

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

EXPERIMENTÁLNÍ TEPELNÁ ANALÝZA
HORIZONTÁLNÍ KONSTRUKCE PLÁŠTĚ
DŘEVOSTAVBY S KAVITOU

Diplomová práce

Prohlašuji, že jsem práci „Experimentální tepelná analýza horizontální konstrukce pláště dřevostavby s kavitou“ zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 7. 4. 2015

.....

Matěj Švehlík

Děkuji tímto Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. za aktivní přístup při vedení práce a Ing. Evě Troppové za ochotnou pomoc v oblasti praktické i teoretické.

Tato práce vznikla v rámci projektu Vytvoření mezinárodního vědeckovýzkumného týmu pro vývoj nových materiálů na bázi dřeva (INWOOD), který je financován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky (EE2.3.20.0269).

V Brně, dne 7. 4. 2015

.....
Matěj Švehlík

Jméno a příjmení autora: **Ing. Bc. Matěj Švehlík**
Název práce: **Experimentální tepelná analýza horizontální konstrukce pláště dřevostavby s kavitou**

Author`s Full Name: **Ing. Bc. Matěj Švehlík**
Thesis Title: **Experimental thermal analysis of a wood building horizontal structure with air cavity**

Abstrakt

Práce je zaměřena na tepelněizolační vlastnosti dřevovláknitých desek a stavební konstrukce zahrnující nevětranou vzduchovou vrstvu. V První části byl zkoumán vliv teploty a vlhkosti na součinitel prostupu tepla a součinitel tepelné vodivosti dřevovláknitých desek. V druhé části byla vytvořena konstrukce sestávající z CLT panelu, vzduchové vrstvy a dřevovláknité desky. Následně byly experimentálně určovány dvě výše uvedené veličiny v závislosti na teplotě měření, tloušťce vzduchové mezery a emisivitě vnitřního povrchu.

Klíčová slova

tepelná vodivost, tepelný tok, tepelné izolace, dřevovláknité desky, nevětraná vzduchová mezera, dřevovláknitá izolace, měřidlo tepelného toku

Abstract

Thesis is focused on thermal-insulation properties of wood fibreboards and building structure model including non-ventilated air layer. In the first part, the influence of temperature and moisture content on heat conductivity coefficient and heat transfer coefficient of wood fibreboards was investigated. In the second part, the building structure model was prepared, consisting of CLT, air layer and wood fibreboard. Subsequently, the two above mentioned characteristics were determined in dependence on measuring temperature, air layer thickness and inner surface emissivity.

Keywords

heat conductivity, heat flow, thermal insulation, wood fibreboards, non-ventilated air layer, wood fibreboard insulation, heat flow meter

Obsah

ÚVOD	5
1. CÍL PRÁCE	6
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	7
2.1. LITERÁRNÍ PŘEHLED	7
2.1.1. MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA	7
2.1.2. SPECIÁLNÍ TEPELNĚIZOLAČNÍ MATERIÁLY	9
2.1.3. NEVĚTRANÉ VZDUCHOVÉ VRSTVY	11
2.1.4. REFLEXNÍ POVRCHY	12
2.1.5. MĚŘENÍ TEPELNĚTECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ	13
2.2. TEORIE SDÍLENÍ TEPLA	14
2.2.1. VELIČINY	14
2.2.2. MECHANISMY SDÍLENÍ TEPLA	17
2.2.3. PŘENOS TEPLA VEDENÍM	17
2.2.4. PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM	19
2.2.5. PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM	20
2.2.6. SLOŽENÉ SDÍLENÍ TEPLA	22
2.3. SPECIFIKA PŘENOSU TEPLA V NEVĚTRANÝCH VZDUCHOVÝCH VRSTVÁCH	22
2.4. STACIONÁRNÍ METODY STANOVOVÁNÍ TEPELNÉ VODIVOSTI	26
2.4.1. STANOVOVÁNÍ TEPELNÉ VODIVOSTI MATERIÁLŮ V USTÁLENÉM TEPELNÉM STAVU	27
2.4.2. METODA CHRÁNĚNÉ TEPLÉ DESKY (GUARDED HOT PLATE METHOD)	29
2.4.3. METODA MĚŘIDLA TEPELNÉHO TOKU (HEAT FLOW METER METHOD)	30
2.4.4. METODA CHRÁNĚNÉ TEPLÉ SKŘÍNĚ (CALIBRATED AND GUARDED HOT BOX)	32
2.4.5. METODA KOULE (METHOD OF GLOBE)	35
2.4.6. METODA VÁLCE (METHOD OF CYLINDER)	36
2.5. KONSTRUKCE DŘEVOSTAVEB VYUŽÍVAJÍCÍ VZDUCHOVÉ KAVITY	36
2.5.1. HORIZONTÁLNÍ OBVODOVÉ KONSTRUKCE STAVEB	38
2.5.2. HORIZONTÁLNÍ KONSTRUKCE DŘEVOSTAVEB SE VZDUCHOVOU VRSTVOU	39
2.5.3. TEPELNĚIZOLAČNÍ MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA	40
3. MATERIÁL A METODIKA	46
3.1. MATERIÁL	46
3.1.1. MASIVNÍ DŘEVĚNÉ PANELE	46
3.1.2. DŘEVOVLÁKNITÉ DESKY	47
3.1.3. REFLEXNÍ FOLIE	48
3.1. NÁVRH HORIZONTÁLNÍ KONSTRUKCE DŘEVOSTAVBY SE VZDUCHOVOU VRSTVOU	50
3.2. STACIONÁRNÍ METODA MĚŘIDLA TEPELNÉHO TOKU PRO STANOVENÍ SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI	50
3.3. METODIKA MĚŘENÍ A POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	54
3.3.1. VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY DŘEVOVLÁKNITÝCH DESEK	54

3.3.2. VLIV TEPLoty NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY STAVEBNÍ KONSTRUKCE SE VZDUCHOVOU VRSTVOU	56
3.3.3. VLIV VZDUCHOVÉ VRSTVY NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY STAVEBNÍ KONSTRUKCE	57
3.3.4. VLIV EMISIVITY POVRCHU NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY STAVEBNÍ KONSTRUKCE SE VZDUCHOVOU VRSTVOU	58
4. VÝSLEDKY A DISKUSE	59
4.1. VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY DŘEVOVLÁKNITÝCH DESEK	59
4.2. VLIV TEPLoty NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY VYTVOŘENÉ OBVODOVÉ KONSTRUKCE SE VZDUCHOVOU VRSTVOU	66
4.3. VLIV VZDUCHOVÉ VRSTVY NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY VYTVOŘENÉ OBVODOVÉ KONSTRUKCE	68
4.4. VLIV EMISIVITY POVRCHU NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY VYTVOŘENÉ OBVODOVÉ KONSTRUKCE SE VZDUCHOVOU VRSTVOU	70
ZÁVĚR	73
SUMMARY	75
INFORMAČNÍ ZDROJE	77
SEZNAM PŘÍLOH	82
PŘÍLOHA Č. 1: VLIV TEPLoty A VLHKOSTI NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY DŘEVOVLÁKNITÝCH DESEK - DATA	83
PŘÍLOHA Č. 2: VLIV TEPLoty NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY STAVEBNÍ KONSTRUKCE SE VZDUCHOVOU VRSTVOU – DATA	84
PŘÍLOHA Č. 3: VLIV VZDUCHOVÉ VRSTVY NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY STAVEBNÍ KONSTRUKCE - DATA	85
PŘÍLOHA Č. 4: VLIV EMISIVITY POVRCHU NA TEPELNĚTECHNICKÉ PARAMETRY STAVEBNÍ KONSTRUKCE SE VZDUCHOVOU VRSTVOU - DATA	86

Úvod

Současně s růstem populace na Zemi roste jak poptávka po bydlení, tak také spotřeba energie a materiálů. Vzhledem k tomu, že si lidstvo posledních pár let začíná uvědomovat, že přírodní zdroje nejsou nevyčerpatelné, a současným tempem a způsobem spotřeby dochází k jejich nenávratnému poškozování a ubývání, začíná se pozornost veřejnosti zaměřovat čím dál více na oblasti trvalé udržitelnosti a šetrného nakládání s přírodními zdroji.

Průvodním jevem tohoto trendu je také růst míry využívání přírodních stavebních materiálů ve všech oblastech lidské činnosti. Ve stavebnictví je to zejména návrat některých, již téměř zapomenutých materiálů, jako jsou nepálená hlína, sláma a konopí, ale také vznik materiálů nových - například tzv. foukané celulózové izolace či měkké dřevovláknité desky.

Dřevovláknité desky jsou ve velké míře používány jako tepelná izolace téměř pro všechny obvodové konstrukce objektu. Ve většině případů přímo tvoří rozhraní mezi konstrukcí a vnějším prostředím. Nezřídka jsou (po aplikaci povrchové úpravy – např. omítkového systému) exponovány atmosférických vlivům. Toto střídání teplot a relativní vzdušné vlhkosti má potom vliv na tepelněizolační vlastnosti dřevovláknitých materiálů. Charakteristiky jako součinitel tepelné vodivosti λ jsou výrobci udávány pouze při podmínkách absolutně suchého materiálu či při 12% vlhkosti. Informace o hodnotě λ při jiných vlhkostech a různých teplotách jsou však v podstatě nedostupné.

Zejména díky rozmachu oblíbenosti dřevostaveb jako stavebního systému pro realizaci rodinného domu a staveb menšího rozsahu se ve stavebních konstrukcích začínají objevovat vzduchové vrstvy různé tloušťky a různého umístění. Většinou jde o tzv. instalační předstěny v interiérech sloužící pro vedení rozvodů. Uzavřená vzduchová dutina o určité tloušťce však má sama osobě definovatelný tepelný odpor a je ji tedy možno využít jako součást tepelněizolační obálky domu.

Prostup tepla vzduchovou mezerou se děje vedením a zářením tepelné energie. Míra vyzařování tepla je závislá na emisivitě daného povrchu. Aplikace např. reflexních hliníkových folií o nízké emisivitě na vnitřní povrchy vzduchové mezery značně redukuje tuto zářivou složku přenosu tepla a dle tloušťky vrstvy může zásadně snížit i ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti celé konstrukce.

1. Cíl práce

Cílem práce je stanovení tepelnětechnických vlastností konstrukce pláště dřevostavby zahrnující nevětranou vzduchovou vrstvu.

Samotná analýza je prováděna při různých tloušťkách vzduchové mezery pro určení její optimální hodnoty.

Součástí práce je návrh skladby obvodového pláště na základě průzkumu možností současných dřevostaveb a také analýza vlivu okolních podmínek (teploty a relativní vzdušné vlhkosti) na v konstrukci zahrnuté dřevovláknité desky. Zkoumán byl také účinek reflexních folií.

Většina použitých materiálů je přírodního původu – na bázi dřeva. Výsledky měření jsou použitelné k návazné práci vytvoření numerického modelu.

2. Současný stav řešené problematiky

2.1. Literární přehled

Stavební průmysl společně s provozem budov jsou v současné době považovány za odvětví s nejvyšší spotřebou energie. Tento fakt, společně se snahami o snižování spotřeby energií ve všech oblastech hospodářství vede k vyššímu zájmu o stavební fyziku a energetiku v posledních letech. Dalším průvodním jevem je snaha o využívání ekologických přírodních materiálů, jakými je například dřevo a materiály na jeho bázi.

Využití dřeva je velmi výhodné z pohledu snižování emisí oxidu uhličitého a emisí skleníkových plynů (Gustavsson et al. 2006a). Ve srovnání s betonovou stavbou s sebou dřevěná konstrukce nese menší množství zabudovaných emisí oxidu uhličitého (Gustavsson et al. 2006b).

Dřevo jako stavební materiál je v současné době považováno za ekologickou alternativu klasických stavebních systémů a díky tomu je pro stavbu (zejména) rodinných domů využíváno čím dál častěji.

Podle výsledků Pajchrowskiho et. al (2014) vykazuje budova využívající konstrukční systém na bázi dřeva o 62,5 % menší dopad na životní prostředí (měřeno ekoindikátorem, zpracováno v SimaPro Analyst v.7.3.0/Impact 2002+) za celou dobu své existence včetně výroby a demolice, ve srovnání s domem postaveným klasickou zděnou technologií.

Existuje mnoho systémů obvodových konstrukcí pro využití ve výstavbě, přičemž jejich tepelněizolační vlastnosti mohou být optimalizovány změnami druhu a tloušťky tepelné izolace a nosné konstrukce (Kosny et al. 2014).

2.1.1. Materiály na bázi dřeva

Tepelná vodivost masivního dřeva závisí zejména na objemové hmotnosti a vlhkosti daného vzorku, dále na směru vláken, obsahu extraktivních látek, růstových odlišností dřeva (suky atp.) a teplotě. Absolutní vlhkost w vzorku dřeva se vypočte jako (Forest Products Laboratory, 2010):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} (\cdot 100)(\%)$$

kde m_w je hmotnost vzorku při určité vlhkosti, m_0 je hmotnost vysušeného vzorku.

Rovnovážná vlhkost dřeva umístěného v podmínkách interiéru obytného prostoru, tedy při teplotě 20 °C a vlhkosti 45 – 65 %, se podle Forest Products Laboratory (2010) pohybuje mezi cca 8,5 – 12 %.

Dřevovláknité desky o nízké hustotě jsou ve stavebnictví používány zejména jako tepelněizolační materiál obvodových stěn. Expozice tohoto pórovitého materiálu vnějším podmínkám – zejména změnám teplot a vlhkosti vede ke změnám jejich fyzikálních vlastností.

Stejně tak jako ostatní materiály na bázi dřeva zvyšují dřevovláknité desky svou vlhkost v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti okolního prostředí. Absorpce vlhkosti přitom většinou neprobíhá po stejné trajektorii, jako při vysychání (Wu a Suchland, 1995, Troppová et al. 2014). Jedním z negativních projevů změn obsahu vlhkosti v tomto izolačním materiálu je změna jeho vnějších rozměrů (tedy bobtnání a sesychání).

S rostoucí vlhkostí roste také hodnota tepelné vodivosti materiálu, jelikož hodnota součinitele tepelné vodivosti vody je řádově vyšší, než u dřevovláknitých desek. Dle ČSN EN ISO 10456 je hodnota součinitele tepelné vodivosti vody při teplotě 10 °C $\lambda = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a při teplotě 40 °C roven $\lambda = 0,63 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Pro snížení příjmu vody a vzdušné vlhkosti jsou do dřevovláknitých desek přidávány hydrofobní látky (Jiříčková et al. 2006).

Tyto přídatné látky, snižováním obsahu vlhkosti při každé úrovni relativní vzdušné vlhkosti pomáhají také zvyšovat tepelněizolační vlastnosti desek (Sonderegger a Niemz, 2012).

Výzkum tepelné vodivosti a chování dřevovláknitých desek při různých vlhkostních podmínkách včetně křivek sorpce a desorpce byl proveden Brombacherem et al. (2012) při teplotách 10 °C až 30 °C.

Vliv vlhkosti na tepelněizolační vlastnosti masivního dřeva je obdobný jako u dřevovláknitých desek. Pro snížení příjmu vlhkosti je masivní dřevo upravováno impregnací. Pro lepší průnik látky do dřeva je přitom před samotnou impregnací často zvyšována průchodnost dřevních vláken – například mikrovlnným ohřevem (Dömény et al. 2013).

Kromě vlivu obsahu vlhkosti na tepelnětechnické vlastnosti dřevovláknitých desek existuje také pozitivní korelace mezi těmito vlastnostmi a objemovou hmotností (Smith, 1997). Korelační závislost mezi hustotou a tepelnou vodivostí měkkých vláknitých desek byla analyzována v práci Sondeggera a Niemze (2012), pro dřevo buku potom

Troppovou et al. (2013). Závislost tepelné vodivosti různých materiálů o stejné objemové hmotnosti na velikosti částic byla představena Sondeggerem a Niemzem (2009).

Dřevovláknité desky o nízké hustotě obsahují menší množství dřevních vláken a naopak vyšší podíl vzduchových dutin, což má dominantní vliv na transport tepla materiálem (Bekhta a Dobrowolska, 2005). Model pro studium postupu tepla vláknitými tepelněizolačními materiály s vysokým podílem vzduchu, kde přenos tepla vedením je minimální, vytvořili Arambakam et al. (2014).

Vyšší hustota však naopak většinou znamená také lepší mechanické vlastnosti daného materiálu, na něž jsou tak kladeny dva protichůdné požadavky. Jedním z možných řešení je využití materiálu s nekonstantním hustotním profilem, ten pro MDF desky zkoumali např. Sebera et al. (2014). Vliv hustotního profilu na pevnost je obsahem práce Klímové et al. (2013).

Důležitým faktem je také pozitivní vztah mezi tepelnou vodivostí a teplotou – toto může mít významný vliv zejména v letním období při expozici fasády slunečnímu záření (Gur`ev a Khainer, 1999).

Vliv teploty a obsahu vlhkosti na tepelnou vodivost izolačních dřevovláknitých desek je zkoumán metodou měřidla tepelného toku (heat flow meter) v práci Mathiase et al. (1997). Růst efektivního součinitele tepelné vodivosti vláknitých materiálů byl prokázán v rozmezí teplot 20 – 900 °C (Wulf et al. 2007).

2.1.2. Speciální tepelněizolační materiály

Tepelněizolační materiály – tepelné izolace, můžeme obecně definovat jako pevnou látku tvořící pórovitou strukturu vyplněnou ve většině případů vzduchem. Čím menší jsou tyto póry, respektive čím menší je objemová hmotnost, tím lepších tepelněizolačních vlastností materiál dosahuje.

Při běžném atmosférickém tlaku tak izolace na bázi aerogelu s póry o průměru menším, než 0,001 mm dosahuje hodnot součinitele tepelné vodivosti $\lambda = 0,012 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro srovnání u izolace s póry o průměru 0,1 mm je tato hodnota dvojnásobná. Stejně hodnoty, tj. $\lambda = 0,012 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ lze pro izolaci s póry průměru 0,1 mm dosáhnout při sníženém tlaku na 0,001 bar, tedy na jednu tisícinu tlaku atmosférického. (Baethens et al. 2010a).

Nejlepších tepelněizolačních vlastností v současné době dosahují vakuové panely, jejichž tepelná vodivost se pohybuje kolem $0,0042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Zabývají se jimi například Baetens et al. (2010a), nebo Wakili et al. (2011).

Největším negativem tohoto materiálu je však riziko poškození a následné ztráty podtlaku. V takovém případě může tepelný tok panelem za jinak stejných podmínek stoupnout z hodnot blízkých nule až ke $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Xie et al. 2010).

