrovaných keramických cihel bez použití jakýchkoliv tepelných izolantů, musely by mít dřevěné obvodové zdi tloušťku alespoň 1 m a zděné minimálně $\frac{3}{4}$ m. Použitím vhodného tepelného izolantu, je možné snížení tloušťky obvodových stěn až na polovinu. Toto je důležité ve smyslu zvýšení užitného prostoru snížením mocnosti stěn konstrukce při stejném obestavěném prostoru a snížením potřeby materiálu.

4.1.2. Porovnání z hlediska ceny

Dalším vybraným kritériem pro srovnání tepelně izolačních materiálů je jejich pořizovací cena, která je spojena s výběrem vhodného izolantu a jeho vlastností.

Pro přehlednost byla zvolena lehká obvodová konstrukce, viz obrázek č. 8 na straně 24, kdy jsou její vnější a vnitřní obklady stěn z hlediska velikosti součinitele tepelné vodivosti a je posuzován pouze tepelný izolant. To znamená, že hodnota prostupu tepla je ovlivněna hlavně tepelným izolantem, jeho tloušťkou a tepelnou vodivostí. Při výpočtu bylo zohledněno kritérium, které je pro pasivní domy uváděno jako maximální, a to součinitel prostupu tepla, který nesmí překročit hodnotu $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

V tabulce č. 4 jsou jednotlivé vybrané druhy tepelných izolací seřazeny vzestupně podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Ceny tepelných izolantů jsou rozdílné. Pohybují se v rozmezí desítek až několika tisíc korun za m^2 . Nejdražším tepelným izolantem je VIP, naopak nejlevnějším je sláma. Cena se odvíjí od velikosti součinitele tepelné vodivosti. Je-li třeba tepelný izolant s nízkou tepelnou vodivostí, je nutné počítat s velmi vysokými pořizovacími náklady. Proto je důležité předem zvážit, zda je tak kvalitní tepelný izolant opravdu nutný, anebo zda by bylo možné použít izolant s horšími tepelně izolačními vlastnostmi za přijatelnější cenu.

Druh tepelné izolace	Součinitel tepelné vodivosti $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Doporučená tloušťka $[\text{mm}]$	Cena $[\text{Kč}/\text{m}^2]$	Součinitel prostupu tepla $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	Součinitel prostupu tepla/cena m^2
VIP	0,008	60	6500	0,13	866,7
PUR	0,028	220	1400	0,13	178,2
XPS	0,032	280	1500	0,11	171,4
EPS	0,035	300	400	0,12	46,7
MW	0,040	300	1200	0,13	160,0
Celulóza	0,042	320	500	0,13	65,6
Sláma	0,050	400	70	0,13	8,8

Tabulka 4: Přehled součinitele tepelné vodivosti, tloušťky a ceny vybraných tepelně izolačních materiálů [36]

V tabulce je uvedena hodnota, která posuzuje druh tepelné izolace podle poměru „cena výkon“. K porovnání jednotlivých tepelných izolací bylo použita hodnota, porovnávající cenu s prostupem tepla. Jinak řečeno, jestli cena tepelně izolačního materiálu odpovídá hodnotě součinitele prostupu tepla. Z výsledných hodnot plyne, že z tohoto ohledu je nejvýhodnějším tepelně izolačním materiálem sláma. Ta je ale diametrálně odlišná od ostatních izolací a bude tedy z tohoto porovnávání vyloučena. Další v pořadí je expandovaný polystyren a hned po něm celulózová izolace.

4.2. Mechanické kotvení izolačních materiálů

Provádění kontaktního zateplovacího systému u pasivních domů se výrazně neliší od stávajících budov, kromě tloušťky tepelného izolantu. Velmi důležitou součástí zateplovacího systému je správné kotvení či spojení izolačního materiálu s nosnou či podkladní konstrukcí.

Při návrhu izolačního systému musí být zohledněno několik parametrů, podle kterých se určí způsob kotvení, typ tepelné izolace, druh, rozmístění a počet kotev. Mezi takové parametry patří poloha, tvar, výška budovy nebo větrová oblast.

Provedení kontaktního zateplení musí být provedeno odborně a s velkou pečlivostí. Jelikož poškození zateplovacích systémů z důvodu špatné montáže a nedodržení předepsaných postupů, má zásadní vliv na funkci a životnost zateplovacího systému. K nejčastějším chybám, vedoucím ke zhoršení tepelně izolačních vlastností, patří nedostatečné očištění podkladu, kdy podklad není zbaven prachu a nečistot. Dále nesprávné nanesení lepidla na izolant, lepidlo se se musí nanést po celém obvodu. Vytvoření tzv. buchet je nesprávné a způsobuje proudění vzduchu mezi izolantem a nosnou konstrukcí. Nebo chybné umístění a zakotvení hmoždinek.

Upevnění hmoždinkami dnes tvoří nedílnou součást kontaktních zateplovacích systémů. Dokonce i tam, kde by bylo možné bez problémů použít zateplovací systém lepený, se z bezpečnostních důvodů používají hmoždinky. Často potom dochází k paradoxní situaci, že na menším objektu s únosným podkladem pro lepení stojícím v husté zástavbě je použito kvalitnější mechanické upevnění než u výškové budovy stojící v otevřené krajině, kde je zateplovací systém mnohem více namáhán větrem [92, 93].