Ke zvyšování tlaku (ztrátě podtlaku) v panelu dochází stejně tak vlivem stárnutí – zejména povrchové folie. Po 50 letech se tak v závislosti na materiálu obalové folie snižuje tlak v panelu o cca $0,010 - 0,170 \text{ bar}$. Po 100 letech je to $0,050 - 0,320 \text{ bar}$ (Baetens et al. 2010a). V závislosti na ztrátě tlaku, zvyšování vlhkosti a dalších parametrech tuto autoři udávají zvýšení součinitele tepelné vodivosti po 50 letech o $0,001 - 0,013 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a po 100 letech o $0,002 - 0,016 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Vzhledem ke konstrukci panelů a velmi nízké tepelné vodivosti v místech vnitřních vakuových dutin však o to více nabývají na významu tepelné mosty vznikající vnitřními přepážkami (Waikili et al. 2011).

Alternativou vakuových panelů mohou být panely plněné vzduchem, nebo netečnými plyny jako například argon, nebo krypton. Na tepelnou vodivost těchto panelů však nemá vliv pouze látka vyplňující vnitřní prostředí, ale také uspořádání vnitřní struktury – zejména počet, a tloušťka vzduchových kavit (Baetens et al. 2010a). Dle druhu použitého plynu může být tepelná vodivost dutinového panelu ve srovnání s variantou plnění vzduchem znatelně snížena, jak ukazuje následující tabulka.

Tab. 1: Efektivní součinitel tepelné vodivosti dutinového panelu v závislosti na jeho tloušťce a druhu výplňového plynu (Baethens et al. 2010a).

Tloušťka panelu (mm)	Efektivní součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		
	Vzduch	Argon	Krypton
25	0,0350	0,0213	0,0106
50	0,0380	0,0226	0,0106

Kromě výplňového plynu je určujícím prvkem tepelné vodivosti těchto izolačních panelů také počet vzduchových kavit ve směru tloušťky panelu. Podle výzkumu Baethense et al. (2010b) je pro panel plněný argonem smysluplné zvyšování počtu kavit cca na hodnotu 15, přičemž při dalším zvyšování jejich počtu dochází stále ke snižování součinitele tepelné vodivosti, ovšem pouze limitně k hodnotě $\lambda = 0,02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tepelněizolační vlastnosti těchto panelů plněných netečnými plyny nedosahují hodnot vakuových panelů a stále existuje riziko úniku plynu. Toto riziko lze eliminovat (za zvýšení

tepelné vodivosti) nevyužitím plynu či vakua, ale jednoduše vložení nevětrané vzduchové mezery do skladby konstrukce.

2.1.3. Nevětrané vzduchové vrstvy

Při optimální tloušťce tepelné izolace je možné přidáním 20 mm vzduchové mezery snížit součinitel prostupu tepla o více, než 4 %, přičemž s klesající tloušťkou tepelné izolace se tento efekt zvyšuje (Mahlia et al. 2010).

Tloušťka vzduchové vrstvy je rozhodujícím faktorem způsobu šíření tepla kdy s jejím zvyšováním postupně klesá vliv sálání a roste vliv proudění. Optimální tloušťka vzduchové mezery je obsahem prací více autorů (Xie et al. 2014, Armando et al. 2010, Mahlia a Iqbal 2010).

Norma ČSN EN ISO 6946 udává následující součinitele prostupu tepla vzduchových mezer o dané tloušťce.

Tab. 2: Hodnoty součinitele prostupu tepla vzduchových vrstev různých tlouštěk (ČSN EN ISO 6946).

Tloušťka vzduchové vrstvy (mm)	Součinitel prostupu tepla (W.m-2.K-1)	
	Tok tepla nahoru	Tok tepla dolů
0	0,00	0,00
5	9,09	9,09
10	6,67	6,67
15	6,25	5,88
20	6,25	5,56
50	6,25	4,76

Mavromatidis et al. (2012) užili metodu chráněné tepelné skříně (angl. guarded hot box) k určení tepelné vodivosti sestav různých vláknitých materiálů a hliníkových folií umístěných mezi dvě vzduchové mezery o různých tloušťkách. Dle jejich měření bylo dosaženo největšího tepelného odporu konstrukce při tloušťce každé z mezer 30 mm. Zvyšování tloušťky vzduchových mezer nad tuto hodnotu vedlo k poklesu celkového tepelného odporu díky růstu vlivu proudění při přenosu tepla. Vliv tloušťky vzduchové kavity na tepelnou vodivost výřezu obvodové stěny byl zkoumán stejnou metodou (guarded hot box) v práci Avirama et al. (2001).

Tloušťka vrstvy souvisí také s počtem uzavřených vzduchových kavit, přičemž s jejich růstem (při zachování celkové tloušťky) se předpokládá pokles tepelného toku konstrukcí.

Dle Antara (2010) se pro cihelný blok se vzduchovými mezerami při změně jejich počtu ze 2 na 6 (a adekvátním zmenšení tloušťky) zvýší tepelný odpor o více, než 20 %.

Přenos tepla vzduchovou vrstvou se děje prouděním a zářením. Vliv různých faktorů na tepelnotechnické vlastnosti 20 mm silné vzduchové mezery ohraničené z jedné strany masivním dřevěným panelem a z druhé strany sádkartonovou deskou byly zkoumány v práci Traorého et al. (2011). Při měření tepelného toku přes tuto konstrukci a simulaci vlivu jednotlivých procesů přenosu tepla byla celková energie přenesená stěnou za určitou dobu v případě zanedbání radiace tepla o více, než 35% nižší, než při jejím zahrnutí. Při měření vlivu emisivity bylo zjištěno, že i při hodnotě $\varepsilon = 0,2$ je podíl přenosu energie zářením nezanedbatelný – až 20 %.

Na tepelnou vodivost konstrukce obsahující vzduchové vrstvy má vliv krom jiného také způsob proudění vzduchu v těchto vrstvách. Ten je možno charakterizovat například Rayleighovým číslem vyjadřujícím míru přirozeného proudění vzduchu, přičemž se zvyšujícím se Rayleighovým číslem klesá tepelný odpor takovéto konstrukce (Xie et al. 2014).

Tepelný odpor uzavřené vzduchové kavity tloušťky 20 mm při různých sklonech a různých směrech tepelného toku byl zkoumán např. Saberem (2012). Výsledky prokázaly, že horizontální umístění s tepelným tokem směřujícím vzhůru představuje pro teplo nejméně propustnou variantu. Stejná pozice s tepelným tokem směřujícím dolů měla naopak nejmenší tepelný odpor. Vertikálně umístěna konstrukce ležela hodnotou tepelného odporu mezi oběma zmíněnými variantami.

2.1.4. Reflexní povrchy

Dalším způsobem, jak zlepšit tepelnotechnické vlastnosti konstrukce bez zvyšování tloušťky tepelné izolace je vložení reflexní folie, která ovlivňuje radiční složku přenosu tepla. Například obvodová stěna bez tepelné izolace s 20mm vzduchovou mezerou, rozdělena reflexní folií na dvě poloviny vykazuje stejnou hodnotu koeficientu prostupu tepla jako stejná obvodová stěna s 20 mm tepelné izolace (Vrachopoulos et al. 2012).

Dle Antara (2010) se pro cihelný blok se vzduchovými mezerami zmenšuje tepelný odpor se snižující se emisivitou povrchů těchto vzduchových mezer. U cihelného bloku s jednou vzduchovou kavitou došlo snížením emisivity vnitřního povrchu vzduchové mezery z $\varepsilon = 1$ na $\varepsilon = 0,1$ ke zvýšení hodnoty tepelného odporu konstrukce o téměř 38 %. Pro variantu s pěti vzduchovými mezerami činilo toto zvýšení tepelného odporu pouze 30 %, ovšem rozdíl ve variantě jedné vzduchové mezery s $\varepsilon = 1$ a pěti vzduchových mezer s $\varepsilon = 0,1$ činil celých 60,6 % snížení tepelného odporu.

Tento výzkum dokazuje, že implementací vzduchových mezer v součinnosti s využitím povrchů o nízké emisivitě lze znatelně zlepšit tepelněizolační vlastnosti dané konstrukce bez navýšení objemu tepelněizolačního materiálu.

Vícevrstvá tepelná izolace sestávající s překližkových desek, reflexních folií a vzduchových vrstev byla studována v práci Pasztoryho et al. (2011). Tepelná vodivost byla teoreticky vypočtena metodou konečných prvků a poté srovnána s výsledky experimentálního měření stacionární metodou.

2.1.5. Měření tepelnotechnických vlastností

Tepelnou vodivost obecně lze zjišťovat dvěma metodami – stacionárními a nestacionárními. Zajímavé srovnání obou způsobů nabízí Ebert a Hemberger (2011).

Nestacionární metodu pro měření tepelnotechnických vlastností dřevovláknitých desek použili např. Tippner et al. (2014), zároveň také prokázali shodu této experimentální metody s výsledky dosaženými numerickou simulací.

Stacionární metody provádí měření, při němž je vzorek v tepelně setrvalém stavu (Salmon, 2001).

Metoda měřidla tepelného toku (heat flow meter) využívá dvou kalibrovaných vysílačů tepla, mezi něž je vložen zkoumaný materiál. Je ustaven stabilní tepelný tok vzorkem nastavením požadovaného tepelného gradientu mezi studenou a teplou deskou. Efektivní součinitel prostupu tepla je následně vypočítán dle Fourierova zákona (Siau, 1984).

Yu et al. (2011) použili metodu chráněné tepelné skříně (guarded heat-box) pro určení součinitele tepelné vodivosti průmyslově vyráběných panelů na bázi dřeva.

Zhou et al. (2013) při měření dřevovláknitých desek o střední hustotě experimentálně prokázali růst součinitele tepelné vodivosti s růstem teploty a to pro hodnoty od 10 do cca 55 °C, následoval opětovný pokles do cca 95 °C a následný růst do cca 140 °C. Hodnoty pro desky absolutně suché a o vlhkosti 4% se přitom téměř nelišily. Pro vlhkost o 4 procentní body více, tedy 8%, již byla hodnota součinitele tepelné vodivosti až o 17% vyšší.

Měření tepelného toku prováděli např. Desogus et al. (2011) metodou odečítání povrchových teplot konstrukce umístěné mezi dvě prostředí s tepelným gradientem.

Mezi experimentálními metodami určování součinitele tepelné vodivosti a součinitele prostupu tepla kalibrované tepelné skříně (calibrated hot box), měřidla tepelného toku

(heat flow meter) a numerickými řešeními konstatovali Wakili a Tanner (2003) rozdíly ve výsledcích do úrovně 5 – 8 %.

Ve výsledcích různých stacionárních metod shledali Wulf et al. (2007) rozdíly do 10%, přičemž porovnávány byly: 2 rozdílná panelová měřidla konstrukce autorů (steady-state panel) dle ASTM C201, 2 přístroje chráněné tepelné desky (guarded hot plate) dle ISO 8302 ve variantě jedno i dvojjzorkové, radiální měřič tepelného toku (steady-state radial heat flow) konstrukce autorů a nestacionární metoda odporového drátu (transient hot-wire) dle DIN EN 993-14.

2.2. Teorie sdílení tepla¹

2.2.1. Veličiny

Teplo

Pokud umístíme těleso o určité teplotě do prostředí, jehož teplota není shodná s teplotou tělesa (vznikne zde určitý teplotní gradient), začnou se teploty obou materiálů vyrovnávat, dokud nedojde k dosažení rovnováhy – tj. bodu, kdy těleso i jeho prostředí mají stejnou teplotu. Teplejší systém přitom předává energii systému o nižší teplotě – dochází k přenosu energie, přičemž celková energie, která se v tomto případě mezi tělesem a jeho prostředím přenesla, se nazývá teplo (značí se obvykle Q). Jelikož teplo, stejně jako práce, vyjadřuje množství přenesené energie, je jednotkou obou těchto fyzikálních veličin joule (J).

Součinitel tepelné vodivosti

Jedná se o parametr daného materiálu a vyjadřuje množství tepla Q [W], které projde za jednotku času τ [s] jednotkovou plochou S [m²] izotermického povrchu tělesa jednotkové tloušťky d [m] při jednotkovém teplotním gradientu $grad T$ [K] (Příhoda a Rédr, 2013).

Obecně závisí na teplotě, tlaku, látce a určuje se většinou z následujícího vztahu:

$$\lambda = - \frac{dQ \cdot dd}{grad T \cdot dS \cdot d\tau} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

Jeho hodnota se stanoví dle ČSN EN ISO 10456².

¹ Zpracováno podle: Bergman a Incropera (2011), Çengel (2007), Halliday et al. (2013), Hejhálek (2014), Příhoda a Rédr (2013).

² ČSN EN ISO 10456 Stavební materiály a výrobky - Tepelně vlhkostní vlastnosti - Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot.

Sdílení tepla vedením se v plynech při obvyklých teplotách a tlacích děje přenosem kinetické energie při vzájemných srážkách molekul.

Se zvyšující se teplotou součinitel tepelné vodivosti plynů roste. Při teplotě 0 °C je u většiny plynů roven 0,01 až 0,03 W.m⁻¹.K⁻¹.

U kapalin se hodnota součinitele tepelné vodivosti pohybuje většinou v rozmezí 0,08 až 0,70 W.m⁻¹.K⁻¹ a s rostoucí teplotou většinou klesá. U vody s rostoucí teplotou naopak stoupá, a od 127 °C, kdy dosahuje maximální hodnoty 0,69 W.m⁻¹.K⁻¹, opět klesá.

Z tuhých těles jsou nejlepšími vodiči tepla kovy a polovodiče, dále následují krystalické látky a nejhůře teplo vedou látky amorfnní. U kovů vedení tepla zajišťují zejména volné elektrony a součinitel prostupu tepla se pohybuje řádově v rozmezí 10 až 10² W.m⁻¹.K⁻¹. U polovodičů se na vedení tepla kromě volných elektronů podílí také pružné kmitání atomů v mřížce. Nižší součinitel prostupu tepla ve srovnání s kovy je dán menším obsahem volných elektronů. U elektricky nevodivých látek zajišťují přenos tepla pouze atomy svým kmitavým pohybem. Tyto látky jsou tedy špatnými vodiči tepla (dobrymi tepelnými izolanty).

Specifický je proces přenosu tepla v tuhých pórovitých tělesech, jakými jsou například cihly, beton, dřevo a dřevovláknité desky. Teplo je sdíleno v tuhé hmotě, dále přechází přes póry vyplněné plynem nebo kapalinou a opět je sdíleno v pevné hmotě. Toto teplo je vyjadřováno efektivním součinitelem tepelné vodivosti λ_{ef} , který je výrazně závislý na obsahu vlhkosti. Pokud se póry, které byly původně vyplněny plynem místo toho zaplní vodou, která má vyšší tepelnou vodivost, dochází ke zvýšení i celkového efektivního součinitele tepelné vodivosti. S růstem teploty také dochází k růstu vlivu sdílení tepla sáláním v pórech látky. Součinitel tepelné vodivosti pórovitých látek se pohybuje řádově mezi 10⁻² a 10 W.m⁻¹.K⁻¹ (Příhoda a Rédr, 2013).

Tepelný odpor

Tepelný odpor se značí R a pro stejnorodé těleso (desku) o tloušťce d [m] je definován následovně (ČSN EN ISO 10456):

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ (m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{)}$$

Čím nižší je hodnota tepelného odporu tělesa, tím lépe vede teplo.

Pro tepelně stejnorodé vrstvy je tepelný odpor konstrukce definován, jako součet tepelných odporů jednotlivých stejnorodých vrstev (ČSN EN ISO 6946³):

$$R = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se} \text{ (m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{)}$$

kde R_{si} a R_{se} jsou odpory při přestupu tepla na obou stranách konstrukce (v případě obsahu vzduchové vrstvy uvnitř konstrukce nutno připočítat další dva odpory při přestupu tepla z obvodových materiálů konstrukce do vzduchové vrstvy) a n je počet stejnorodých vrstev.

Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla je definován jako převrácená hodnota tepelného odporu (ČSN EN ISO 10456):

$$U = \frac{1}{R} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

Jeho hodnotu lze vykládat jako množství tepla ve W , které projde jednotkovou plochou daného materiálu při teplotním gradientu 1 K (respektive $1 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tato hodnota je využívána zejména v oblasti stavebnictví při definování normových požadavků součinitele prostupu tepla stavebních konstrukcí. Ty jsou uvedeny v ČSN 73 0540⁴. Zde je například pro obvodovou stěnu dřevostavby uvedena požadovaná hodnota $0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a doporučená hodnota $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Emisivita

Poměr intenzity vyzařování E zkoumaného tělesa k intenzitě vyzařování E_0 černého tělesa je nazýván emisivitou a značen ε . Černé těleso vyzařuje maximální množství energie (stejně tak pohlcuje maximální množství energie na něj dopadající), jeho emisivita je rovna 1. Emisivita ostatních těles je v intervalu $(0,1)$.

Reálně se lze přiblížit až k hodnotám $\varepsilon = 0,99$ u matných a tmavých povrchů - zejména speciálních nátěrů, folií, desek atp. (Hejhálek, 2014).

Opakem jsou tělesa s reflexním (odrazivým, nízkoemisním) povrchem, jejichž emisivita se blíží nule, reálně se pohybuje v intervalu od $\varepsilon = 0,05$ do $\varepsilon = 0,2$.

³ ČSN EN ISO 6946 Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda

⁴ ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov

2.2.2. Mechanismy sdílení tepla

Sdílením, nebo přenosem tepla se označuje přenos energie z oblastí o vyšší teplotě do oblastí o teplotě nižší. Tento přenos se přitom může uskutečňovat třemi způsoby: Vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací).

V praxi většinou dochází k přenosu tepla všemi třemi způsoby zároveň, často také ve spojitosti s přenosem hmoty.

2.2.3. Přenos tepla vedením

Vedením se teplo přenáší pouze v hmotném prostředí (tj. v pevných látkách, kapalinách i plynech). Zahříváním tělesa se zvyšují amplitudy kmitů atomů, které jej tvoří a vzájemnými srážkami je tato energie předávána dalším atomům tělesa a dochází k šíření tepla.

Tepelný tok

Umístíme-li těleso mezi dvě prostředí s rozdílnými teplotami, začne tímto tělesem proudit energie (teplo) směrem od teplejšího prostředí ke studenějšímu. Množství tepla přeneseného tělesem za dobu τ nazýváme tepelným tokem. Značíme jej Φ a můžeme ho vyjádřit následující rovnicí (Cengel, 2007):

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} = \lambda \times S \times \frac{T_H - T_S}{d} \text{ (W} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

kde t je doba, po kterou tepelný tok měříme, T_H teplota teplejšího prostředí, T_S teplota studenějšího prostředí, d tloušťka tělesa (tj. kolmá vzdálenost mezi povrchem tělesa přiléhajícím ke studenějšímu prostředí a povrchem tělesa přiléhajícím k teplejšímu prostředí), λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] charakterizující materiál tělesa a Q množství tepla, které tělesem projde.

Tepelný tok vztahovaný na jednotku povrchu S izotermické plochy je označován jako hustota tepelného toku, značka q . Platí následující rovnice:

$$d\Phi = q \cdot dS$$

Vedení tepla přes více těles

Mějme dvě desková tělesa o různých tloušťkách a součinitelích tepelné vodivosti. Obě tělesa mají stejnou průřezovou plochu S , kterou se zároveň sebe navzájem dotýkají. Teploty na vnějším povrchu každé desky jsou rozdílné, a to T_H a T_S . Při dosažení ustáleného stavu je hodnota tepelného toku a teploty v libovolném místě obou těles konstantní. Tedy teplo, které projde za jednotku času jedním tělesem, projde za tutéž dobu i tělesem druhým až do vnějšího prostředí. Kdyby tomu tak nebylo, měnila by se teplota

těles a nešlo by o ustálený stav. Tepelný tok oběma tělesy je totožný a můžeme jej vyjádřit následovně (Příhoda a Rédr, 2013):

$$\Phi = \frac{\lambda_2 \times S \times (T_H - T_X)}{d_2} = \frac{\lambda_1 \times S \times (T_X - T_S)}{d_1} \quad (W \cdot s^{-1})$$

kde T_X je teplota na rozhraní obou těles a lze ji vyjádřit:

$$T_X = \frac{\lambda_1 \times d_2 \times T_S + \lambda_2 \times d_1 \times T_H}{\lambda_1 \times d_2 + \lambda_2 \times d_1} \quad (K)$$

Dosazením T_X do rovnice pro tepelný tok získáme:

$$\Phi = \frac{S \times (T_H - T_S)}{d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2} = \frac{S \times (T_H - T_S)}{R_1 + R_2} \quad (W \cdot s^{-1})$$

Kde R_1 a R_2 jsou tepelné odpory těles. Pro libovolný počet n těles:

$$\Phi = \frac{S \times (T_H - T_S)}{\sum_{j=1}^n R_i} \quad (W \cdot s^{-1})$$

Stacionární a nestacionární teplotní pole

Obecně můžeme říci, že teplota t v určitém bodě tělesa nebo látky závisí při přenosu tepla vedením na poloze tohoto bodu v rámci tělesa a na čase. Toto lze obecně zapsat:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (^\circ C)$$

kde x, y, z jsou souřadnice bodu [m], τ čas [s].

Množina hodnot teploty ve všech bodech tělesa v každém časovém okamžiku představuje teplotní pole. Pokud má na teploty vliv čas, kdy je teplota měřena, mluvíme o nestacionárním (neustáleném teplotním poli). Je-li teplota všech bodů v každém časovém okamžiku stejná, jde o teplotní pole stacionární (ustálené).

Dle toho, jestli se teplota mění pouze v jednom, dvou, nebo třech směrech (tj. je funkcí jedné, dvou, nebo tří souřadnic), označujeme teplotní pole jako jednosměrné, dvousměrné (rovinné), či trojsměrné (prostorové).

Ve všech směrech, které protínají izotermy, se teplota mění, přičemž nejrychleji se mění vždy po normále k izotermě. Změna teploty v tomto směru se nazývá gradientem teploty [K.m⁻¹](vektor směřující směrem vzrůstající teploty). Vyjádřit jej lze následovně:

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} = \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} = \nabla t \quad (^\circ C \cdot m^{-1})$$

kde ∇ je Hamiltonův operátor [m⁻¹].

Závislost hustoty tepelného toku na gradientu teploty vyjadřuje Fourierův zákon vedení tepla:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \nabla t = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

Stacionární teplotní pole je v případě bez vnitřních tepelných zdrojů popsáno konkrétní povrchovou podmínkou a Laplaceovou rovnicí:

$$\nabla^2 \cdot t = 0$$

2.2.4. Přenos tepla prouděním

Tento způsob přenosu je tedy možný pouze v prostředí, v němž může docházet k proudění částic. Takovými prostředím jsou zejména plyny a kapaliny (tj. tekutiny). Proudící tekutina při pohybu předává, nebo odebírá teplo z povrchu pevných látek, či plynů nebo kapalin. Když je tekutina ve styku s látkou vyšší teploty, je jí předávána energie, její teplota roste. Tím se tekutina (většinou) roztahuje a klesá její hustota. Ohřátá část částic tekutiny tedy stoupá a dolů se dostávají částice neohřáté o vyšší hustotě. Takto dochází k proudění tekutiny.

V ustáleném stavu všechny částice (tekutiny i pevných látek) přijímají i odevzdávají stejné množství energie a teploty ohraničujících těles, ani vzduchu v mezeře jsou v čase neměnné.

Proudění obecně může být vyvoláno samovolně – tj. většinou nerovnoměrným rozdělením hustoty tekutiny v důsledku teplotního gradientu (tzv. samovolné proudění). Nucené proudění je potom zapříčiněno vnějšími silami, např. ventilátorem, čerpadlem, atp.

V případě horizontální vrstvy bez nuceného proudění závisí konvekce na teplotě ohraničujících povrchů, tloušťce vrstvy tekutiny, vlastnostech tekutiny, na tvaru vrstvy, poloze vrstvy a směru tepelného toku. Přirozená konvekce v horizontální vrstvě vzniká pouze za předpokladu, že spodní ohraničující povrch má vyšší teplotu, než horní.

Množství tepla Q , které přejde z povrchu o ploše S a teplotě T_p do okolního prostředí tvořeného tekutinou je vyjádřeno Newtonovou rovnicí (Cengel, 2007):

$$Q = \alpha_c \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \text{ (W)}$$

kde T_∞ [K] je teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu a α_c [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] součinitel přestupu tepla prouděním, který je možno definovat jako míru, s jakou dochází k přenosu tepla mezi pevným povrchem a tekutinou a to na jednotkovou plochu

a jednotkový teplotní rozdíl. Součinitel přestupu tepla závisí na mnoha faktorech, přičemž mezi nejdůležitější patří zejména geometrie a drsnost povrchu ohraničujícího prostor s tekutinou a vlastnosti tekutiny – viskozita, hustota, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a v návaznosti na nich rychlost proudění tekutiny (Bergman a Incropera, 2011).

2.2.5. Přenos tepla zářením

Záření se uskutečňuje pomocí elektromagnetického vlnění. Tepelná energie tělesa se při tomto jevu mění v elektromagnetické vlnění, které se šíří okolím a je zase pohlcováno okolními tělesy a poté se mění zpět na energii tepelnou.

Tento přenos tepla může na rozdíl od předchozích dvou probíhat i v nehmotném prostředí – vakuu a nazývá se infračervené záření. Podílí se na přenosu tepla mezi pevnými tělesy (tedy ve vzduchu) i v látkách, které jsou převážně tvořeny vzduchem (tj. tepelné izolace). Čím vyšší je teplota, při níž se záření uplatňuje, tím vyšší je jeho podíl na celkovém přenosu tepla.

Sdílení tepla zářením se děje nejintenzivněji při vlnových délkách 10^{-4} až 10^{-7} m (tj. při frekvencích cca 10^{13} až 10^{16} Hz). Viditelná část spektra elektromagnetického záření má vlnovou délku 380 až 750 nm (tj. $400 \cdot 10^{12}$ – $790 \cdot 10^{12}$ Hz). Ta ale nemá pro přenos tepla význam, jelikož záření o těchto vlnových délkách není tělesy již tak dobře pohlcováno.

Výkon P_r , kterým dané těleso vyzařuje tepelnou energii prostřednictvím elektromagnetického záření, závisí na velikosti jeho povrchu S a na teplotě tohoto povrchu T [K] (Příhoda a Rédr, 2013). Tento výkon je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$P_r = \sigma \times \varepsilon \times S \times T^4 \text{ (W)}$$

kde $\sigma = 5,670\,373 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) je Stefan-Boltzmannova konstanta, ε je emisivita povrchu.

Výkon P_a , kterým předmět absorbuje tepelnou energii z jiného tělesa o teplotě T_0 [K] je definován:

$$P_a = \sigma \times \varepsilon \times S \times T_0^4 \text{ (W)}$$

Celkový výsledek absorbování a vyzařování tepelné energie P tělesem můžeme napsat následovně (Hejhálek, 2014):

$$P = P_a - P_r = \sigma \times \varepsilon \times S \times (T_0^4 - T^4) \text{ (W)}$$

V dutině, jejíž stěny mají všude stejnou teplotu lze prostorové tepelné záření přesně popsat Planckovým vyzařovacím zákonem. V případě, kdy ohraničující povrchy mají různou teplotu se díky povaze elektromagnetického záření velmi rychle (v podstatě okamžitě) ustálí v celé mezeře konstantní teplota záření. Číselné vyjádření této teploty je definováno vztahem (Hejhálek, 2014):

$$T_R = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_1 \cdot T_1^4 + \varepsilon_2 \cdot T_2^4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \text{ (K)}$$

Teplota T tepelného záření je přitom dosahována ve všech místech ideální vzduchové mezery (pozor, teplota T v sobě nezahrnuje vliv přenosu tepla prouděním – teplotu vzduchu v dutině).

Záření plynů

Při tepelných výpočtech se většinou uvažuje složení vzduchu, které je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 3: Složení vzduchu uvažované v tepelných výpočtech (Hašek, 1980).

	Chemická značka	Podíl dle objemu (%)	Podíl dle hmotnosti (%)
Kyslík	O ₂	21	23
Dusík	N ₂	79	77

Záření běžných plynů, jakými jsou například O₂, N₂, H₂ je velmi malé a díky tomu je možno v běžných výpočtech přenosu tepla neuvažovat záření mezi pevným tělesem a vzduchem.

Černé těleso

Těleso, které při určité teplotě vyzařuje, či pohlcuje na každé vlnové délce veškeré na něj dopadající záření, se nazývá dokonale černé těleso. Záření (pohlcování) dokonale černého tělesa závisí pouze na teplotě.

Závislost množství vyzařované energie obecného tělesa při určité vlnové délce je přitom funkcí teploty a vyzařovacích schopností tělesa.

Běžně se však intenzita vyzařované energie mění také se změnou charakteristik vyzařujícího povrchu. To je vyjádřeno doplněním emisivity do Stefan-Boltzmannova zákona, jde o upravený Stefan-Boltzmannův zákon (Bergman a Incropera, 2011):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (W)}$$

kde ε je relativní emisivita povrchu tělesa, E intenzita vyzařování.

V případě, kdy naopak na těleso dopadá slávaný paprsek o hustotě výkonu E , těleso z něj pohltí určitou část E_A , která závisí na emisivitě jeho povrchu dle následujícího vztahu:

$$E_A = \varepsilon \cdot E \text{ (} W \cdot m^{-2} \text{)}$$

Šedé těleso

Pro zjednodušení řešení úloh z oblasti přenosu tepla zářením je zavedeno a využíváno šedé těleso, které má o něco nižší intenzitu vyzařování, než těleso černé.

Nejvíce se povrchu šedého tělesa blíží povrchy kovů. I u ostatních materiálů však lze toto zjednodušení přijmout a považovat dané těleso za šedé s dostatečnou přesností výsledku. .

2.2.6. Složené sdílení tepla

V praxi dochází často ke sdílení tepla více mechanismy zároveň. Úlohy složeného sdílení tepla jsou výpočtově složité a řeší se většinou softwarovými metodami. V běžné praxi se tyto výpočty zjednodušují a řeší principem aditivnosti, jak uvádí například také ČSN EN ISO 6946. Jednotlivé způsoby přenosu tepla se zkoumají odděleně - stanoví se tepelný odpor každé stejnorodé vrstvy a následně se tyto hodnoty sečtou se zahrnutím přírodních odporů při přestupu tepla.

2.3. Specifika přenosu tepla v nevětraných vzduchových vrstvách

Sdílení tepla v nevětraných vzduchových dutinách je definováno Povrchovou podmínkou III. druhu (Fourierovou).

Ta popisuje kombinované sdílení tepla vedením v tělese a výměnou tepla s okolím na povrchu tělesa zářením a prouděním. Tento kombinovaný přestup tepla z jednoho prostředí do druhého se nazývá prostup tepla.

Pro hustotu tepelného toku můžeme psát (Bergman a Incropera, 2011):

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_{c,1}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{c,2}}} = \lambda \cdot (t_1 - t_2) \text{ (} W \cdot m^{-2} \text{)}$$

kde d je tloušťka vrstvy, t_1 a t_2 jsou teploty okolního prostředí a $\alpha_{c,1}$ a $\alpha_{c,2}$ jsou součinitele přestupu tepla ohraničujících konstrukcí.

Definujeme-li součinitel prostupu tepla U (Příhoda a Rédr, 2013):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{c,1}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{c,2}}} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$$

Rovnici tepelného toku lze vyjádřit také pomocí měrného tepelného odporu, který je součtem dílčích měrných tepelných odporů na površích a uvnitř stěny (ČSN EN ISO 6946):

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{c,1}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{c,2}} = R_{\alpha,1} + R_{\lambda} + R_{\alpha,2} \quad (m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$$

V případě složené stěny platí následující:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{c,1}} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{c,2}}} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$$

kde n je počet vrstev.

Pokud budou teploty T_1 a T_2 desek rozdílné, ustálí se ve vzduchové vrstvě deskami ohraničené teplota T a prostor tvořený oběma deskami bude mít charakter černého tělesa. Měrný tok záření I_r , který na jedné straně do mezery vstupuje z první desky, se bude rovnat toku záření na opačné straně z mezery vystupujícímu do druhé desky (Hejhálek, 2014):

$$I_r = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T^4) = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_2^4) \quad (W \cdot m^{-2})$$

kde ε_1 a ε_2 jsou emisivity povrchů obou desek.

Teplota záření ve vzduchové mezeře je rovna (Cengel, 2007):

$$T^4 = \frac{\varepsilon_1 \cdot T_1^4 + \varepsilon_2 \cdot T_2^4}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (K)$$

Teplota záření T v mezeře se nachází mezi teplotami obou desek, dle výše uvedeného vzorce závisí na jejich emisivitě a je bližší teplotě desky s vyšší emisivitou.

Pro vzduchovou vrstvu o tloušťce 100 mm a teplotách ohraničujících desek 0 °C a 20 °C je v následující tabulce uvedena výsledná teplota vzduchové vrstvy v závislosti na emisivitě povrchů.

Tab. 4: Teplota vzduchové vrstvy tloušťky 100 mm v závislosti na emisivitě teplého (20 °C) a studeného (0 °C) povrchu (Hejhálek 2014).

	Emisivita teplého ohraničujícího povrchu $\epsilon=1$ (sálavý povrch)	Emisivita teplého ohraničujícího povrchu $\epsilon=0,1$ (reflexní povrch)
Emisivita studeného ohraničujícího povrchu $\epsilon=1$ (sálavý povrch)	10,53 °C	2,01 °C
Emisivita studeného ohraničujícího povrchu $\epsilon=0,1$ (reflexní povrch)	18,35 °C	10,53 °C

V mezeře se na intervalu $x \in \langle 0, d \rangle$ ustálí lineární rozložení teplot dle následujícího vztahu:

$$T_x = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} \cdot x$$

Tepelný odpor tenké vzduchové vrstvy se vypočítá jako převrácená hodnota součtu sálavé α_r a vodivostní α_c složky přenosu tepla v jednotkách $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (ČSN EN ISO 6946):

$$R = \frac{1}{\alpha_c + \alpha_r} = \frac{R_r \cdot R_c}{R_r + R_c} \quad (m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$$

kde $R_c = 1/\alpha_c$ a $R_r = 1/\alpha_r$ vyjadřují tepelný odpor při vedení a při sálání tepla, kde α_c je součinitel přestupu tepla prouděním a α_r součinitel přestupu tepla sáláním, který je definován jako (Hejhálek, 2014):

$$\alpha_r = \frac{3 \cdot \sigma \cdot T^3}{1/\epsilon_2 + 1/\epsilon_1} = \frac{\sigma \cdot (T_1^2 - T_2^2) \cdot (T_1 + T_2)}{1/\epsilon_2 + 1/\epsilon_1} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$$

kde $\sigma = 5,670\,373 \cdot 10^{-8}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) je Stefan-Boltzmannova konstanta, T_1 a T_2 jsou teploty povrchů ohraničujících vzduchovou dutinu, T je střední termodynamická teplota ve vzduchové mezeře.

Součinitel přestupu tepla α_c nesálavé složky stanovuje ČSN EN ISO 6946 pro nevětranou stavební mezeru následovně:

$$\alpha_c = \frac{\lambda_A}{d} = \frac{0,025}{d} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$$

kde d je tloušťka mezery a $\lambda_A = 0,025$ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ je součinitel tepelné vodivosti vzduchu.

Dosazením vztahů pro α_c a α_r do vzorce pro výpočet tepelného odporu vzduchové vrstvy získáme výraz tepelného odporu vzduchové vrstvy:

$$R = \frac{1}{\frac{0,025}{d} + \frac{3 \cdot \sigma \cdot T^3}{1/\varepsilon_2 + 1/\varepsilon_1}} \quad (m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$$

Odpovídající efektivní součinitel tepelné vodivosti vzduchové vrstvy je potom roven:

$$\lambda_{ef} = \frac{d}{R} = 0,025 + \frac{3 \cdot \sigma \cdot T^3}{1/\varepsilon_2 + 1/\varepsilon_1} \cdot d \quad (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$$

Pro malé tloušťky d vzduchové mezery je sálavý člen velmi malý a převládá konvenční vodivost vzduchu $\lambda_{ef} = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a v této oblasti při konstantním $\lambda_{ef} = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ také roste tepelný odpor mezery úměrně s tloušťkou. Obecně tedy platí, že při zmenšování tloušťky vzduchové mezery se její λ_{ef} blíží hodnotě $0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Pro mezery o velkých tloušťkách d převládá sálavý člen přenosu tepla. Efektivní součinitel tepelné vodivosti pak roste úměrně s tloušťkou při zachování konstantního tepelného odporu (Hejhálek, 2014).

Následující tabulka zobrazuje hodnoty tepelného odporu a efektivního součinitele tepelné vodivosti v závislosti na emisivitě povrchů ohraničujících vzduchovou vrstvu a na její tloušťce.