Pro návrh správné talířové hmoždinky a její délky je nutné znát druh zdiva do kterého se bude kotvit, tloušťku omítky, druh izolantu a povrchovou úpravu fasády. Počet, typ a druh hmoždinek je závislý na výšce budovy, umístění budovy, větrné oblasti a kvalitě podkladu pro kotvení, která se stanoví pro danou hmoždinku výtažnou zkouškou.

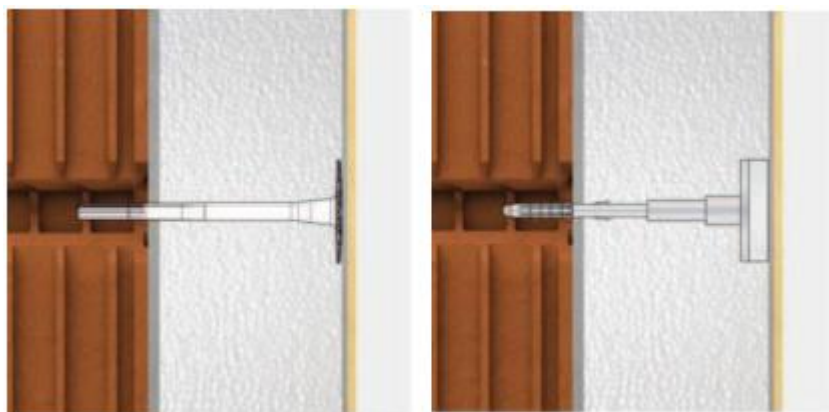
Výtažné zkoušky se řadí mezi zkoušky in-situ. Cílem těchto zkoušek je prokázat únosnost kotevního prvku v kombinaci s konkrétním podkladem. Před započítím samotného zkoušení je nutné odstranit všechny vrstvy střešního pláště, které mohou mít vliv na výtažné zkoušky. Do očištěného podkladu zakotví konkrétní typ kotevního prvku způsobem, který bude užit při realizaci. Pro měření se užívá mobilních měřících přístrojů [94].

Největším problémem ohledně kotvení není ani tak výběr hmoždinek, ale jejich správné usazení a zakotvení, a to z pohledu tepelně izolačních vlastností celého systému. Jde o to, aby nedocházelo skrz hmoždinky k únikům tepla a rozdílné kondenzaci vodní páry. Jelikož každá hmoždinka procházející skrz tepelný izolant patří k systematickým tepelným mostům. Význam tohoto tepelného mostu, zvláště u pasivních domů, stoupá ze dvou důvodů. První důvod je ten, že s rostoucí tloušťkou tepelné izolace, je nutné použít hmoždinky s kovovým rozpěrným vrutem, které jsou větším tepelným mostem. Druhým důvodem je, že bodové tepelné mosty hmoždinkami jsou závislé na tloušťce izolantu, a tak tam, kde u slabších tepelných izolantů tvořily tepelné mosty hmoždinky významově malé zhoršení tepelně izolačních vlastností, u větších tloušťek tepelného izolantu je tohle zhoršení výrazně větší [92, 93].

Při použití termografické kamery na neodborně provedené zateplení, je možné vidět bodové tepelné mosty, které jsou způsobeny špatným zakotvením a následným prostupem tepla z interiéru do exteriéru.

Intenzita tepelného toku v místě tepelného mostu je potom dána nejen typem hmoždinky a tloušťkou tepelného izolantu, ale také hloubkou ukotvení do podkladu a samozřejmě i konstrukcí, do které je hmoždinka kotvena. V takovém případě může dojít u pasivních domů k narušení správné funkce obálky domu, jejíž součástí je právě izolace a z důvodu eliminace tepelných mostů jsou cíleně voleny jednodušší tvary pasivních domů.

Správné osazení hmoždinky, které je na obrázku č. 38, lze zabránit úniku tepla skrz fasádu. Zvláště při zápusťné montáži, za použití zátky (viz obrázek č. 28 na straně 46).



Obrázek 38: Správné osazení hmoždinky – povrchová montáž (vlevo), zápusťná montáž (vpravo) [93]

U pasivních domů, kromě bodových úniků tepla, pak často hmoždinky ani nestačí držet krok se stále zvětšujícími tloušťkami používaných izolantů. V nedávné době byly používány při zateplování mnohem menší tloušťky.

Tyto problémy je možné vyřešit lepením tepelně izolačních desek pomocí lepících kotev, které se sice do podkladu kotví obdobným způsobem jako klasické hmoždinky, ale na rozdíl od nich neprochází tepelným izolantem. Na fasádě se tedy v průběhu roku hmoždinky nevykreslí a nevznikají bodové tepelné mosty. Předpokladem dlouhodobé spolehlivosti je výhradní použití vysoce kvalitních lepidel a dalších komponentů. Lepící kotvy jsou vhodné jak do betonu, na plné i děrované cihly, omítnuté i neomítnuté povrchy.

Tento typ lepení není vhodný pro tepelně izolační materiály o větších tloušťkách nebo vyšších objemových hmotnostech. Přídržnost lepidla není tak velká, aby odolala vysokému zatížení vyvozeným vahou samotného izolantu nebo nepříznivým povětrnostním podmínkám. Tento systém nepatří mezi často používané.