Tab. 5: Vliv emisivit a teplot ohraničujících povrchů na tepelnětechnické parametry vzduchové vrstvy (Hejhálek, 2014).

t_1	5	°C				t_1	20	°C		
t_2	0	°C				t_2	0	°C		
Tloušťka mezery	20	mm				Tloušťka mezery	20	mm		
ε_1	ε_2	t_R	R_{ef}	λ_{ef}	ε_1	ε_2	t_R	R_{ef}	λ_{ef}	
1,0	1,0	2,53	0,276	0,725	1,0	1,0	10,53	0,26	0,0766	
0,1	1,0	0,47	0,593	0,337	0,1	1,0	2,04	0,58	0,0345	
1,0	0,1	4,55	0,593	0,337	1,0	0,1	18,31	0,58	0,0345	
0,1	0,1	2,53	0,672	0,298	0,1	0,1	10,52	0,66	0,0302	
Tloušťka mezery	40	mm				Tloušťka mezery	40	mm		
ε_1	ε_2	t_R	R_{ef}	λ_{ef}	ε_1	ε_2	t_R	R_{ef}	λ_{ef}	
1,0	1,0	2,53	0,333	0,1201	1,0	1,0	10,53	0,312	0,1282	
0,1	1,0	0,48	0,937	0,0427	0,1	1,0	2,07	0,905	0,0442	
1,0	0,1	4,54	0,937	0,0427	1,0	0,1	18,28	0,905	0,0442	
0,1	0,1	2,53	1,155	0,0346	0,1	0,1	10,51	1,128	0,0355	

2.4. Stacionární metody stanovování tepelné vodivosti

V České republice jsou v současné době platné následující normy zabývající se stanovováním součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném stavu:

- **ČSN 72 7306 Stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů a výrobků** (Determination of thermal conductivity of building materials and products). Vydána 1995.
- **ČSN 72 7010 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Společná ustanovení** (Determination of thermal conductivity coefficient for materials in stabilized thermal state. Common provisions). Vydána 1989, harmonizována. Změna Z1 vydána 1995.
- **ČSN 72 7011 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda válce** (Determination of Steady State Thermal Conductivity of Materials. Method of cylinder). Vydána 1994.
- ČSN 72 7012. Vydána 1994.
 - **ČSN 72 7012-1 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Deskové metody. Část 1: Společná ustanovení** (Determination of steady state thermal conductivity of materials. Hot plate methods. General principles)
 - **ČSN 72 7012-2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 2: Metoda chráněné teplé desky** (Determination of Steady State Thermal Conductivity of Materials. Hot Plate Methods. Guarded Hot Plate Method)
 - **ČSN 72 7012-3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku** (Determination of Steady State Thermal Conductivity of Materials. Hot Plate Methods. Heat Flow Meter Method)
- **ČSN 72 7013 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda koule** (Determination of Steady Thermal Conductivity of Materials. Method of globe). Vydána 1994.
- **ČSN 72 7011 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda válce** (Determination of Steady Thermal Conductivity of Materials. Method of cylinder). Vydána 1994.
- **ČSN 72 7014 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Vyhodnocení zkoušek** (Determination of Steady State Thermal Conductivity of Materials. Evaluating of Tests). Vydána 1994.

- **ČSN EN ISO 8990 Tepelná izolace - Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu - Kalibrovaná a chráněná teplá skříň** (Thermal insulation - Determination of steady state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box). Vydána 1998

2.4.1. Stanovování tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu⁵

Ustálený tepelný stav je možno definovat jako takový, v němž se teploty (respektive tepelné toky) ve všech místech soustavy s časem nemění. Teploty v soustavě jsou tedy s časem konstantní a závisí kromě materiálových a geometrických vlastností měřené soustavy pouze na místě, v němž jsou měřeny a na neměnných okrajových podmínkách.

Určujícími parametry součinitele tepelné vodivosti λ dle normy ČSN 72 7306 jsou vlastnosti vzorku a okrajové podmínky, které je nutno vždy uvádět jako nedílnou součást měření:

- objemová hmotnost vysušeného vzorku
- střední teplota v průběhu měření
- hmotnostní vlhkost materiálu

Součinitel tepelné vodivosti se má stanovovat pro vzorky bez povrchových úprav, jsou-li tepelně vodivé (kovové folie), či jsou-li celistvé a mohly by zapříčinit vznik vzduchových dutin mezi deskami přístroje a povrchem vzorku. Při práci se vzorky o objemové hmotnosti nižší, než 50 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) musí být během měření zabráněno výměně vzduchu mezi vláknitou strukturou vzorku a měrným prostorem. To bylo provedeno také v této práci, kdy měřený materiál byl vždy zabalen do tenké plastové folie.

Ke každému měření musí být zpracován protokol, který obsahuje většinou následující údaje:

- rozměr vzorku a jeho popis
- hmotnost před a po zkoušce
- objemová hmotnost v suchém stavu
- hmotnostní vlhkost vzorku před a po zkoušce
- průměrné teploty obou povrchů a jejich rozdíl
- střední teplotu vzorku
- provozní podmínky (použitá metoda, zkušební zařízení, atp.)
- součinitel tepelné vodivosti vyjádřen ve $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

⁵ Zpracováno dle ČSN 72 7306 Stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů a výrobků, ČSN 72 7010 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Společná ustanovení (včetně změny Z1).

- jméno odpovědného pracovníka, datum měření, časový záznam měření

Přičemž laboratorní vlhkost vzorku dle ČSN 72 7010 představuje rovnovážnou sorpční vlhkost vzorku při střední teplotě vzduchu 20 ± 3 °C a relativní vlhkosti vzduchu 55 ± 5 %, při běžném atmosférickém tlaku. Zkušební vlhkostí je potom aritmetický průměr okamžitých hmotnostních zkušebních vlhkostí vzorku stanovených bezprostředně před a po měření hodnot součinitele tepelné vodivosti.

Suchý vzorek se získá sušením při teplotě 105 °C až 110 °C do dosažení ustáleného hmotnostního stavu, tedy do stavu, kdy úbytek hmotnosti za dobu nejméně 24 h nepřesáhne 0,1 %. Rozměry se stanovují dle příslušné normy, hmotnost vzorku se kontroluje před i po měření a to s přesností 0,1 % jeho jmenovité hmotnosti.

Metoda stanovení tepelné vodivosti i okrajové podmínky by měly být zvoleny podle charakteru zkoušeného materiálu a v návaznosti na požadovanou interpretaci výsledků zkoušky (př.: střední teplota odpovídající provozním podmínkám).

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti vzorku v ustáleném stavu se používají metody dělí následujícím způsobem:

- podle tvaru zkoušených vzorků
 - rovinné ohraničené desky
 - ohraničené válce
 - koule
- podle dosažitelné přesnosti měření (respektive dle principu měření)
 - primární
 - sekundární

Níže jsou uvedeny metody stanovování součinitele tepelné vodivosti materiálů při běžných teplotách. Pro studium materiálů při vysokých teplotách (do 1250 °C) se využívá metoda topného drátu. Ta je založena na měření teplotního nárůstu v čase v určité pevně dané vzdálenosti od lineárního zdroje tepla uloženého mezi dvě zkušební tělesa. Její užití pro tepelněizolační materiály je nevhodné a také se nejedná o stacionární metody a proto není blíže popsána.

2.4.2. Metoda chráněné teplé desky (Guarded Hot Plate Method)⁶

Podstata metody spočívá v dosažení ustáleného tepelného stavu a pomocí výpočtu stanovení součinitele tepelné vodivosti na základě průměrných hodnot následujících parametrů:

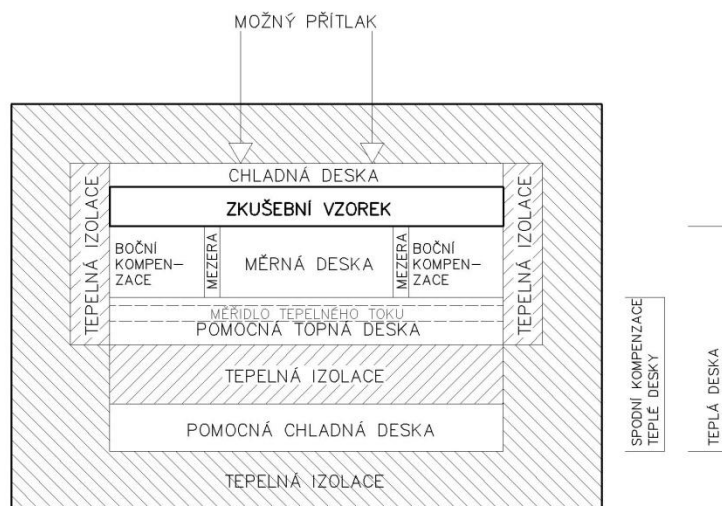
- elektrický příkon topného elementu měrné desky
- účinná plocha teplé desky
- teplota vztažné plochy teplého a chladného povrchu zkušební vzorku
- tloušťka zkušební vzorku (či dvojice vzorků)

Při měření musí být zajištěn co nejnížší teplotní spád mezi měrnou deskou a kompenzačními částmi – pomocnou topnou deskou.

Podle počtu zkušebních vzorků nutných pro stanovení součinitele tepelné vodivosti se rozlišují dvě uspořádání měření:

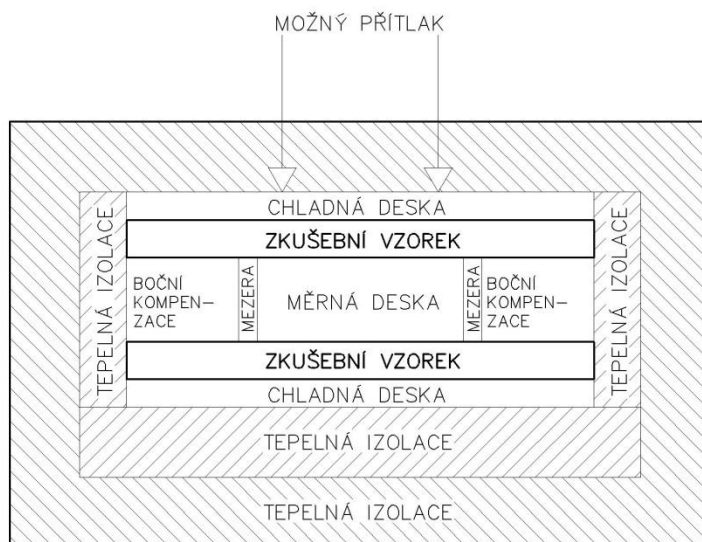
- jednovzorkové (asymetrické)
- dvojevzorkové (symetrické)

Schémata uspořádání jsou na následujících dvou obrázcích.



Obr. 1: Jednovzorkové (asymetrické) uspořádání (ČSN 72 7012-2).

⁶ Zpracováno dle ČSN 72 7012-2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 2: Metoda chráněné teplé desky.



Obr. 2: Dvojvzorkové (symetrické) uspořádání (ČSN 72 7012-2).

2.4.3. Metoda měřidla tepelného toku (Heat Flow Meter Method)⁷

Podstatou metody je navodit ve zkušebním vzorku ustálený tepelný stav a stanovit výpočtem součinitel tepelné vodivosti na základě průměrných hodnot:

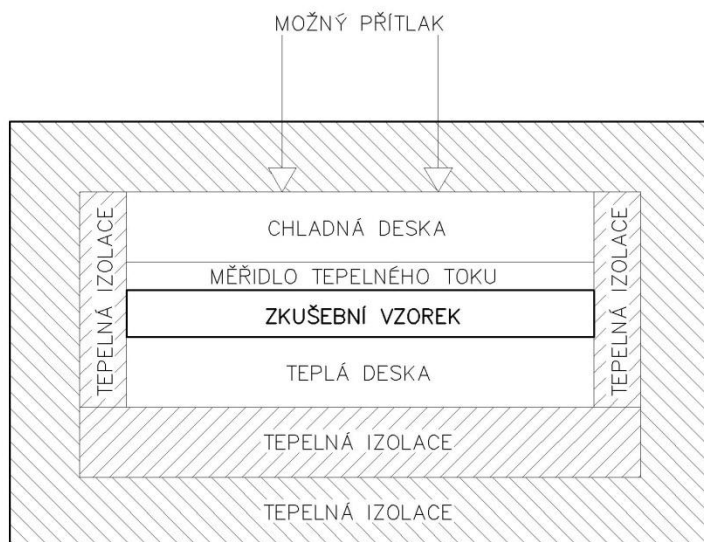
- výstupního napětí měřidla tepelného toku
- kalibrační konstanty měřidla
- teploty vztažné plochy teplé strany vzorku
- teploty vztažné plochy chladné strany vzorku
- tloušťky zkušebního vzorku

Podle počtu zkušebních vzorků potřebných pro provedení měření a dle umístění měřidla rozlišujeme následující uspořádání zařízení:

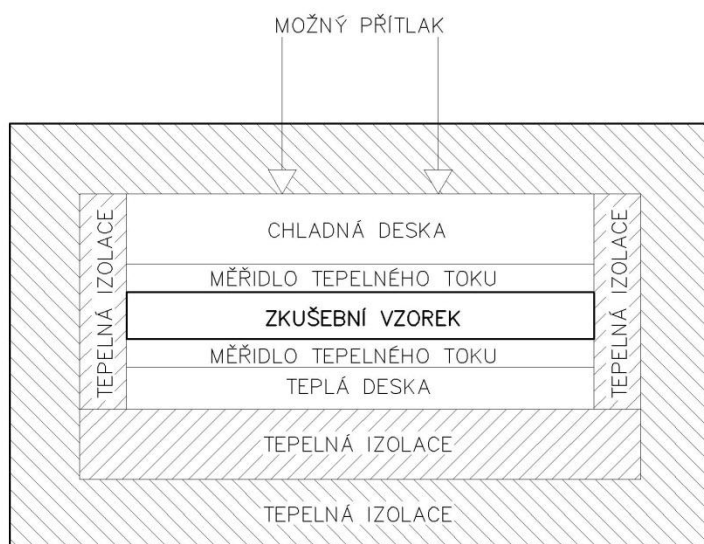
- symetrické jednovzorkové
- asymetrické jednovzorkové
- symetrické dvojvzorkové

Schémata uspořádání měřicích zařízení jsou zobrazena na následujících nákresech.

⁷ Zpracováno dle ČSN 72 7012-3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku.



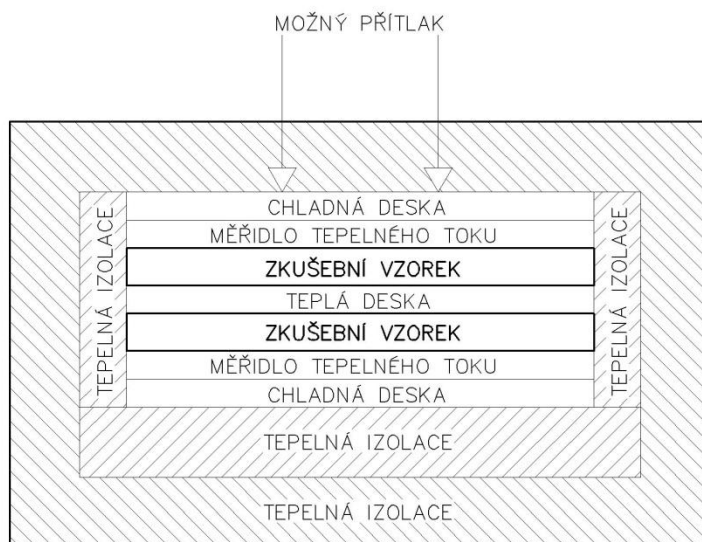
Obr. 3: Jednovzorkové asymetrické uspořádání (ČSN 72 7012-3).



Obr. 4: Jednovzorkové symetrické uspořádání (ČSN 72 7012-3).

Před provedením měření musí být vykonána kontrola měřicího zařízení změřením referenčního vzorku o známé hodnotě součinitele tepelné vodivosti. Odchylka naměřené hodnoty od hodnoty známé nesmí přesáhnout 1,5 %.

Minimální počet teplotních snímačů pro měření povrchové teploty v místě vztažné plochy zkušební vzorku je 3 kusy při rozměru měřidla do 300 mm a 5 kusů při rozměru měřidla do 600 mm.



Obr. 5: Dvojvzorkové symetrické uspořádání (ČSN 72 7012-3).

2.4.4. Metoda chráněné teplé skříně (Calibrated and Guarded Hot Box)⁸

Tato metoda je popsána v normě ČSN EN ISO 8990 a charakterizuje dvě metody měření daných vlastností:

- metodu kalibrované teplé skříně (calibrated hot box)
- metodu chráněné teplé skříně (guarded hot box)

Obě metody jsou vhodné pro měření vzorků ve svislé i ve vodorovné poloze. Velikost vzorku však musí být dostatečná, aby bylo umožněno vyšetření stavebních částí ve skutečném měřítku. Metody jsou určeny pro měření nestejnorodých i stejnorodých vzorků. Stejnorodé vzorky jsou přitom používány pro kalibrování přístroje.

Obecný princip měření

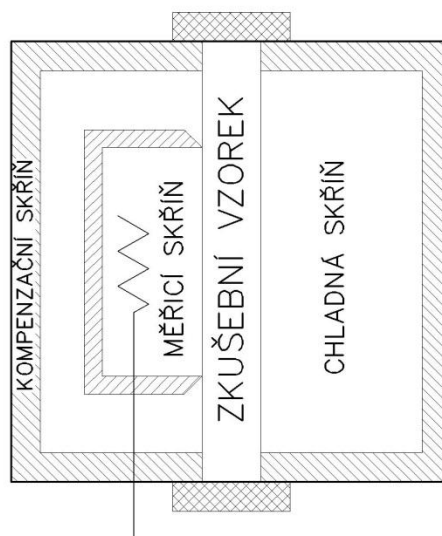
Přístroj udržuje konstantní tepelné podmínky rozdílné na obou stranách vzorku pro vytvoření stálého tepelného toku. Bezprostřední okolí obou ploch vzorku ve směru toku tepla tvoří většinou vzduch při atmosférickém tlaku – ke vzorku tedy přímo nepřiléhá topná deska ani měřicí deska. Z těchto měření jsou vypočteny tepelnětechnické vlastnosti vzorku.

⁸ Zpracováno dle ČSN EN ISO 8990. Tepelná izolace - Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu - Kalibrovaná a chráněná teplá skříň.

Zkušební zařízení s chráněnou teplou skříní

U této sestavy je měřicí skříň umístěna v kompenzační skříní. Zdejší prostředí je řízeno tak, aby byl minimalizován boční tepelný tok vzorkem a ztrátový tepelný tok stěnami měřicí skříně.

Chyby vlivem velikosti obvodu měřicí skříně jsou dány bočním ztrátovým tepelným tokem, nevyvážeností mezi měrnou a kompenzovanou plochou nebo díky přítomnosti nestejnorodostí.

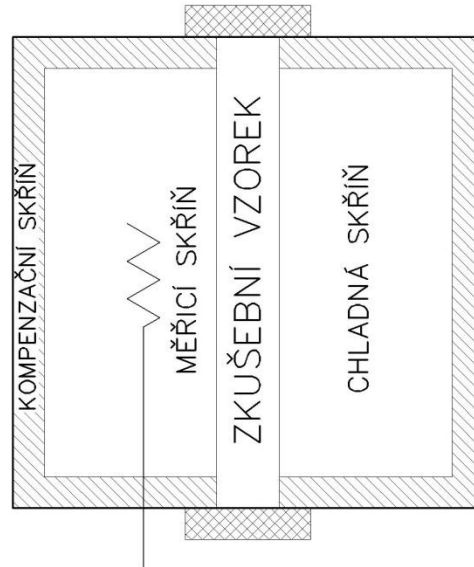


Obr. 6: Konstrukční uspořádání s chráněnou teplou skříní (ČSN EN ISO 8990).

Zkušební zařízení s kalibrovanou teplou skříní

V tomto případě je měřicí skříň obklopena prostředím s danou teplotou, která nemusí být stejná, jako teplota v měřicí skříní. Ztrátový tepelný tok stěnami skříně je velmi malý díky dostatečné tepelné izolaci skříně. Celkový vstupní topný výkon tedy musí být upraven o ztráty stěnami měřicí skříně a okrajové ztráty vzorku. Opravy na tepelné ztráty stěnami měřicí skříně a okrajové ztráty jsou stanoveny ze zkoušek na kalibračních vzorcích o známém tepelném odporu.

Chyby na obvodu zařízení jsou způsobeny okrajovými ztrátami vzorku, které zahrnují porušení rovnoměrnosti tepelného toku na okrajích vzorku.



Obr. 7: Konstrukční uspořádání s kalibrovanou teplou skříní (ČSN EN ISO 8990).

Možná omezení zkušebních metod

Při tomto uspořádání není po obvodu měřicí skříně na obou stranách její stěny stejná povrchová teplota vzorku, ani teplota vzduchu. V důsledku toho není možno zcela eliminovat ztrátový tepelný tok stěnami skříně a boční tepelný tok vzorkem. Zkušební zařízení tedy musí být navrženo tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího vyvážení těchto ztrátových tepelných toků.

Velikost měrné plochy a měření teploty

Měrná plocha je definována

- pro zařízení s kalibrovanou teplou skříní vnitřním obvodem měřicí skříně
- pro zařízení s chráněnou teplou skříní od středu po střed nosu měřicí skříně, či při tenkých vzorcích vnitřním obvodem měřicí skříně

Minimální rozměr měrné plochy je větší z trojnásobku tloušťky vzorku nebo rozměru 1 x 1 m. Minimální rozměr zkušebního zařízení je 1,5 x 1,5 m.

Čidla teploty by měla být rovnoměrně rozmístěna na površích vzorku a umístěna proti sobě na teplé a studené straně. Počet čidel musí být dle normy takový, aby připadla minimálně dvě čidla na čtvereční metr vzorku, přičemž minimální počet čidel na povrchu je 9.

V ustáleném tepelném stavu musí být udržováno teplotní kolísání v rozsahu maximálně 1% vztaženo k rozdílu teploty vzduchu na obou stranách vzorku, a to alespoň ve dvou po sobě jdoucích měřicích periodách.

2.4.5. Metoda koule (Method of Globe)⁹

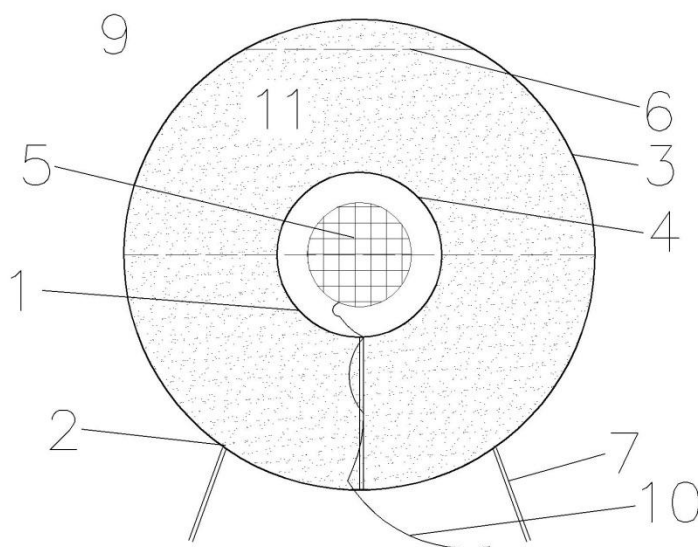
Tato metoda se používá ke stanovení součinitele tepelné vodivosti sypkých, zrnitých a beztvarych materiálů, jejichž tepelnotechnické vlastnosti jsou ze své podstaty izotropní.

Podstatou metody je navodit ve vzorku ustálený tepelný stav a na základě průměrných hodnot:

- elektrického příkonu topného elementu topné koule,
- teploty vnějšího povrchu teplé koule,
- teploty vnitřního povrchu chladné koule,
- rozměrů teplé a chladné koule

stanovit výpočtem součinitel tepelné vodivosti zkušební vzorku.

Konstrukční uspořádání měřicího zařízení je zobrazeno v následujícím obrázku.



Obr. 8: Konstrukční uspořádání měřicí koule (ČSN 72 7012-3).

Legenda k obrázku:

1 – teplotní snímače pro měření povrchové teploty vnitřního povrchu chladné koule
2 – teplotní snímače pro měření povrchové teploty vnějšího povrchu teplé koule
3 – chladná koule
4 – teplá koule
5 – elektrické topné těleso
6 – odnímatelný vrchlík
7 – stojan
8 – distanční element
9 – zkušební prostor
10 – napájení topného tělesa a vodiče teplotních snímačů povrchové teploty teplé koule
11 – měrný prostor vyplněný zkušebním vzorkem

⁹ Zpracováno dle ČSN 72 7013 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda koule.

Teplá koule se konstruuje z dobře vodivého kovu (např. Cu) o průměru obvykle 15 až 25 mm. Emisivita vnějšího povrchu musí být rovna nejméně hodnotě $\varepsilon = 0,8$.

Chladná koule musí být také z dobře vodivého kovu a její průměr bývá 200 až 350 mm. Emisivita vnitřního i vnějšího povrchu musí být nejméně $\varepsilon = 0,8$.

2.4.6. Metoda válce (Method of Cylinder)¹⁰

Metoda válce se užívá ke stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů tvarovaných k izolování potrubí a válcových těles. Rozlišuje se:

- metoda válce s chráněnými konci,
- metoda válce s kalibrovanými konci.

Vzorky mohou být tuhé, polotuhé, pružné i sypké.

Podstatou metody je navození ustáleného tepelného stavu a výpočet součinitele tepelné vodivosti na základě průměrných hodnot:

- příkonu energie pro udržování požadované teploty zkušební potrubí,
- teploty vnějšího povrchu zkušební potrubí (vnitřního povrchu vzorku),
- teploty vnějšího povrchu vzorku
- měrné délky potrubí (měrné části potrubí),
- vnitřního a vnějšího průměru vzorku
- stanovit výpočtem součinitel tepelné vodivosti

Zkušební potrubí se konstruuje z dobře vodivého kovu (např. Cu) o emisivitě vnějšího povrchu nejméně $\varepsilon = 0,8$. Celková délka potrubí je nejméně 2 m.

2.5. Konstrukce dřevostaveb využívající vzduchové kavity

Konstrukční systémy dřevostaveb je možno rozdělit následovně¹¹:

- srubové a roubené stavby
- stavby z masivního dřeva (dřevěných panelů)
- hrázděné stavby
- rámové stavby
- skeletové stavby

¹⁰ Zpracováno dle ČSN 72 7011 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda válce.

¹¹ Sestaveno dle Kolba (2011).

- speciální stavební systémy, např. zásuvný modulový systém, fošnový systém na pero a drážku, „dřevěné zdící bloky“ atp. (spotřeba dřeva různá)

Z důvodu malé spotřeby materiálu na nosnou konstrukci a nízkých (v podstatě nulových) nároků na stavební mechanizaci jsou dnes nejčastěji realizovaným konstrukčním systémem právě rámové dřevostavby.

Rámové dřevostavby

Hlavními výhodami tohoto konstrukčního systému jsou zejména menší zastavěná plocha ve srovnání s většinou jiných stavebních systémů ze dřeva i jiných materiálů (pálené či betonové cihly atd.) a možnost prefabrikace a tím zkrácení doby montáže na staveništi

Mají ovšem také několik nevýhod, přičemž za nevýhody lze považovat i některé výhody – záleží na funkci a způsobu užívání konkrétní stavby z daného systému zrealizované. Nevýhodami jsou tedy především horší zvukověizolační vlastnosti, nižší tepelná kapacita a tedy možnost přehřívání v letním období a rychlejší vychladnutí objektu při otopné přestávce, nutnost relativně precizního provedení pro zamezení problémů způsobených zejména kondenzací vlhkosti uvnitř obvodových konstrukcí.

I přes svou vyšší cenu se v poslední době čím dál více prosazují také stavby z masivních dřevěných panelů, které eliminují některé nevýhody stěnových panelů.

Dřevostavby z masivních dřevěných panelů

Tento systém představuje moderní alternativu k dříve používaným masivním dřevěným stavbám – roubeným domům a srubům.

Obvodové konstrukce jsou tvořeny plnostěnnými dřevěnými panely. Dřevěné panely mohou být spojovány a sestavovány různými způsoby dle výrobce, většinou z dřevěných lamel (prken či fošen) skládaných na sebe plochou, či z dřevěných lamel skládaných vedle sebe na plocho a překrytých další vrstvou lamel vždy pootočenou o 90° nebo méně – tyto panely mají vždy lichý počet vrstev.

Panely mohou být spojovány různými materiály a technikami, mezi nejběžnější patří:

- plošné lepení (např. u materiálu CLT),
- spojování pomocí vrutů (např. výrobek Dekpanel)
- spojování pomocí dřevěných kolíků (např. Holz 100)



Obr. 9: Stavba a interiér domu z masivních dřevěných panelů (AGROP NOVA a. s., 2014).

Masivní dřevěné panely poskytují řadu výhod ve srovnání s rámovými konstrukcemi:

- vyšší tepelná akumulace
- nižší náchylnost na možné poruchy vlivem netěsností v parobrzdné (parotěsné) obálce budovy
- vnitřní povrchy jsou tvořeny přímo dřevěnými panely – tj. masivním dřevem, což je pozitivně vnímáno zákazníky
- jejich instalace na místě stavby je velmi rychlá, za pomoci mechanizace, v řádu několika dní

Masivní dřevěné panely mají tedy předpoklady k masivnějšímu rozšíření coby stavební materiál pro běžnou občanskou výstavbu a částečné nahrazení současného podílu rámových dřevostaveb. Vzhledem k tomu, že jde o materiál používaný k tomuto účelu pouze několik posledních desetiletí, v ČR ve větší míře několik posledních let, neexistuje ještě tolik podkladů a materiálů popisující jeho chování za různých podmínek.

2.5.1. Horizontální obvodové konstrukce staveb

Stavební konstrukce tvořící tepelnou obálku budovy, tedy takové, které oddělují na jedné straně venkovní prostředí a na druhé straně prostor s uměle upravovanými tepelněvlhkostními podmínkami (interiér domu) lze dle jejich umístění ve stavbě rozdělit na:

- vertikální konstrukce
- horizontální konstrukce

Vertikální konstrukce jsou tvořeny obvodovými stěnami budovy.

Horizontální konstrukce můžeme opět rozdělit podle toho, jestli se vnější prostředí nachází nad, nebo pod danou dělicí konstrukcí. Ve střeoevropských návrhových

podmínkách uvažujeme teplotu exteriéru nižší, než interiéru a tedy tepelný tok přes střechu nahoru a přes podlahu dolů. Dle směru tepelného toku rozeznáváme:

- konstrukce s tepelným tokem směřujícím vzhůru, např.:
 - šikmé střechy
 - ploché střechy
 - podlahy lodžii a teras (jsou-li pod nimi obytné místnosti)
 - stropy nejvyšších nadzemních podlaží směřující k nevytápěné půdě (respektive podlahy nevytápěných půd nad vytápěnými místnostmi)
- konstrukce s tepelným tokem směřujícím dolů, např.:
 - podlahy místností na terénu
 - podlahy místností nad terénem
 - stropy lodžii (nachází-li se nad nimi obytné místnosti)
 - podlahy nad nevytápěnými prostory (podlaha přízemí nad nevytápěným sklepem, podlaha obytného podkroví nad nevytápěnými místnostmi)

2.5.2. Horizontální konstrukce dřevostaveb se vzduchovou vrstvou

V podstatě ve všech zmíněných konstrukcích tepelné obálky budovy se uplatňují větrané, nebo nevětrané vzduchové vrstvy.

V případě větraných vrstev je jejich cílem odvětrávat daný prostor (zejména v případě plochých a šikmých střech) a tím odvádět vlhkost, která zde může vznikat kondenzací či průnikem vody hydroizolačními vrstvami.

Účel nevětraných vzduchových vrstev je většinou poskytnutí prostoru pro vedení zdravotnických instalací a rozvodů médií (tj. rozvody elektřiny, studené a teplé užitkové vody, teplé vody pro vytápění, plynu, rozvody vzduchotechniky atp.).

Výhoda využití instalačního prostoru tkví zejména v minimalizaci nutnosti provádět otvory v nosných a pomocných prvcích pro prostup těchto instalací. Dále odpadá nutnost perforovat parobrzdnou či parotěsnící vrstvu a tím se značně snižuje riziko potenciálních problémů s kondenzací vlhkosti v konstrukci.

Druhým případem, kdy je nevětraná vzduchová mezera součástí horizontální konstrukce je v případě podlahových (stropních konstrukcí), kde nosné prvky (většinou dřevěné nosníky o určitém osovém rozestupu) mají na základě statických požadavků vyšší výšku, než je požadovaná výška tepelné izolace (či častěji zvukové izolace v případě stropu mezi obytnými podlažími).

Častým případem je též snižování podhledu – zejména ve starších budovách a rekonstrukcích či přestavbách například základních škol na bytové domy.

V poslední době je zejména v oblasti realizace dřevostaveb čím dál oblíbenější zakládání staveb nad terénem. V tom případě podlaha přízemního podlaží neleží přímo na zemině, ale ne „nadzvednuta“ nad úroveň terénu a je nutno ji tedy od vnějšího prostředí dostatečně tepelně izolovat. Zde často vzniká prostor uzavřených vzduchových mezer, v nichž jsou například vedeny instalace.

2.5.3. Tepelněizolační materiály na bázi dřeva

Obecně lze říci, že tepelněizolační materiály na bázi dřeva se vyrábí dezintegrací masivního dřeva do určitého stupně jemnosti (třísky hrubé či jemné, vlákna) a jejich opětovné spojení do podoby stavebního tepelněizolačního výrobku.

Dle aditiv, která jsou do výrobku přidávána lze ovlivňovat vlastnosti výsledného materiálu. Obecně jsou využívána zejména následující aditiva:

- retardanty hoření
- biocidní prostředky (zejména fungicidy a insekticidy)
- hydrofobizační prostředky
- různé druhy pojiv (na bázi polymerů – například melaminové pryskyřice, na bázi anorganických látek – například cement)

Tepelněizolační materiály ve formě volných vláken

V současné době (2014) jsou stále populárnější tzv. foukané izolace. Jejich podstata tkví v použití volného rozvlákněného materiálu jako tepelné izolace. Tento materiál je buď ručně vkládán, či strojově foukán do připravených stavebních dutin. Zafoukávací stroj podle zpětného tlaku také zajišťuje dosažení optimální objemové hmotnosti zafoukaného materiálu z pohledu tepelnětechnických vlastností. Příkladem může být dřevovláknitá izolace Zell od výrobce Steico o součiniteli tepelné vodivosti $\lambda = 0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ dle údajů výrobce (2015), nebo celulozová izolace Climatizer Plus od výrobce Ciur a.s. o součiniteli tepelné vodivosti $\lambda = 0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tepelněizolační materiály ve formě desek a rohoží

Některé z těchto materiálů – například cementotřískové, či cementovláknité desky mají především funkci mechanickou – statickou. Materiály užívané pro tepelné (a zvukové) izolace můžeme obecně nazvat vláknitými materiály (deskami), jelikož tyto obsahují nejvyšší podíl vzduchu a tím pádem mají také nejlepší tepelněizolační schopnosti.

Vláknité desky jsou obecně definovány jako vláknitý materiál vyrobený z lignocelulosových vláken za použití tlaku nebo určité teploty (Hrázský a Král, 2007).

Znamená to tedy, že zdrojovým materiálem k výrobě nemusí být pouze masivní dřevo, ale lze je vyrábět v podstatě ze všech rostlin.

Kromě dřeva se využívá zejména:

- konopí
- sláma
- kukuřičné klasy (likusové desky, dnes už se nepoužívají)
- kůra (většinou jako sypaná tepelně upravená kůrová drť, či korkové desky)
- len
- rákos
- cizokrajné materiály (juta, kokos, bambus, bavlna)

Nejvyužívanějším materiálem je však stále masivní dřevo.

Vláknité desky dostupné v ČR

V současné době (2014) se na trhu v České republice a okolních zemích uplatňují vláknité desky zejména následujících typů dle použitého materiálu (s uvedením příkladů výrobců):

- dřevovláknité rohože (objemová hmotnost cca 50 kg.m⁻³) a dřevovláknité desky (objemová hmotnost cca 200 až 300 kg.m⁻³)
 - STEICO
 - AGEPAN SYSTEM
 - INSOWOOL s.r.o. - PAVATEX
- konopné rohože (objemová hmotnost cca 40 kg.m⁻³) a konopné panely (objemová hmotnost cca 100 kg.m⁻³)
 - CANABEST s.r.o. – CANABEST
 - VICARIUS s.r.o. – Vicarius Canna
- lněné rohože (objemová hmotnost cca 40 kg.m⁻³)
 - Juta, a.s. – NATURIZOL
- slaměné desky (objemová hmotnost cca 370 kg.m⁻³)
 - EKOPANELY SERVIS s.r.o. – Ekopanel

Tab. 6: Porovnání parametrů vybraných vláknitých izolací (Zpracováno dle údajů výrobců – Steico, Vicarius, Juta, Ekopanely, 2014).

	CANAFLEX (STEICO)	CANNA PANEL (VICARIUS)	NATURIZOL (JUTA)	EKOPANEL (EKOPANELY)
Materiál	KONOPI	KONOPI	LEN	SLÁMA
Objemová hmotnost (kg.m^{-3})	40	100	60	379
Faktor difuzního odporu μ	2	3,9	5,7	9,7
Součinitel tepelné vodivosti deklarovaný λ ($\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	0,04	0,039	0,039	0,099
Měrná tepelná kapacita c_p ($\text{J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$)	1700	-	1550	-

Výroba dřevovláknitých desek

Na základě způsobu výroby lze desky rozdělit do dvou skupin, a to na (Hrázský, Král 2007):

- desky vyrobené mokrým procesem - Při formování třískového koberce mají vlhkost vyšší, než 20 % a dělí se dle hustoty na:
 - izolační desky (hustota do 400 kg.m^{-3}) – Užívají se zejména jako tepelně, či zvukově izolační materiál.
 - polotvrdé desky (hustota 400 až 900 kg.m^{-3}) – Užívají se jako konstrukční materiál s nízkými nároky na statickou únosnost, například ve výrobě nábytku.
 - tvrdé desky (hustota nad 900 kg.m^{-3}) – Užívají se jako konstrukční materiál s nízkými nároky na statickou únosnost.
- desky vyrobené suchým procesem – Při formování třískového koberce mají vlhkost nižší, než 20 % a jejich výsledná hustota se pohybuje v rozmezí 600 až 800 kg.m^{-3} . Užívají se zejména jako konstrukční materiál v nábytkářství.