5. ZÁVĚR

V souladu se zadáním, je bakalářská práce zaměřena na studium tepelně izolačních materiálů v konstrukci pasivních domů. Teoretická část této práce je první částí zaměřena na problematiku, která popisuje rozdělení budov podle energetické náročnosti se zaměřením na pasivní domy včetně obecné charakteristiky pasivních domů, jejich výhod a nevýhod, základních principů a požadavků. Dále jsou popsány typy obvodových konstrukcí pasivních domů, z pohledu umístění tepelné izolace. Hlavní část této práce je věnována vybraným nejpoužívanějším a nejnámějším tepelně izolačním materiálům, se zaměřením na možné použití v konstrukcích pasivních domů. Kvůli minimálním únikům tepla nejsou pasivní domy nijak složité nebo členité, jde o jednoduchý tvar, nejčastěji čtverec nebo obdélník. Jednoduchý tvar pasivního domu přispívá i minimu složitých detailů konstrukce, které mohou představovat z hlediska provádění rizikovou část pro možný vznik poruchy konstrukce. Z pohledu skladeb obvodových stěn, by měly být stěny uspořádány tak, aby byl splněn požadavek, který říká, že součinitel prostupu tepla nesmí být větší než $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Z toho důvodu, je tepelně izolační materiál stěžejní částí celé skladby. Jsou popsány jejich fyzikální a mechanické vlastnosti, původ a možnost použití. Aby byl požadavek na prostup tepla splněn, nabývají běžně dostupné izolace, které jsou využity v obvodové konstrukci pasivního domu, tloušťku až 400 mm. V návaznosti na vybrané a popsané tepelně izolační materiály jsou v závěru teoretické části popsány varianty možných zateplovacích systémů a možnosti jejich kotvení. Rozhraní tepelně izolačních materiálů a nosné konstrukce může být často zdrojem problémů a může vést až k degradaci požadovaných funkcí, které by měly být plněny a jsou požadovány pro správně navrženém systému. Je také nutné zajistit dodržení požární bezpečnosti těchto staveb, a proto musí být tepelně izolační materiály vhodně použity, případně je nezbytné kombinovat tyto materiály s ohledem na jejich klasifikaci reakce na oheň.

Tepelné izolace uvedené v teoretické části byly následně v praktické části porovnány z hlediska součinitele tepelné vodivosti a ceny. U součinitele tepelné vodivosti je sledován na vybraných tepelně izolačních materiálech jeho vliv na prostup tepla a s tím související tloušťku izolačního materiálu. Základní charakteristickou veličinou z pohledu tepelně izolačních materiálů je součinitel tepelné vodivosti, tento parametr je základním kritériem pro hodnocení izolantu, ale ten se může v čase užívání mírně změnit. Proto byl také součinitel tepelné vodivosti, který je udáván u tepelně izolačních materiálů porovnán při vlivu stárnutí vybraných studovaných izolačních materiálů. Porovnávané tepelně izolační materiály byly vybrány ze tří skupin, ze skupiny tradičních izolantů, odkud byl vybrán a následně porovnáván expandovaný pěnový

polystyren, extrudovaný pěnový polystyren, minerální vlna a polyuretanová pěna. Ze skupiny moderních izolantů, pak vakuový izolační panel, protože tímto směrem se ubírá aktuální vývoj v oblasti tepelně izolačních materiálů, a to především k vyšším užitným vlastnostem těchto druhů izolací. A z poslední skupiny přírodních organických izolantů, byla vybrána celulóza a sláma.

Dle očekávání nejnižším součinitelem tepelné vodivosti ze všech porovnávaných izolačních materiálů disponuje vakuová izolace, které se zbylé uvedené izolanty nemohou rovnat, ale tento druh izolace byl záměrně přidán k běžně používaným tepelným izolacím, aby byl patrný rozdíl v tepelně izolačních vlastnostech tohoto druhu izolace. Následují tradiční izolace, jejichž tepelná vodivost je téměř pětkrát větší, než u moderních vakuových izolací, přesněji vakuových izolačních panelů. Nejvyšší součinitel tepelné vodivosti, podle očekávání, mají přírodní organické izolace. Vliv stárnutí může mít zásadní vliv na degradaci tepelně izolačních materiálů. K největšímu zhoršení tepelně izolačních vlastností dochází u vakuových izolací, ale i po degradaci vykazují stále nejnižší součinitel tepelné vodivosti, ve srovnání s ostatními i tradičně používanými tepelně izolačními materiály, jako je pěnový polystyren či minerální vlna.

U pasivních domů se musí dodržovat přísná pravidla. Jedním z nich je součinitel prostupu tepla, který musí být dodržen a výsledná hodnota nesmí být větší než $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Součinitel prostupu tepla je ovlivněn tepelnou vodivostí a tloušťkou izolačního materiálu, proto je potřeba pro každý izolant předem vypočítat potřebnou tloušťku. Čím je součinitel tepelné vodivosti daného materiálu menší, tím se snižuje i potřebná tloušťka. U vakuových izolací je tloušťka potřebného materiálu nejnižší, ale zároveň nejdražší, a naopak přírodní organické izolační materiály jsou nejlevnější, ale jejich potřebná vrstva je několikanásobně vyšší. Podle dostupných možností je potřeba si promyslet, jakou variantu zvolit s přihlédnutím na jejich výhody a nevýhody, ale také na potřeby konkrétního užití.

Při aplikaci tepelně izolačních materiálů u pasivních domů se nesmí podcenit ani kotvení tepelné izolace k podkladu. Výběr kotvení je ovlivněn několika důležitými faktory – výškou a umístěním budovy, zvoleným materiálem izolace a jeho tloušťkou, větrnými oblastmi a kvalitou podkladu. Dále je třeba vyvarovat se nesprávnému provedení u kotvení, které by mohlo vést ke vzniku bodových tepelných mostů, které jsou u pasivních domů velmi nežádoucí. Existuje několik možností, jak těmto tepelným mostům předejít. Příkladem je použití zátky na kotvici hmoždinku, nebo užití lepených kotev upevněných pod izolací.

Zájem o pasivní domy v posledních letech roste, jedním z důvodů je zpřísňování parametrů na energetickou náročnost budov. Dalším důvodem jsou nižší provozní náklady, které se týkají především vytápění. Možnosti výběru a řešení konstrukcí pasivních domů z pohledu materiálové základny je poměrně hodně, ale je důležité vhodně zvolit nejen tepelně izolační materiál, ale také zajistit správné provedení a vhodně zvolit ostatní části konstrukce. Spolupůsobení všech konstrukčních materiálů je nezbytné pro dosažení požadovaného výsledku.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19.května 2010 o energetické náročnosti budov. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>
- [3] Vyhláška č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov
- [4] KABELE, Karel. Změna evropské směrnice o energetické náročnosti budov (EPBD 3). TZB-info [online]. 2018, 26.9. 2018 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/17969-zmena-evropska-smernice-o-energeticke-narocnosti-budov-epbd-3#literatura03>
- [5] Zákon č. 3/2020 Sb., Zákon, kterým se mění zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů
- [6] VAVERKA, Jiří. Průkaz ENB a dotační program Zelená úsporám. TZB-info [online]. FA VUT Brno, 8.6. 2009 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/5700-prukaz-enb-a-dotacni-program-zelena-usporam>
- [7] AUDENAERT, A., S.H. DE CLEYN a B. VANKERCKHOVE. Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses. *Energy Policy* [online]. 2008, 36(1), 47-55 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.09.022. ISSN 03014215. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421507004235>
- [8] HALL, M.R., R. LINDSAY a M. KRAYENHOFF. Overview of modern earth building. *Modern Earth Buildings* [online]. Elsevier, 2012, 2012, , 3-16 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1533/9780857096166.1.3. ISBN 9780857090263. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090263500010>
- [9] SMOLA, Josef. Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů. Praha: Grada, 2011. Stavitel. ISBN 978-80-247-2995-4.
- [10] HERNANDEZ, Patxi a Paul KENNY. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings* [online]. 2010, 42(6), 815-821 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.001. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778809003247>
- [11] MARSZAL, A.J., P. HEISELBERG, J.S. BOURRELLE, E. MUSALL, K. VOSS, I. SARTORI a A. NAPOLITANO. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* [online]. 2011, 43(4), 971-979 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810004639>
- [12] SOBEK, Werner. Buildings as Renewable Power Plants: Active Houses for the Electric City. *Urban Energy Transition* [online]. Elsevier, 2018, 2018, , 131-138 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1016/B978-0-08-102074-6.00020-6. ISBN 9780081020746. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081020746000206>
- [13] ČEJKA, Michal a Jan ANTONÍN. Budovy s téměř nulovou spotřebou – porovnání energetických standardů. TZB-info [online]. 16.1. 2017 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15181-budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-porovnan-energetickych-standardu>
- [14] Pasivní domy: nulové, aktivní : 25 realizací. Praha: PRO VOBIS, 2017. ISBN 978-80-906132-7-0.
- [15] MÜLLER, Liana a Thomas BERKER. Passive House at the crossroads: The past and the present of a voluntary standard that managed to bridge the energy efficiency gap. *Energy Policy* [online]. 2013, 60, 586-593 [cit. 2020-03-26]. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.057. ISSN 03014215. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513003935>
- [16] BADESCU, Viorel a Benoit SICRE. Renewable energy for passive house heating. *Energy and Buildings* [online]. 2003, 35(11), 1077-1084 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.10.001. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778803001166>
- [17] HUDEC, Mojmír, Blanka JOHANISOVÁ a Tomáš MANSBART. Pasivní domy z přírodních materiálů. 2013. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
- [18] HUDEC, Mojmír. Pasivní rodinný dům: proč a jak stavět. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2555-0.
- [19] DAN, D., C. TANASA, V. STOIAN, S. BRATA, D. STOIAN, T. NAGY GYORGY a S.C. FLORUT. Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania. *Energy for Sustainable Development* [online]. 2016, 32, 99-109 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1016/j.esd.2016.03.007. ISSN 09730826. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0973082615301629>