Při výrobě mohou být přidávány hydrofobizační prostředky pro zajištění odolnosti výsledného výrobku proti vodě. Většinou je této vlastnosti dosahováno tekutým parafínem

či parafínovou emulzí. Takto ošetřené dřevovláknité desky (např. od výrobce STEICO) mohou být při instalaci na vnější povrchy stavby po dobu několik měsíců vystaveny povětrnostním vlivům bez negativního efektu na jejich vlastnosti. Při použití tohoto materiálu jako nadkroevní izolace je poté možno vynechat pojistnou difuzní folii pod střešní krytinou. Hydrofobizovaná dřevovláknitá deska nahrazuje její funkci po celou dobu životnosti stavby (výrobce STEICO).

Tepelnětechnické vlastnosti

V následující tabulce jsou uvedeny základní vlastnosti vybraných dřevovláknitých desek a rohoží sloužící k tepelněizolačním účelům. Tabulka je seřazena dle objemové hmotnosti jednotlivých materiálů. Je jasně vidět trend zvyšujícího se součinitele tepelné vodivosti spolu s růstem objemové hmotnosti.

Rohože s objemovou hmotností kolem 50 kg/m³ jsou použitelné pouze jako výplňová izolace do nosného rámu.

Desky o objemové hmotnosti od cca 110 kg/m³ jsou již dostatečně pevné pro aplikaci na rovný podklad a zatížení dalšími vrstvami konstrukce.

Od hodnoty objemové hmotnosti kolem 140 kg/m³ jsou desky použitelné i pro aplikaci na žebrový či jiný nesouvislý povrch a jejich pevnost je dostatečná pro plnění funkce finálního povrchu (např. po omítnutí tvoří tato deska fasádu stavby).

Desky o vyšší objemové hmotnosti (cca nad 200 kg/m³) mají většinou vyšší pevnost v tlaku a menší stlačitelnost, což je předurčuje k použití do podlahových vrstev, nebo coby nadkroevních střešních izolací.

Hlavní předností dřevovláknitých desek ve srovnání s dalšími tepelněizolačními materiály je zejména jejich vysoká tepelná kapacita a tedy schopnost například snížit v letních měsících přehřívání podkrovních prostor.

Díky jejich homogenitě je deklarovaný součinitel tepelné vodivosti dosahovaný v podstatě v kterémkoli místě desky. Udávané hodnoty součinitele tepelné vodivosti jsou vždy ve směru kolmém na rovinu desky.

Porovnání základních vlastností tepelněizolačních dřevovláknitých desek dle jejich objemové hmotnosti nabízí následující tabulka. Z ní je jasně patrný trend rostoucí hodnoty součinitele tepelné vodivosti s růstem objemové hmotnosti.

Tab. 7: Porovnání technických parametrů dřevovláknitých desek (Zpracováno dle údajů výrobců – Steico, Insowool, Agepan, 2014).

	PAVAFLEX (INSOWOOL) / FLEX (STEICO)	PAVATHERM (INSOWOOL)	SPECIAL DRY (STEICO)	THERM (STEICO)	DIFFUTHERM (INSOWOOL) / PROTECT - L (STEICO)	PAVABOARD (INSOWOOL)	THD P+D (AGEPAN)	ISOLAIR (INSOWOOL) / SPECIAL (STEICO)	UNIVERSAL (STEICO)	UDP P+D (AGEPAN)
Objemová hmotnost (kg.m⁻³)	50	110	143	160	190	220	230	240	270	270
Faktor difuzního odporu μ	2	3	5	5	5	5	3	5	5	5
Součinitel tepelné vodivosti deklarovaný λ (W.m⁻¹.K⁻¹)	0,038	0,038	0,042	0,04	0,043	0,046	0,047	0,047	0,045	0,051
Měrná tepelná kapacita c_p (J.kg⁻¹.K⁻¹)	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100

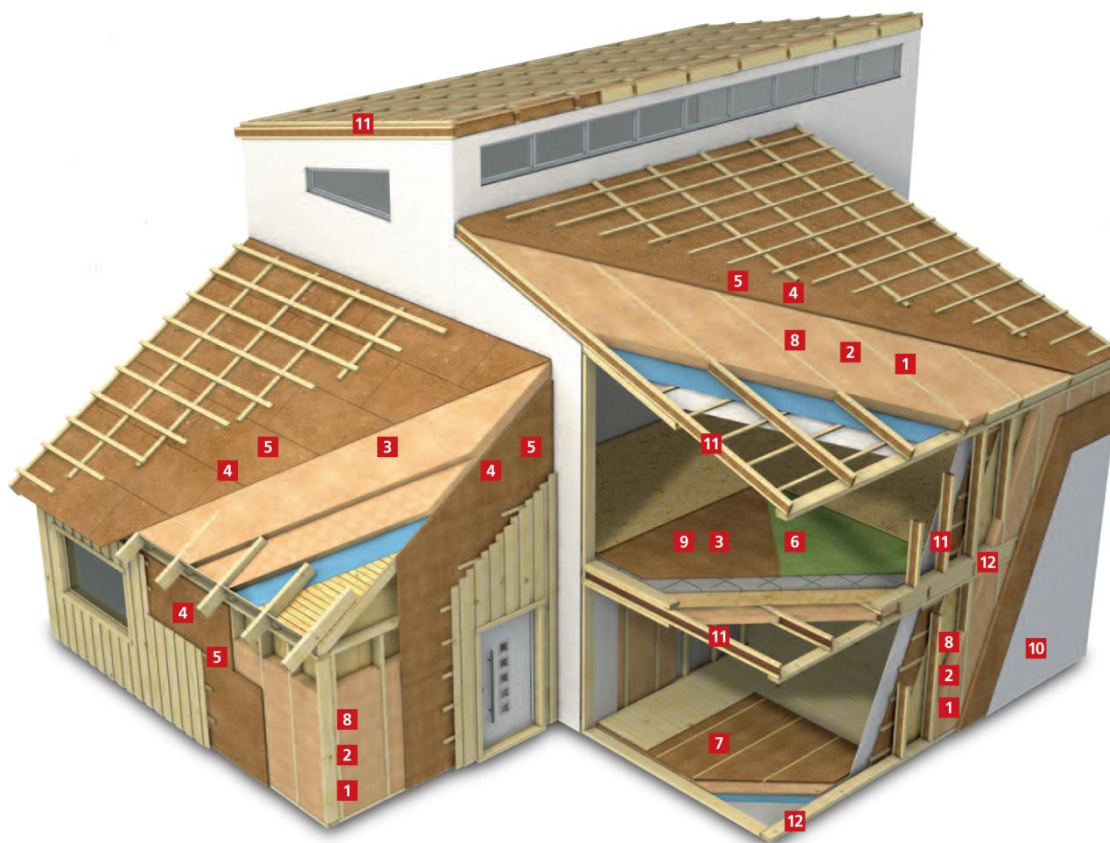
Hodnoty ve zbývajících dvou směrech nejsou udávány vzhledem k velmi sporému výskytu situací představujících hlavní tepelný tok deskou v jednom z těchto směrů. Hrubý odhad součinitele tepelné vodivosti ve směrech rovnoběžných s rovinou desky je možno provést například na základě poměru těchto hodnot u měkkého dřeva kolmo na směr růstu vláken a ve směru vláken. Dle údajů v ČSN 73 0540 je tento poměr přibližně 0,43. Pro dřevovláknitou desku o součiniteli prostupu tepla 0,042 W.m⁻¹.K⁻¹ ve směru kolmo na rovinu desky by potom vycházela hodnota 0,098 W.m⁻¹.K⁻¹ ve zbývajících dvou směrech.

Velkou výhodou dřevovláknitých desek je také jejich snadná recyklovatelnost a fakt, že pochází pouze z přírodních a lehce odbouratelných materiálů – dřevních vláken a parafínu v případě hydrofobní úpravy.

Dřevovláknité izolace, většinou ve formě desek jsou použitelné jako tepelné či zvukové izolace v podstatě pro všechny obvodové i vnitřní konstrukce budovy kromě míst, kde jsou trvale přímo vystaveny působení vody a vysoké vlhkosti. Povětrnostním vlivům však materiál nemusí být uchráněn naprosto dokonale. Po aplikaci omítkového systému mohou dřevovláknité desky sloužit jako fasádní zateplovací vrstva – tedy materiál tvořící

obvodové stěny objektu z exteriéru. Hydrofobizované desky (většinou přidavkem parafínu) mohou zase sloužit jako pojistná hydroizolační vrstva pod skládanou krytinou. V takovém případě nahrazuje běžně užívanou pojistnou hydroizolační (difuzní) podstřešní folii.

Na následující vizualizaci jsou vyobrazeny konstrukce, které jsou vhodné pro aplikaci dřevovláknitých izolačních desek.



Obr. 10: Možnosti užití dřevovláknitých desek ve stavbách (Steico Gruppe 2014).

Legenda: 1, 2, 8, 12 – izolační rohože pro izolaci střechy mezi krokve, izolaci stěn mezi nosné prvky 3 – izolační desky pro použití pod střešní krytinu, nebo jako izolace pod betonovou mazaninu podlah 4, 5 – hydrofobizované izolační panely pro izolaci střechy nadkrokevním systémem, izolaci obvodových stěn 6 – podklad pod vícevrstvé laminátové podlahy 7 – akusticky izolační podlahový systém pro pokládání dřevěných podlah 9 – všestranná tepelná a zvuková izolace pro použití ve střeších, stěnách i podlahách 10 – izolační deska pro fasádní omítkové systémy s vysokou difuzní otevřeností 11 – lepené „I“ nosníky s předem vkládanou dřevovláknitou izolací do prostoru mezi pásnice

3. Materiál a metodika

3.1. Materiál

Při výzkumu byly používány přírodní stavební materiály na bázi dřeva a dřevních vláken – masivní dřevěné panely a měkké dřevovláknité desky. Pro úpravu emisivity vnitřního povrchu vzduchové kavity byla použita difuzní polypropylenová folie s hliníkovou vrstvou.

3.1.1. Masivní dřevěné panely

Masivní dřevěné panely, často označovány jako CLT (z anglického „cross laminated timber“), či KLH (z německého „Kreuzlagenholz“) jsou v oblasti dřevostaveb relativně moderním materiálem. Jde o masivní dřevěné desky skládající se ze 3, či více vrstev (vždy v lichém počtu) vzájemně slepených, či jinak spojených lamel. Sousední vrstvy jsou vždy vůči sobě o 90° pootočený. Díky své statické únosnosti tvoří tento materiál hlavní – nosnou část obvodových konstrukcí budovy. Vyráběny jsou jak v pohledové, tak v nepohledové kvalitě.

Ve srovnání se sloupkovým, či skeletovým systémem dřevostaveb je výhoda CLT zejména v jejich „plnostěnnosti“. Není tedy nutno dodatečně zajišťovat statickou únosnost konstrukce. Dalšími přednostmi jsou zejména vysoká tepelná akumulace a možnost využít CLT panely přímo jako vnitřní pohledovou vrstvu.



Obr. 11: Masivní dřevěné panely – CLT (AGROP NOVA a.s. 2013).

Panel je v ploše díky slepení vysoce parobrzdný (viz dále technické specifikace), slabším místem zůstává pouze správné napojení jednotlivých panelů mezi sebou a napojení ve stycích s dalšími konstrukcemi.

Při experimentech v této práci byly použity masivní dřevěné panely od dodavatele Stora Enso¹². K dispozici jsou panely o tloušťce 60 – 320 mm a různém počtu vrstev. Pro účely měření byly využity třívrstvé panely o stejné tloušťce všech vrstev - 20 mm, tedy o celkové tloušťce 60 mm. Základní parametry CLT panelů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 8: CLT panely Stora Enso (Zpracováno dle Stora Enso 2013).

Druh dřeva	smrk
Vlhkost dřeva	(12 ± 2) %
Použité lepidlo	Lepidla bez obsahu formaldehydu pro klížení úzkých stran, spojování klínovými ozuby a klížení ploch
Objemová hmotnost	cca 470 kg/m ³
Součinitel difuzního odporu μ	20 až 50
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,11 W/(m.K)
Měrná tepelná kapacita c_p	1 600 J/(kg.K)

Na českém trhu jsou v současnosti (2014) dostupné také masivní panely od následujících výrobců:

- AGROP NOVA a.s. – panelový systém NOVATOP (lamely spojovány lepením, panely tloušťky 62, 84, 124 mm)
- DEK a.s. – panelový systém DEKPANEL (lamely spojovány pomocí vrtů, panely tloušťky 81, 108, 135 mm)

3.1.2. Dřevovláknité desky

Při experimentech byly použity dřevovláknité desky dvojího typu:

- UPD výrobce Agepan tloušťky 32 mm
- UD výrobce Hofatex tloušťky 35 mm

Jejich materiálové vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

¹² Stora Enso WP Bad St. Leonhard GmbH, Wisperndorf 4, A-9642 Bad St. Leonhard.

Tab. 9: Dřevovláknité desky Agepan UPD (Zpracováno dle Agepan, 2009, Smrečina Hofatex, a.s., 2011).

Materiál	Agepan UPD	Hofatex UD
Druh dřeva	smrk	-
Hygroskopická skupina	WS 1.0	-
Třída emise formaldehydu	E1 - bez formaldehydu	-
Objemová hmotnost	270 (kg.m ⁻³)	260 (kg.m ⁻³)
Faktor difuzního odporu μ	5	5
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,051 (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,049 (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Měrná tepelná kapacita c_p	2 100 (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	2 100 (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)

Na fotografii níže je zobrazen jeden vzorek rozměru 60x60 mm po rozřezání desky za účelem provedení experimentálního měření součinitele tepelné vodivosti.



Obr. 12: Dřevovláknitá deska Agepan UPD 32 mm.

3.1.3. Reflexní folie

Za reflexní folie označujeme takové materiály, jejichž povrch odráží většinu na něj dopadající energie. Emisivita těchto materiálů se pohybuje v rozmezí cca od $\varepsilon = 0,05$ do $\varepsilon = 0,2$ (např. reflexní folie SUNFLEX Roof-In Plus s emisivitou $\varepsilon = 0,09$ až $0,12$)¹³.

K reflexi dochází u materiálů dvěma způsoby, podle čehož rozlišujeme reflexi (Hejhálek 2014):

- geometrickou (Vlnění se od povrchu odráží podobně jako od zrcadla. Takové materiály mají většinou hladký a lesklý povrch – většinou jde o hliníkové folie.)

¹³ TART, s.r.o. SUNFLEX [online]. 2013 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.sunflex.cz/>

- difúzní (Dopadající záření se od povrchu odráží difuzně do různých směrů. Povrch takových materiálů není hladký, ale naopak velmi členitý. Příkladem jsou například reflexní nátěry na vnější fasádě budov či reflexní stínicí prvky – žaluzie, rolety atp. I povrch s převládající difuzní reflexí může mít emisivitu například $\varepsilon = 0,1$ rovnou emisivitě reflexní hliníkové folie.)

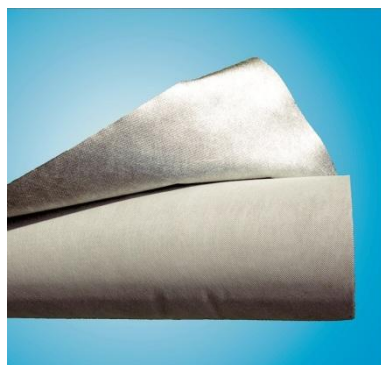
Ve stavební praxi jsou jako finální vrstvy reflexních výrobků používány zejména kovy – hliník, stříbro, zlato v tenkých vrstvách. Nejvíce je využíván hliník díky své vysoké odrazivosti pro záření viditelného a tepelného spektra a také díky relativně příznivé ceně. Při jeho expozici vnějšímu prostředí je však nutno povrch chránit před oxidací a následnému zhoršení emisních vlastností. To se provádí potažením vrstvou polymerního laku.

Odrazivé povrchy stavebních termoreflexních folií bývají většinou vyráběny z hliníku a to ve formě:

- tenké vrstvy celistvé hliníkové folie, většinou plošně slepené s další – nosnou vrstvou,

povrchově naprašované vrstvy, která je aplikovaná na nosnou folii či vrstvu, která může být z libovolného materiálu. Tato aplikace umožňuje výrobu termoreflexních difuzně otevřených folií.

V práci byla použita difuzní reflexní folie značky Guttafol. Jde o polypropylenovou nosnou membránu opatřenou hliníkovým nástřikem pro dosažení odrazivosti.

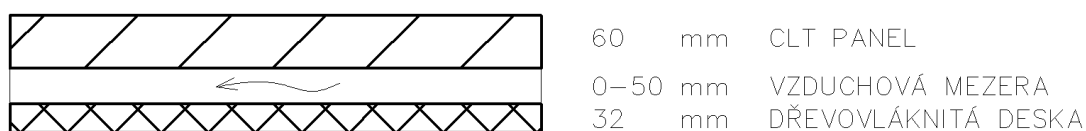


Obr. 13: Reflexní folie difuzní (Gutta ČR, 2014).

3.1. Návrh horizontální konstrukce dřevostavby se vzduchovou vrstvou

Jak bylo popsáno v kapitole Konstrukce dřevostaveb využívající vzduchové mezery, v konstrukcích současných dřevostaveb se vyskytuje mnoho míst, kde se uplatňují nevětrané vzduchové mezery.

Vzhledem k růstu popularity konstrukčního systému masivních dřevěných panelů a také zakládání staveb nad terénem je v této práci navržena skladba využívající těchto dvou systémů spolu s tepelnou izolací dřevovláknitými deskami zobrazená na následujícím schématu.



Obr. 14: Skladba navrhované konstrukce

Toto pořadí vrstev při tepelném toku směrem vzhůru je v praxi využitelné zejména pro podlahové konstrukce nad terénem či strop lodžie. Při obrácení tepelného toku (respektive záměně pořadí jednotlivých vrstev) může jít o konstrukci ploché střechy, stropu nad posledním obytným podlažím či o podlahu lodžie.

3.2. Stacionární metoda měřidla tepelného toku pro stanovení součinitele tepelné vodivosti

Metoda měřidla tepelného toku patří mezi deskové metody a pro stanovování součinitele tepelné vodivosti vzorků stavebních materiálů v ustáleném tepelném stavu při střední teplotě měření od -15 °C do $+50\text{ °C}$ ji popisují normy ČSN 72 7012-1 a ČSN 72 7012-3.

Metoda zjišťuje celkové množství tepla, které projde za jednotku času z jedné strany zkoušeného vzorku na druhou při daném rozdílu teplot. Nezáleží při tom na způsobu, jakým se teplo dostává z jednoho povrchu vzorku na druhý, metoda určuje součet vedení, sálání i proudění tepla. Vliv přenosu vlhkosti na tepelný tok či redistribuci vlhkosti v průřezu vzorku však metodou není brán v potaz.