- [20] RONGEN, L. Passive house design: a benchmark for thermal mass fabric integration. *Modern Earth Buildings* [online]. Elsevier, 2012, 2012, , 110-152 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1533/9780857096166.1.110. ISBN 9780857090263. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090263500058>
- [21] RONGEN, L. Passive house design: a benchmark for thermal mass fabric integration. *Modern Earth Buildings* [online]. Elsevier, 2012, 2012, , 110-152 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1533/9780857096166.1.110. ISBN 9780857090263. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090263500058>
- [22] Energeticky úsporné domy: katalog pasivních a nízkoenergetických domů. Brno: Centrum pasivního domu, 2011. ISBN 978-80-904739-1-1.
- [23] Základní principy. Pasivní domy [online]. 31.1. 2007 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/zakladni-principy/t134>
- [24] VONKA, M. Pasivní domy [online]. Poslední revize 20. 11. 2004 [citováno dne 26. 3. 2020]. URL:<<http://www.vonka.wz.cz/pasiv.htm>>
- [25] PACHECO, R., J. ORDÓÑEZ a G. MARTÍNEZ. Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, 16(6), 3559-3573 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.045. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112002286>
- [26] MORRISSEY, J., T. MOORE a R.E. HORNE. Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy* [online]. 2011, 36(2), 568-577 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.renene.2010.08.013. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148110003836>
- [27] CHWIEDUK, D. a B. BOGDANSKA. Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions. *Renewable Energy* [online]. 2004, 29(9), 1569-1581 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.renene.2003.12.018. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148104000096>
- [28] CAPELUTO, I.Guedi. Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy and Buildings* [online]. 2003, 35(3), 327-336 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00105-6. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778802001056>
- [29] DEPECKER, P, C MENEZO, J VIRGONE a S LEPERS. Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment* [online]. 2001, 36(5), 627-635 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/S0360-1323(00)00044-5. ISSN 03601323. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132300000445>
- [30] HRUBÝ, Libor. Umístění, tvar a rozvržení místností pasivního domu. In: TZB-info [online]. 7.3. 2016 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/pasivni-domy/13877-umisteni-tvar-a-rozvrzeni-mistnosti-pasivniho-domu>
- [31] SRDEČNÝ, Karel. Energeticky soběstačný dům - realita, či fikce?. Brno: ERA, 2006. 21. století. ISBN 80-736-6052-0.
- [32] HAZUCHA, Juraj. Konstrukční detaily pro pasivní a nulové domy: doporučení pro návrh a stavbu. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-4551-0.
- [33] NOVÁK, Jiří. Vzduchotěsnost obvodových pláštů budov. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 978-80-247-1953-5.
- [34] ZHENG, Xiaofeng, Edward W. COOPER, Joe MAZZON, Ian WALLIS a Christopher J. WOOD. Experimental insights into the airtightness measurement of a house-sized chamber in a sheltered environment using blower door and pulse methods. *Building and Environment* [online]. 2019, 162 [cit. 2020-05-12]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106269. ISSN 03601323. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319304792>
- [35] PRIGNON, Martin a Geoffrey VAN MOESEKE. Factors influencing airtightness and airtightness predictive models: A literature review. *Energy and Buildings* [online]. 2017, 146, 87-97 [cit. 2020-05-12]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.062. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816310738>
- [36] HAZUCHA, Juraj a Jiří CIHLÁŘ. Pasivní domy: Tepelná izolace [online]. 2007 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/03_tepelna_izolace.pdf
- [37] ŠVÁB, Václav. Pasivní a nulové budovy od návrhu K realizaci A Provozu [online]. 2013 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2605686-Pasivni-a-nulove-budovy-od-navrhu-k-realizaci-a-provozu.html>

- [38] Typy dřevostaveb [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.cedar-home.cz/drevostavby-typy.html>
- [39] ABU-JDAYIL, Basim, Abdel-Hamid MOURAD, Waseem HITTINI, Muzamil HASSAN a Suhaib HAMEEDI. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 214, 709-735 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819309845>
- [40] JELLE, Bjørn Petter. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings* [online]. 2011, 43(10), 2549-2563 [cit. 2020-05-18]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811002295>
- [41] PAPADOPOULOS, A.M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings* [online]. 2005, 37(1), 77-86 [cit. 2020-05-18]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.05.006. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778804001641>
- [42] AKTUALITY FAKTOR DIFUZNÍHO ODPORU A EKVIVALENTNÍ DIFUZNÍ TLOUŠTKA. *Izolace-info* [online]. 3.1. 2018 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/aktuality/21467-faktor-difuzniho-odporu-a-ekvivalentni-difuzni-tloustka-a.html#.XsVPWWgzblU>
- [43] Ossa, Alexandra & Miguel, Romo. (2011). Dynamic characterization of EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes - GEOTEXT GEOMEMBRANE*. 29. 40-50 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2010.06.007.
- [44] Polystyrenové izolace. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/297-polystyrenove-izolace>
- [45] EXTRUOVANÝ POLYSTYREN (XPS) - TECHNICKÉ PARAMETRY. *Izolace-info* [online]. 20.5. 2016 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/technicke-informace/zatepovani-obecne-informace/20710-extrudovany-polystyren-xps-technicke-parametry-a.html#.XsWRXWgzblU>
- [46] SDRUŽENÍ EPS ČR. Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS) Pěnový polystyren pro tepelnou a zvukovou izolaci. *TZB-info* [online]. 2012, 13.4. 2012 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8482-vlastnosti-expandovaneho-penoveho-polystyrenu-eps>
- [47] ARUN SOLOMON, A a G HEMALATHA. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. *Structures* [online]. 2020, 23, 204-213 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. ISSN 23520124. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012419301900>
- [48] CAI, Shanshan, Boxiong ZHANG a Lorenzo CREMASCHI. Moisture behavior of polystyrene insulation in below-grade application. *Energy and Buildings* [online]. 2018, 159, 24-38 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.067. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817303183>
- [49] KHOUKHI, Maatouk. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. *Energy and Buildings* [online]. 2018, 169, 228-235 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.055. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817338161>
- [50] NIKFARJAM, Nasser, Mahmoud HEMMATI, Yulin DENG a Nader TAHERI QAZVINI. Water expandable polystyrene containing cellulose nanofibrils: Expansion behavior and morphology. *Chemical Engineering Science* [online]. 2016, 156, 56-63 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1016/j.ces.2016.09.006. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000925091630481X>
- [51] ZHANG, Cailiang, Bin ZHU, Dachao LI a L. James LEE. Extruded polystyrene foams with bimodal cell morphology. *Polymer* [online]. 2012, 53(12), 2435-2442 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.polymer.2012.04.006. ISSN 00323861. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386112003217>
- [52] BUNGE, Friedhelm a Holger MERKEL. Polystyrol-Extruderschäum mit verbesserten wärmetechnischen Eigenschaften - Entwicklung, Prüfung und Anwendung. *Bauphysik* [online]. 2011, 33(1), 67-72 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1002/bapi.201110008. ISSN 01715445. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/bapi.201110008>
- [53] Minerální izolace. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/298-mineralni-izolace>

- [54] Djoumalisky, Strashimir & Ivanova, Yonka & Kotzev, Georgi & Borovanska, Irena & Tsolov, Tsolo. Multilayered sound absorbing panels based on waste materials [online]. 2013, [cit. 2020-05-19]. ISBN: 978-3-939382-11-9. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/262166828_Multilayered_sound_absorbing_panels_based_on_waste_materials
- [55] OJANEN, Tuomo. Moisture performance of mineral wool insulation products in highly insulated structures. Energy Procedia [online]. 2017, 132, 795-800 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.026. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187661021734938X>
- [56] VRÁNA, Tomáš a Kjartan GUDMUNDSSON. Comparison of fibrous insulations – Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation. Construction and Building Materials [online]. 2010, 24(7), 1151-1157 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.026. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061809004371>
- [57] WINKLER-SKALNA, Agnieszka a Beata ŁOBODA. Determination of the thermal insulation properties of cylindrical PUR foam products throughout the entire life cycle using accelerated aging procedures. Journal of Building Engineering [online]. 2020, 31 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101348. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710219327317>
- [58] ADITYA, L., T.M.I. MAHLIA, B. RISMANCHI, H.M. NG, M.H. HASAN, H.S.C. METSELAAR, Oki MURAZA a H.B. ADITIYA. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2017, 73, 1352-1365 [cit. 2020-05-21]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.034. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117302484>
- [59] KALNÆS, Simen Edsjø a Bjørn Petter JELLE. Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. Applied Energy [online]. 2014, 116, 355-375 [cit. 2020-05-21]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.032. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261913009264>
- [60] BAETENS, Ruben, Bjørn Petter JELLE, Jan Vincent THUE, Martin J. TENPIERIK, Steinar GRYNNING, Sivert UVSLØKK a Arild GUSTAVSEN. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. Energy and Buildings [online]. 2010, 42(2), 147-172 [cit. 2020-05-21]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.09.005. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778809002199>
- [61] KUCUKPINAR, Esra, Oliver MIESBAUER, Yoash CARMI, et al. Development of Transparent and Opaque Vacuum Insulation Panels for Energy Efficient Buildings. Energy Procedia [online]. 2015, 78, 412-417 [cit. 2020-05-21]. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.685. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215024170>
- [62] BOAFO, Fred Edmond, Zhaofeng CHEN, Chengdong LI, Binbin LI a Tengzhou XU. Structure of vacuum insulation panel in building system. Energy and Buildings [online]. 2014, 85, 644-653 [cit. 2020-05-21]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.055. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814005490>
- [63] NOVÁK, Petr. Vakuová izolace: Drahá nebo progresivní? Zdroj: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/izolacni-materialy-5-dil--vakuova-izolace>. Dřevostavitel [online]. 2014, 13.1. 2014 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/izolacni-materialy-5-dil--vakuova-izolace>
- [64] VILLASMIL, Willy, Ludger J. FISCHER a Jörg WORLITSCHKEK. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2019, 103, 71-84 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.040. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118308347>
- [65] 5 Most Common Thermal Insulation Materials. Thermaxxjackets [online]. 28.6. 2011 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.thermaxxjackets.com/5-most-common-thermal-insulation-materials/>
- [66] Izolace z obnovitelných surovin (dřevo, celulóza, konopí, ovčí vlna, sláma). TZB-info [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/301-izolace-z-obnovitelných-surovin-drevo-celuloza-konopi-ovci-vlna-slama>
- [67] KANGAS, Heili. NANOCELLULOSE – THE NEXT SUPER MATERIAL: Guide to cellulose nanomaterials [online]. 2014 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://cellulosefromfinland.fi/nanocellulose/>