Obecný princip metody měření

Přístroj reprodukuje předem určené okrajové podmínky v bezprostředním okolí vzorku mezi dvěma teplotními prostředními, kterými je obvykle teplá a chladná deska.

Měření probíhá při ustálené teplotě vzduchu, povrchových teplotách a celkovém vstupním tepelném výkonu v měřicí skříni. Z těchto měření jsou vypočteny tepelnotechnické vlastnosti vzorku.

Šíření tepla na povrchu vzorku se děje prouděním a sáláním tepla. Proudění je závislé na teplotě vzduchu a rychlosti pohybu vzduchu. Sálání závisí na teplotě a celkové sálavosti povrchů vzorku a povrchů „viděných“ povrchy vzorku. Složené účinky přenosu tepla prouděním a sáláním jsou zahrnuty v teplotě prostředí a součiniteli přestupu tepla na povrchu.

Parametry ustáleného teplotního stavu

Ustálený teplotní stav definovaný dle ČSN 72 7012-1 nastává, když jednotlivé hodnoty součinitele tepelné vodivosti stanovené pro měřicí intervaly se od sebe vzájemně neliší o více, než 2 % a hodnoty přitom nevykazují monotónně vzestupnou či sestupnou tendenci. Zároveň se nesmí jednotlivé povrchové teploty ve vztažných plochách vzorku lišit o více, než 0,15 K od průměrné teploty této vztažné plochy.

Výpočet součinitele tepelné vodivosti vzorku v ustáleném tepelném stavu se provede z výpočtových hodnot:

- hustoty tepelného toku prostupujícího zkušebním vzorkem v ustáleném tepelném stavu
- teploty vztažné plochy teplého povrchu vzorku
- teploty vztažné plochy chladného povrchu vzorku
- průměrné hodnoty tloušťky zkušebního vzorku

Hodnoty sledovaných veličin pro stanovení jejich výpočtových hodnot jsou průměrovány z odečtů za každý měřicí interval.

Okrajové podmínky měření

Teplota vzduchu v laboratoři by neměla kolísat o více, než ± 2 °C, relativní vlhkost vzduchu by neměla překročit 65 %.

V rámci průkazní, rozhodčí, nebo úřední zkoušky určení charakteristické hodnoty součinitele tepelné vodivosti ve smyslu ČSN 73 0540 musí být provedena za těchto okrajových podmínek:

- hodnoty zkušebních vlhkostí musí být rovnoměrně rozloženy kolem charakteristické hmotnostní vlhkosti materiálu, přičemž tato hodnota by měla přibližně půlit interval vlhkosti, ve kterém se provádí stanovení součinitele tepelné vodivosti
- interval vlhkosti by neměl být menší, než charakteristická hodnota vlhkosti materiálu
- střední teplota měření $t_{mt} = 10 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
- rozdíl povrchových teplot zkušebního vzorku od 5 K do 15 K
- vzorkování musí být provedeno dle požadavků této normy

Požadavky kladené na vzorky

Při stanovení součinitele tepelné vodivosti vzorku ve vlhkém, suchém, či zdánlivě suchém stavu smí být změna objemové vlhkosti vzorku nejvýše 0,2 % objemových.

Při měření je přitom nutno dbát na homogenitu zkoušených vzorků. Výskyt nestejnorodostí způsobuje, že tepelný tok není jednorozměrný, stálý ani rovnoměrný. Díky tomu vznikají nerovnoměrnosti v rozložení teploty a místních součinitelů přestupu tepla na povrchu. Je nutno brát v úvahu, že vzduchové dutiny ve zkoušeném vzorku umožňují přirozené proudění vzduchu a tím mohou způsobovat neznámý boční tepelný tok vzorkem.

Přístroj HFM 436 Lambda¹⁴

Použitý model přístroje (HFM 436/6 Lambda) měří tepelný tok ve středu vzorku na ploše 300 x 300 mm. Rozměry vloženého vzorku však mohou a měly by být až 600 x 600 mm pro eliminaci bočního tepelného toku. Tloušťka je omezena na 10 až 200 mm.



Obr. 15: Přístroj pro stanovení součinitele tepelné vodivosti Netzsch HFM 436 Lambda

¹⁴ Zpracováno dle Netzsch, 2008.

Měřený vzorek je vložen do přístroje mezi dvě desky o předem nastavených, rozdílných teplotách. Tepelný tok Q vzorkem mezi deskami je měřen kalibrovaným snímačem. Měření je hotovo po dosažení tepelné stability na obou deskách přístroje.

Měřit lze jak „plné“, tak i vláknité materiály s vysokým podílem vzduchových kavit a sypké materiály.

Velikost tepelného toku závisí na několika faktorech, jimiž jsou:

- tepelná vodivost vzorku λ
- tloušťka vzorku d
- rozdíl teplot v průřezu měřeného vzorku ΔT
- plocha, přes níž teplo proudí S

Zákonitosti, jež platí mezi těmito veličinami při dosažení rovnovážného stavu, popisuje Fourierova rovnice tepelného toku:

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \text{ (W)}$$

Snímač nepřímo určuje tepelný tok Q procházející vzorkem. Měřen je elektrický signál u [V] jdoucí z měřiče, který je přímo úměrný tepelnému toku na snímači. Plocha snímače představuje také plochu, přes níž dochází k tepelnému toku a díky tomu lze vyjádřit vztah:

$$Q = N \cdot u \text{ (W)}$$

kde N [$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1}$] je kalibrační faktor, který udává vztah mezi signálem ze snímače ve voltech a tepelným tokem průřezem vzorku.

Vyjádřením součinitele tepelné vodivosti z Fourierovy rovnice získáváme vztah pro součinitel tepelné vodivosti λ :

$$\lambda = N \cdot \frac{V \cdot d}{\Delta T} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

Tato metoda měření tepelného toku (heat flow meter method) je standardizovaným postupem a pro aplikaci na izolační materiály je popsána v následujících normách:

- **ČSN 72 7012-3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku** (Determination of Steady State Thermal Conductivity of Materials. Hot Plate Methods. Heat Flow Meter Method)
- **ISO 8301:1991 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus** (Standardní

měřicí metoda pro tepelněizolační materiály s využitím přístroje pro měření tepelného toku)

- **ASTM C518 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus** (Americká norma pro měření tepelněizolačních materiálů s využitím přístroje pro měření tepelného toku)
- **DIN EN 12667:2001 Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance** (Německá norma pro měření tepelněizolačních materiálů za použití přístroje pro měření tepelného toku – heat flow meter, nebo metody odstíněné teplé desky – guarded hot plate)

3.3. Metodika měření a použitá zařízení

Pro analýzu různých okrajových podmínek na tepelněizolační vlastnosti dřevovláknitých desek a konstrukce masivního lepeného panelu se vzduchovou vrstvou a dřevovláknitou deskou bylo provedeno několik měřicích uspořádání:

- zkoumání vlivu teploty a vlhkosti na tepelněizolační vlastnosti dřevovláknitých desek
- zkoumání vlivu teploty na tepelněizolační vlastnosti konstrukce sestávající z CLT panelu, nevětrané vzduchové mezery a dřevovláknité desky (DVD)
- zkoumání vlivu tloušťky na tepelněizolační vlastnosti konstrukce (CLT, vzduchová mezera, DVD)
- zkoumání vlivu reflexní folie na tepelněizolační vlastnosti konstrukce (CLT, vzduchová vrstva, DVD) při různých tloušťkách vzduchové vrstvy

Ta jsou podrobněji popsána v následujících podkapitolách.

3.3.1. Vliv teploty a vlhkosti na tepelnětechnické parametry dřevovláknitých desek

Cílem tohoto měření bylo zjistit vliv vlhkosti dřevovláknitých desek na jejich tepelněizolační vlastnosti a tyto změřit při různých teplotách. Měření byla prováděna při kombinacích teplot a vlhkostí uvedených v tabulce.

Zkoumány byly dřevovláknité desky UD značky Hofatex o tloušťce 35 mm. Desky byly při výrobě hydrofobizovány přidáním parafínu.

Tab. 10: Zkoumané kombinace klimatizačních podmínek a středních teplot měření dřevovláknitých desek

Podmínky klimatizace		Střední teplota měření (°C)							
		-10	0	10	20	30	40	50	60
Teplota 20 °C	Relativní vzdušná vlhkost (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
		15	15	15	15	15	15	15	15
		50	50	50	50	50	50	50	50
		85	85	85	85	85	85	85	85

Vzhledem k dodávané velikosti desek byly dodané panely délky 2200 mm rozřezány na rozměry 600x600 mm. Následně bylo náhodně vybráno deset vzorků, které byly vysušeny v komoře Sanyo MTH 2400 při teplotě 60 °C do dosažení stabilní hmotnosti (tj. rozdíl ve hmotnostech pro dvě měření následující alespoň po 24 hodinách je nižší, než 0,1%).

Následně byly vzorky postupně vkládány do přístroje Netzsch HFM 436 Lambda pro měření součinitele tepelné vodivosti. Před měřením byl každý vzorek zvážen a obalen polyethylenovou folií o tloušťce 23 μm pro zamezení změny vlhkosti desky v průběhu měření.

Přístroj HFM 436 Lambda zjišťuje součinitel tepelné vodivosti vloženého materiálu při dosažení rovnovážných tepelných podmínek. Měřena je plocha 300x300 mm uprostřed vzorku, který ovšem musí být rozměrů 600x600 mm pro eliminaci tepelného toku okrajovými částmi vzorku. Parametry rovnovážného stavu měření byly 1% pro hrubé měření a 0,1% pro jemné měření.

Bylo provedeno 8 měření při středních teplotách -10 až 60 °C jak je uvedeno v tabulce výše. Pro každou teplotu s nastaveným teplotním rozdílem studené a teplé desky 10 °C.

Před samotným měřením byl přístroj Netzsch HFM 436 Lambda zkalibrován měřením referenčního materiálu – tepelněizolační desky z pěnoskla (NIST 1450b) tloušťky 25 mm.

Po změřeni všech deseti vzorků byly následně klimatizovány v komoře Memmert CTC 256 při teplotě 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti postupně 15 %, 50 % a 85 %.

Následně byly desky po vyjmutí z klimatizační komory jednotlivě zváženy, obaleny polyethylenovou folií, byly změřeny jejich tepelněizolační parametry v přístroji Netzsch HFM 436 Lambda se stejným nastavením parametrů jak je uvedeno výše a nakonec po vyjmutí z přístroje byla opět zjištěna jejich hmotnost pro určení možné změny vlhkosti.



Obr. 16: Klimatizační komora Memmert CTC 256.

3.3.2. Vliv teploty na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce se vzduchovou vrstvou

Záměrem tohoto měření bylo určit vliv teploty na tepelněizolační vlastnosti konstrukce masivního dřevěného CLT panelu, vzduchové mezery a dřevovláknité desky.

Použitými materiály byly dřevovláknité desky UPD od výrobce Agepan o tloušťce 32 mm a masivní dřevěné CLT panely tloušťky 60 mm od výrobce Stora Enso.

Metodika měření byla následující:

- 1) příprava vzorků dřevovláknitých desek o rozměrech 600 x 600 mm
- 2) klimatizace vzorků dřevovláknitých desek a masivních dřevěných panelů při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %
- 3) zvážení jednotlivých vzorků
- 4) vytvoření konstrukce se vzduchovou kavitou 50 mm a obalení do polyethylenové folie
- 5) stanovení součinitele tepelné vodivosti jednotlivých vzorků při různých teplotách
- 6) opětovné zvážení vzorků pro kontrolu možné změny vlhkosti

Vzhledem k omezení měřicího zařízení, bylo nutno vyrobit ze všech materiálů vzorky o rozměrech 600 x 600 mm, tloušťka zůstala výrobní. Masivní dřevěné panely (CLT 60 mm, výrobce Stora Enso) byly dodány již v těchto rozměrech. Měkké dřevovláknité desky bylo nutno ze standardních dodávaných rozměrů 2520 x 610 mm rozřezat na potřebnou velikost.

Jako první krok byly oba materiály klimatizovány v klimatizační komoře Memmert CTC 256 při teplotě 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 %. Po vyjmutí z klimatizační komory byly vždy vzorky zváženy, vytvořena konstrukce a obalena polyethylenovou folií pro udržení dosaženého obsahu vlhkosti.

Pro konstrukci byla vybrána konstantní tloušťka vzduchové vrstvy na úrovni 50 mm. Důvody pro tuto hodnotu byly jednak častý výskyt vzduchových vrstev této tloušťky v konstrukcích dřevostaveb – zejména jako instalační předstěna pro vedení rozvodů v interiérech domu. Druhým faktorem podporujícím výběr této tloušťky je vyšší projevení konvekčního přenosu tepla ve srovnání s ostatními měřenými tloušťkami vzduchových vrstev (10-40 mm) a tedy vyšší názornost získaných výsledků. Distance 50 mm mezi CLT panelem a dřevovláknitou deskou byla vytvořena rámečkem o tloušťce 10 mm po obvodu konstrukce vytvořeném z materiálu dřevovláknité desky.

Tepelná vodivost byla měřena v přístroji Netzsch HFM 436 Lambda. Parametry rovnovážného stavu měření byly 1% pro hrubé měření a 0,1% pro jemné měření.

Přístroj byl nastaven na střední teplotu měření postupně 10 až 60 °C s krokem 10 °C, teplotní rozdíl studené a teplé desky byl 10 °C.

3.3.3. Vliv vzduchové vrstvy na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce

Cílem tohoto měření bylo zjistit vliv vzduchové mezery na tepelněizolační vlastnosti konstrukce obvodového pláště dřevostavby a také určit vliv tloušťky této mezery. Použité materiály byly identické jako v předchozím případě.

Metodika měření byla obdobná předchozímu případu a skládala se z následujících úkonů:

- 1) příprava vzorků dřevovláknitých desek o rozměrech 600 x 600 mm
- 2) klimatizace vzorků dřevovláknitých desek a masivních dřevěných panelů při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %
- 3) zvážení vzorků a obalení do polyethylenové folie
- 4) stanovení součinitele tepelné vodivosti jednotlivých vzorků
- 5) vytvoření konstrukce se vzduchovou kavitou, stanovení součinitele tepelné vodivosti při různých tloušťkách kavity
- 6) opětovné zvážení vzorků pro kontrolu možné změny vlhkosti

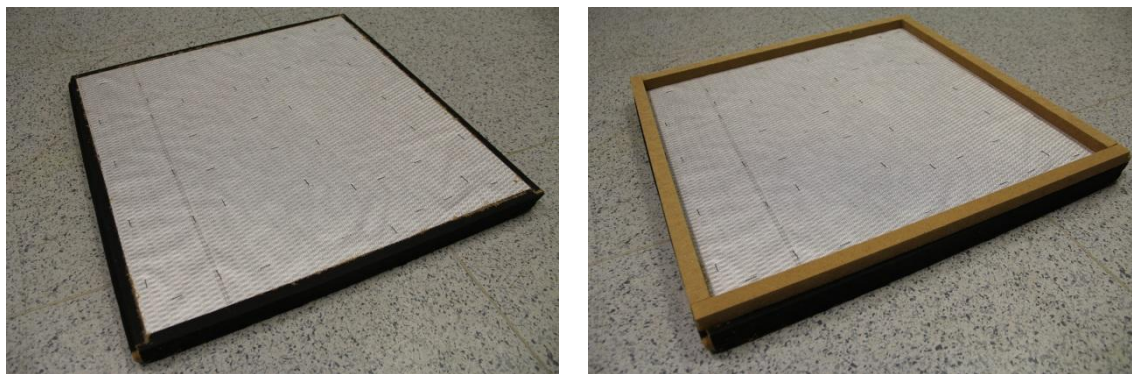
V přístroji Netzsch HFM 436 Lambda byl určen součinitel tepelné vodivosti každého materiálu zvlášť. Poté byla vytvořena jednoduchá konstrukce sestávající z masivního dřevěného panelu a dřevovláknité desky, umístěné směrem k měřicí desce přístroje s nižší

teplotou. Nejprve byly oba materiály umístěny těsně na sebe bez vzduchové mezery. Posléze byla mezi materiály vytvořena uzavřená vzduchová mezera o tloušťce postupně 5 až 20 mm, s krokem po 5 mm a dále mezery o tloušťkách 30, 40 a 50 mm. Distance mezi materiály byla zajištěna rámečkem o tloušťce 10 mm po obvodu. Rámeček byl vyroben ze stejného materiálu, jako měřené dřevovláknité desky.

Pro každou tloušťku vzduchové mezery bylo provedeno 5 měření součinitele tepelné vodivosti. Nastavení přístroje bylo identické, jako v předchozím případě, tedy střední teplota měření 20 °C, teplotní rozdíl studené a teplé desky 10 °C. Parametry rovnovážného stavu měření také 1% pro hrubé měření a 0,1% pro jemné měření.

3.3.4. Vliv emisivity povrchu na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce se vzduchovou vrstvou

Cílem tohoto měření bylo určit vliv emisivity vnitřních povrchů vzduchové vrstvy na tepelněizolační vlastnosti celého panelu. Na obě vnitřní plochy měřených materiálů (dřevovláknitá deska a masivní dřevěný CLT panel) byla přichycena difuzní reflexní folie, jak je ukázáno na následujícím obrázku.



Obr. 17: Dřevovláknitá deska s reflexní folií a vytvoření distanční mezery obvodovým rámečkem

Následně bylo provedeno měření se vzduchovou mezerou 0 – 20 mm po kroku 5 mm a dále pro mezery 30, 40, 50 mm. Postup měření byl identický, jako v předcházejícím případě:

- 1) klimatizace vzorků dřevovláknitých desek a masivních dřevěných panelů při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %
- 2) určení hmotnosti vzorků
- 3) vytvoření konstrukce se vzduchovou kavitou a obalení do polyethylenové folie
- 4) stanovení součinitele tepelné vodivosti při různých tloušťkách kavity
- 5) opětovné zvážení vzorků pro kontrolu možné změny vlhkosti

4. Výsledky a diskuse

4.1. Vliv teploty a vlhkosti na tepelnětechnické parametry dřevovláknitých desek

Cílem měření bylo určit vliv teploty a vlhkosti na tepelněizolační parametry dřevovláknitých desek. Vzhledem k faktu, že jde o vláknitý materiál, přijímají dřevovláknité desky vzdušnou vlhkost, čímž se zvyšuje obsah vody v tomto materiálu. V reálných podmínkách je většinou nosná konstrukce dané stavby (v této práci jde o CLT panely) umístěna blíže interiéru a nachází se tak v podstatě v konstantních podmínkách teploty a vlhkosti blízcí se interiérovým.

Naopak dřevovláknitá deska jako tepelná izolace bývá ve většině případů umístěna přímo na exteriérové straně konstrukce, často tvořící přímo rozhraní mezi vnějším prostředím a danou konstrukcí. Jako taková je vystavena značnému kolísání teplot a relativní vzdušné vlhkosti, což určitým způsobem ovlivňuje její vlastnosti.