- [68] ŠČUDLA, Miroslav. Využití slámy v soudobé architektuře a stavitelství. TZB-info [online]. 6.8. 2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/obalove-konstrukce-nizkoenergetickych-staveb/17721-vyuziti-slamy-v-soudobe-architekture-a-stavitelstvi>
- [69] POJAR, Petr. Tepelné izolace z obnovitelných surovin. Českéstavby.cz [online]. 23.2. 2015 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/tepelne-izolace-z-obnovitelných-surovin-23675.html>
- [70] Katalog modelových řešení budov při spotřebě tepla. 2001, 139 s [cit. 2020-05-25]. Dostupné také z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/1184.pdf>
- [71] Zateplovací systémy ETICS. TZB-info [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/303-zateplovaci-systemy-etics>
- [72] VAŠUT, Jan. ZATEPLENÍ DOMŮ - ZATEPLENÍ UŠETŘÍ MNOŽSTVÍ ENERGIE 2.ČÁST: Zateplování domu. Izolace-info [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/technicke-informace/zatepleni-usetri-mnozstvi-energie2/>
- [73] ŠŤASTNÝ, Pavel a Radim LOVĚTÍNSKÝ. Zateplování budov zevnitř. Realizace staveb [online]. 8.10. 2010 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zatepleni/zateplovani-budov-zevnitr>
- [74] ŠÁLA, Jiří. O vnitřním zateplení. Alternativní energie [online]. 4.5. 2001 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/540-o-vnitrim-zatepleni>
- [75] PODEŠVA, Tomáš. Příručka pro navrhování. Asting CZ [online]. 2012, duben 2012 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <http://medmax.sk/wp-content/uploads/2015/05/P%C5%99%C3%ADru%C4%8Dkapronavrhov%C3%A1n%C3%AD.pdf>
- [76] ARUN SOLOMON, A a G HEMALATHA. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. Structures [online]. 2020, 23, 204-213 [cit. 2020-05-26]. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.10.019. ISSN 23520124. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012419301900>
- [77] Dům z polystyrenu – co je to ICF systém? Stavimbydlím.cz [online]. 7.12. 2017 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://stavimbydlim.cz/dum-z-polystyrenu-co-je-to-icf-system/>
- [78] Stěnové díly, příslušenství a ceníky. ASTING.cz: *Pasivní domy* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.asting.cz/stenove-dily-tvarovky-prislusenstvi.php>
- [79] Zateplovat lze i bez hmoždinek. ASB portal [online]. Realizace staveb, 2018, 6.6. 2018 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zatepleni/zateplovat-lze-i-bez-hmozdinek>
- [80] TALÍŘOVÉ HMOŽDINKY. ZOFI: svět fasádních materiálů [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://eshop.zofi.cz/talirove-hmozdinky>
- [81] DVOŘÁK, Jan. Mechanické upevnění zateplovacích systémů [online]. 2007 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/4546-mechanicke-upevneni-zateplovacich-systemu>
- [82] ZATEPLENÍ FASÁD [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.damar.cz/zatepleni-fasad/>
- [83] ORLIK-KOŽDOŇ, Božena, Artur NOWOŚWIAT, Paweł KRAUSE a Tomasz PONIKIEWSKI. A numerical and experimental investigation of temperature field in place of anchors in ETICS system. Construction and Building Materials [online]. 2018, 167, 553-565 [cit. 2020-05-28]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.039. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818302642>
- [84] Kotvení fasádní izolace. KOELNER [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.koelner.cz/produkty/kotveni-technika/kotveni-fasadni-izolace>
- [85] KOTVENÍ ETICS HMOŽDINKAMI. LIKOV: systém stavebních profilů příslušenství pro stavbu [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.likov.com/kotveni-etics-hmozdinkami>
- [86] TECHNOLOGICKÝ POSTUP ZATEPLENÍ FASÁDY - SPRÁVNÉ KOTVENÍ IZOLACE. Izolace-info [online]. 2013, 3.1. 2013 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/aktuality/9093-technologicky-postup-zatepleni-fasady-spravne-kotveni-izolace-a.html#.Xs44C2qzblU>
- [87] FANTUCCI, Stefano, Alice LORENZATI, Alfonso CAPOZZOLI a Marco PERINO. Analysis of the temperature dependence of the thermal conductivity in Vacuum Insulation Panels. Energy and Buildings [online]. 2019, 183, 64-74 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.10.002. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778818313859>
- [88] SIMMLER, H. a S. BRUNNER. Vacuum insulation panels for building application. Energy and Buildings [online]. 2005, 37(11), 1122-1131 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.06.015. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778805001064>

- [89] GNIP, Ivan, Sigitas VĚJELIS a Saulius VAITKUS. Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10°C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50°C. Energy and Buildings [online]. 2012, 52, 107-111 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.05.029. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877881200285X>
- [90] STAZI, F., F. TITTARELLI, G. POLITI, C. DI PERNA a P. MUNAFÒ. Assessment of the actual hygrothermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls. Energy and Buildings [online]. 2014, 68, 292-304 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.032. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813006142>
- [91] LOPEZ HURTADO, Pablo, Antoine ROUILLY, Virginie VANDENBOSSCHE a Christine RAYNAUD. A review on the properties of cellulose fibre insulation. Building and Environment [online]. 2016, 96, 170-177 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.09.031. ISSN 03601323. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132315301311>
- [92] VADY ZATEPLENÍ způsobené špatnou a neodbornou montáží [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.zofi.cz/vady-zatepleni-zpusobene-spatnou-a-neodbornou-montazi>
- [93] DVOŘÁK, Jan. Mechanické upevnění zateplovacích systémů. TZB-info [online]. 17.12. 2007 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/4546-mechanicke-upevneni-zateplovacich-systemu>
- [94] Porovnání kotevních prvků pro stabilizaci povlakové hydroizolace plochých střech. TZB-info [online]. 20.7. 2015 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/strechy/12997-porovnaní-kotevních-prvku-pro-stabilizaci-povlakove-hydroizolace-plochých-strech>
- [95] LORENC, Petr. Lepicí kotvy: Dokonalá tepelná ochrana budov metodou lepení. TZB-info [online]. 5.6. 2006 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3342-lepici-kotvy-nove-reseni-v-kotveni-zateplovacich-systemu>

7. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Porovnání energetické náročnosti jednotlivých budov [13]	14
Obrázek 2: Schématické znázornění principů fungování pasivního domu [14].....	18
Obrázek 3: Vliv tvaru objektu na tepelné ztráty [30].....	19
Obrázek 4: Druhy tepelných izolací [32]	20
Obrázek 5: Skladba masivní kontaktní obvodové stěny [36]	22
Obrázek 6: Skladba lehké neprovětrávané obvodové stěny [38]	23
Obrázek 7: Skladba lehké provětrávané obvodové stěny [37].....	23
Obrázek 8: Extrudovaný pěnový polystyren [44].....	27
Obrázek 9: Expandovaný pěnový polystyren [45].....	27
Obrázek 10: Struktura EPS pod elektronickým mikroskopem – a) perle, b) rozříznuté perle a uzavřené buňky, c) uzavřené buňky [43].....	28
Obrázek 11: Závislost tepelné vodivosti na obsahu vlhkosti v EPS [46].....	28
Obrázek 12: a) kompaktní kuličky CNFWEPS, b) průřez kompaktní kuličkou, c) místo kapiček vody, d) místo kapiček vody při větším zvětšení [50].....	30
Obrázek 13: Struktura XPS pod elektronickým mikroskopem [51].....	31
Obrázek 14: Mikroskopický snímek stěny XPS s uhlíkovými částicemi [98]	32
Obrázek 15: Minerální vlna - a) kamenná vlna, b) skelná vlna [53]	32
Obrázek 16: Mikroskopický snímek minerální vlny [54].....	33
Obrázek 17: Skladba vakuového izolačního panelu [58]	34
Obrázek 18: Porovnání tloušťky vakuového izolačního panelu s tradiční izolací [40].....	35
Obrázek 19: Tepelná izolace z celulósových vláken [65]	37
Obrázek 20: Nanocelulósová vlákna pod mikroskopem (vpravo) [67].....	38
Obrázek 21: Technologie použití slámy jako tepelné izolace [68]	39
Obrázek 22: Průběhy teplot v obvodové stěně pro různé typy zateplení [70].....	41
Obrázek 23: Vnější zateplení obkladem s provětrávanou mezerou [63]	42
Obrázek 24: Postup aplikace kontaktního zateplovacího systému [71].....	42
Obrázek 25: Ztracené bednění z NEOPORu [75]	44
Obrázek 26: Plastové příčky [78].....	45
Obrázek 27: Schéma kontaktního kotevního systému [82]	47
Obrázek 28: Zátka z minerální vlny [84]	47
Obrázek 29: Termografické zobrazení vnější stěny v místech, kde byly použity a) bez zátky, b) se zátkou [91]	48
Obrázek 30: Talířová hmoždinka se zatloukacím umělohmotným trnem [84].....	48
Obrázek 31: Postup montáže hmoždinky se zatloukávajícím trnem [84].....	49
Obrázek 32: Zatloukavací hmoždinka kovová [84]	49
Obrázek 33: Šroubovací hmoždinka plastová [84].....	50
Obrázek 34: Postup montáže šroubovací hmoždinky [84]	50
Obrázek 35: Závislost součinitele tepelné vodivosti na době stárnutí, při různých teplotách [87]	52
Obrázek 36: Porovnání morfologie vláken mezi novým vzorkem (vlevo) a vzorkem starým 25 let (vpravo) [90]	53
Obrázek 37: Součinitel tepelné vodivosti jednotlivých druhů tepelných izolací.....	54
Obrázek 38: Správné osazení hmoždinky – povrchová montáž (vlevo), záпустná montáž (vpravo) [93].....	58

8. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Klasifikační třídy hodnocení energetické náročnosti budovy, měrné spotřeby energie udávány v kWh / (m ² .rok) [1].....	13
Tabulka 2: Parametry tepelných izolací	40
Tabulka 3: Doporučené tloušťky jednotlivých tepelných izolací [36]	55
Tabulka 4: Přehled součinitele tepelné vodivosti, tloušťky a ceny vybraných tepelně izolačních materiálů [36]	56

9. SEZNAM ZKRATEK

PENB	Průkaz energetické náročnosti budovy
EPS	Expandovaný pěnový polystyren
WEPS	Vodou expandovaný pěnový polystyren
CNF	Celulózové nanofibrily
CNFWEPS	Vodou expandovaný pěnový polystyren obsahující celulózové nanofibrily
XPS	Extrudovaný pěnový polystyren
MW	Minerální vlna
PUR	Polyuretanová pěna
VIP	Vakuové izolační panely
OH	Objemová hmotnost
ETICS	Vnější kontaktní zateplovací systém