Primární funkcí dřevovláknitých desek v obvodových konstrukcích je tepelná izolace a pro zjištění vlivu vnějších podmínek právě na tento základní parametr materiálu bylo provedeno následující měření.

Metodika

Dřevovláknité desky byly vysušeny při teplotě 60 °C do ustálení hmotnosti. Následně byly po jednom vkládány do přístroje HFM 436 Lambda a byl stanoven jejich efektivní součinitel tepelné vodivosti a tepelný odpor při teplotách -10 až 60 °C po kroku 10 °C. Následně byly vzorky klimatizovány při 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 15 %, 50 % a 85 % a postupně měřeny při stejných teplotách jako výše pro určení efektivního součinitele tepelné vodivosti a tepelného odporu. Z měření hmotnosti byla vypočítána relativní vlhkost dřevovláknitých desek při různých okolních podmínkách.

Výsledky

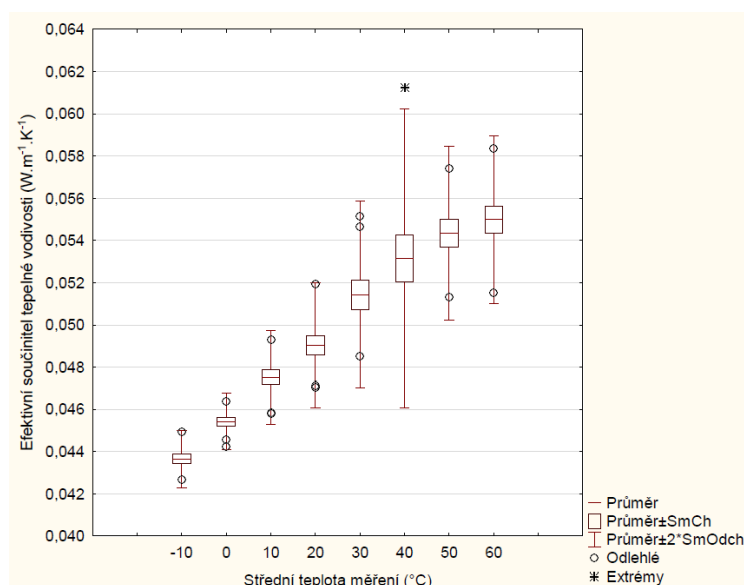
Měření ukázalo pozitivní závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě měření. Tato skutečnost je v souladu s faktem, že s růstem relativní vlhkosti prostředí roste také vlhkost materiálu a tím i podíl vody, která má značně nižší tepelněizolační vlastnosti, než dřevovláknitá deska.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty relativní vlhkosti, kterou dřevovláknité desky dosáhly při uložení v klimatizační komoře.

Tab. 11: Relativní vlhkost dřevovláknitých desek odpovídající relativní vzdušné vlhkosti při klimatizaci ve 20 °C

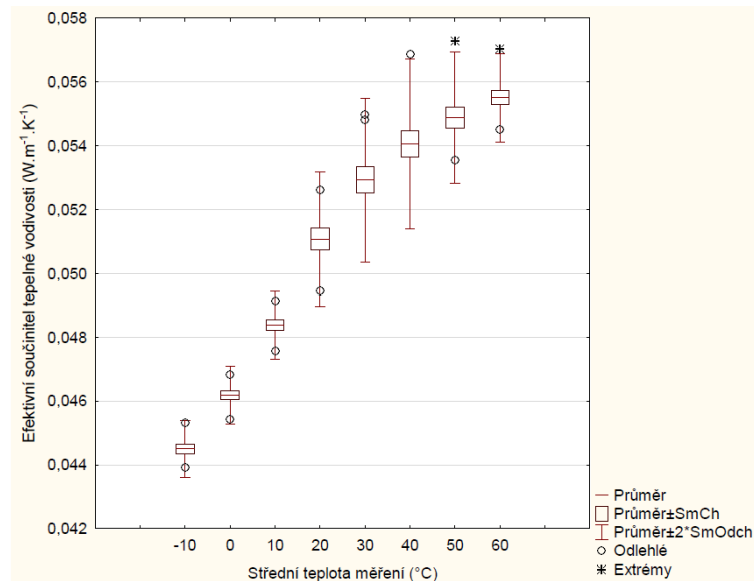
Relativní vzdušná vlhkost (%)	Relativní vlhkost materiálu (%)
0	0
15	2,58
50	7,41
85	14,29

Z následujících grafů je patrné, že v teplotním rozmezí -10 °C až cca 40 °C s růstem teploty roste také součinitel tepelné vodivosti. Od hodnoty 40 °C výše již při měření dochází k pomalejšímu růstu, či dokonce poklesu (pro 50% relativní vzdušnou vlhkost) součinitele tepelné vodivosti. To potvrzují také výsledky Zhou et al. (2013), kteří konstatovali růst následovaný poklesem s inflexním bodem při teplotě cca 55 °C. To je rozdíl ve srovnání s masivním dřevem, u nějž mezi teplotami 30 a 90 °C dochází k lineárnímu růstu součinitele tepelné vodivosti (Yu et al. 2011).

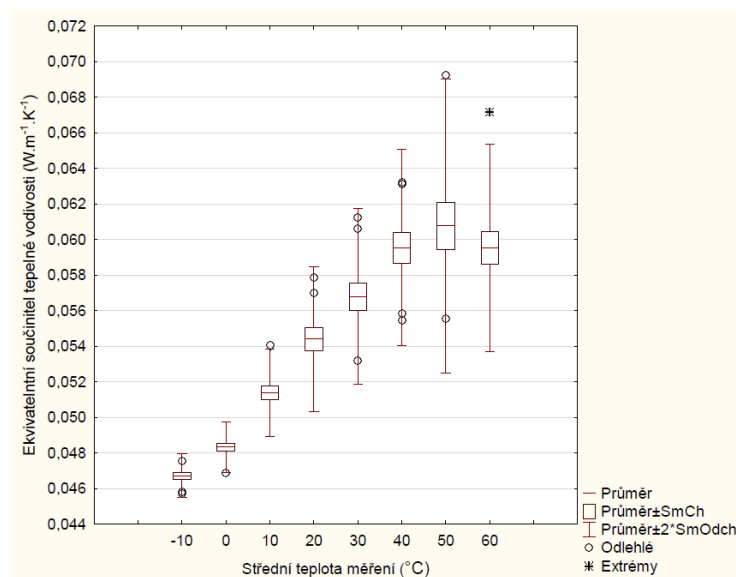


Obr. 18: Závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě měření - nulová vlhkost

Zajímavým faktem je, že s růstem teploty měření roste také rozptyl naměřených hodnot a to u všech sledovaných vlhkostí. To může být způsobeno pravděpodobně redistribucí vlhkosti v desce, k níž dochází tím více, čím je vyšší teplota měření.



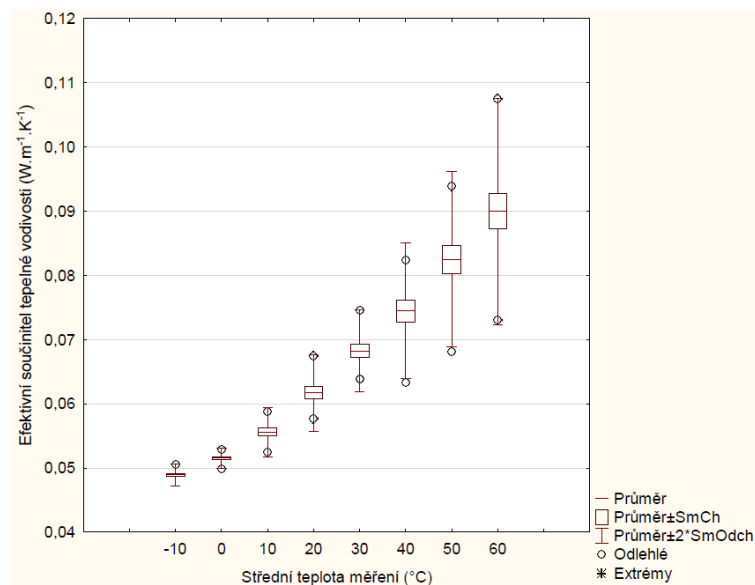
Obr. 19: Závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě měření - klimatizováno při 20 °C, 15% vlhkosti



Obr. 20: Závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě měření - klimatizováno při 20 °C, 50% vlhkosti

S růstem vlhkosti se zhoršují tepelněizolační vlastnosti, k čemuž dochází nejmarkantněji mezi případy klimatizovanými při 50% a 85% relativní vzdušné vlhkosti. Do hodnoty cca 7,5 % vlhkosti desky (klimatizováno při 50% relativní vzdušné vlhkosti *RH*) má vlhkost méně významný vliv. Stejně pozorování učinili Zhou et al. (2013) u MDF desek., kdy rozdíl v tepelné vodivosti u desek absolutně suchých a o vlhkosti 4% byl téměř

minimální. Zato mezi hodnotami při relativní vlhkosti 4 a 8 % již byly rozdíly až na úrovni 17%.



Obr. 21: Závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě měření - klimatizováno při 20 °C, 85% vlhkosti

Statistickou závislost efektivního součinitele tepelné vodivosti λ na střední teplotě měření θ_{msr} vyjadřují pro 4 sady okrajových podmínek následující regresní rovnice (t značí teplotu klimatizace desek, RH relativní vzdušnou vlhkost klimatizace, w vypočítanou relativní vlhkost desek po klimatizaci)

$$t = 60 \text{ °C}, w = 0 \text{ \%}: \quad \lambda = 0,0457 + 0,0002 * \theta_{msr}; \quad r = 0,8995; \quad p = 0.0000; \quad r^2 = 0,8091$$

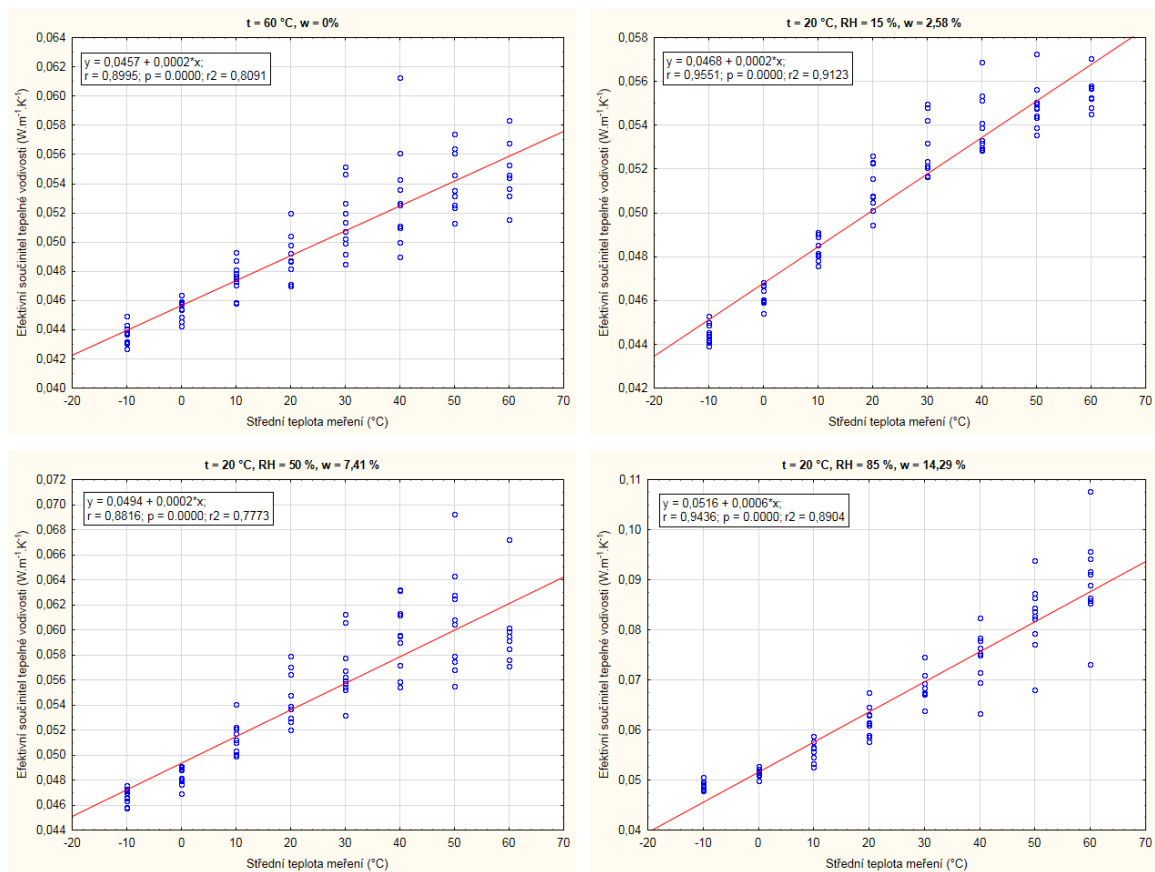
$$t = 20 \text{ °C}, RH = 15 \text{ \%}, w = 2,58 \text{ \%}: \quad \lambda = 0,0468 + 0,0002 * \theta_{msr}; \quad r = 0,9551; \quad p = 0.0000; \quad r^2 = 0,9123$$

$$t = 20 \text{ °C}, RH = 50 \text{ \%}, w = 7,41 \text{ \%}: \quad \lambda = 0,0494 + 0,0002 * \theta_{msr}; \quad r = 0,8816; \quad p = 0.0000; \quad r^2 = 0,7773$$

$$t = 20 \text{ °C}, RH = 85 \text{ \%}, w = 14,29 \text{ \%}: \quad \lambda = 0,0516 + 0,0006 * \theta_{msr}; \quad r = 0,9436; \quad p = 0.0000; \quad r^2 = 0,8904$$

Relativně příznivé hodnoty koeficientu determinace r^2 značící dobré vystižení rozložení daných hodnot navrženou regresní lineární rovnicí. To je způsobeno téměř lineárním průběhem funkce od -10 až do cca 40 °C a lehkým poklesem u 50 a 60 °C, které je doprovázeno zvýšenou variabilitou. Dle výsledků Zhou et al. (2013) lze ale předpokládat pokles hodnot tepelné vodivosti za touto úrovní a tedy již nemožnost použití lineární regresní rovnice pro vystižení vztahu.

Vysoké hodnoty korelačního koeficientu r potvrzují předpoklad o vlivu teploty na účinitel tepelné vodivosti.



Obr. 22: Regresní přímka závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě

Statistickou závislost součinitele prostupu tepla U na střední teplotě měření θ_{msr} vyjadřují pro 4 sady okrajových podmínek následující regresní rovnice (t vyjadřuje teplotu klimatizace desek, RH relativní vzdušnou vlhkost klimatizace, w vypočítanou relativní vlhkost desek po klimatizaci)

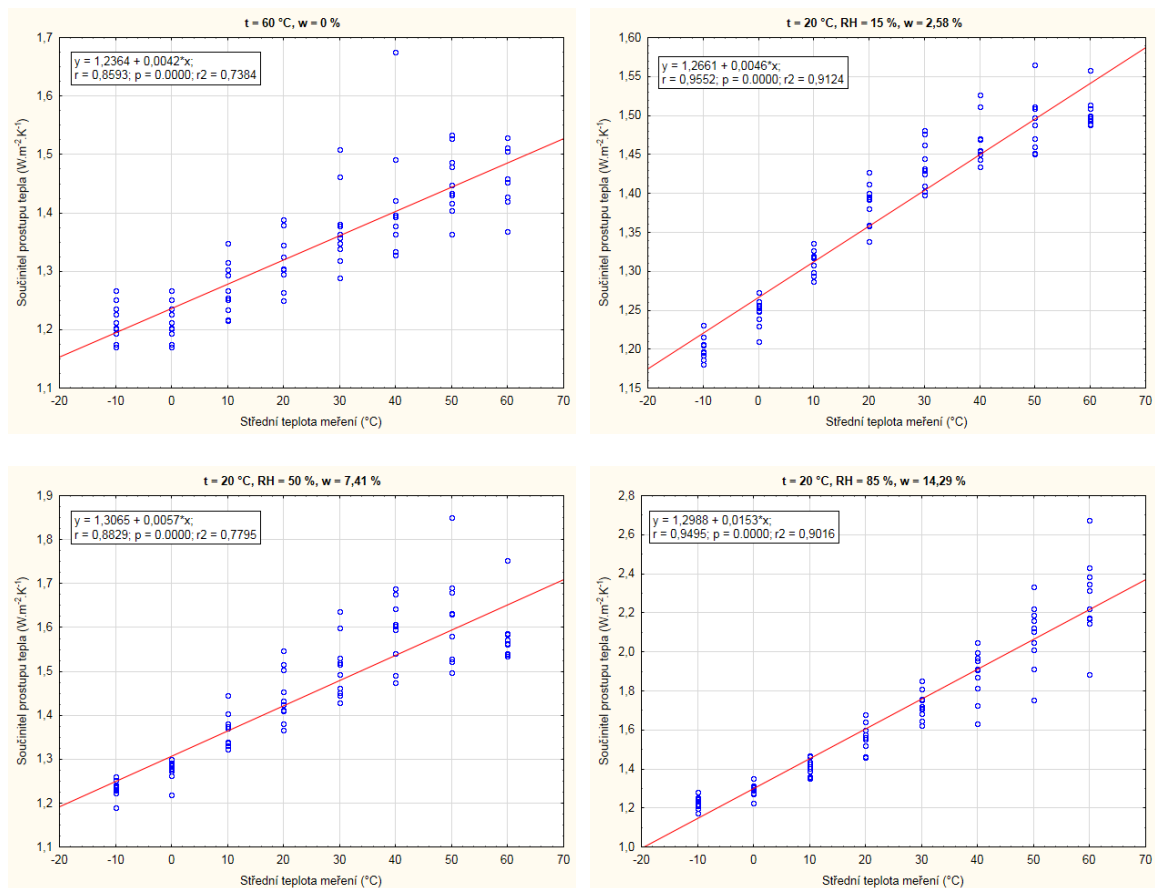
$$t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}, w = 0\%: \quad U = 1,2364 + 0,0042 * \theta_{msr}; \quad r = 0,8593; \quad p = 0,0000; \quad r^2 = 0,7384$$

$$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}, RH = 15\%, w = 2,58\%: \quad U = 1,2661 + 0,0046 * \theta_{msr}; \quad r = 0,9552; \quad p = 0,0000; \quad r^2 = 0,9124$$

$$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}, RH = 50\%, w = 7,41\%: \quad U = 1,3065 + 0,0057 * \theta_{msr}; \quad r = 0,8829; \quad p = 0,0000; \quad r^2 = 0,7795$$

$$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}, RH = 85\%, w = 14,29\%: \quad U = 1,2988 + 0,0153 * \theta_{msr}; \quad r = 0,9495; \quad p = 0,0000; \quad r^2 = 0,9016$$

Zde je možno konstatovat stejné vztahy jako u vlivu vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti.



Obr. 23: Regresní přímka závislosti součinitele prostupu tepla na teplotě

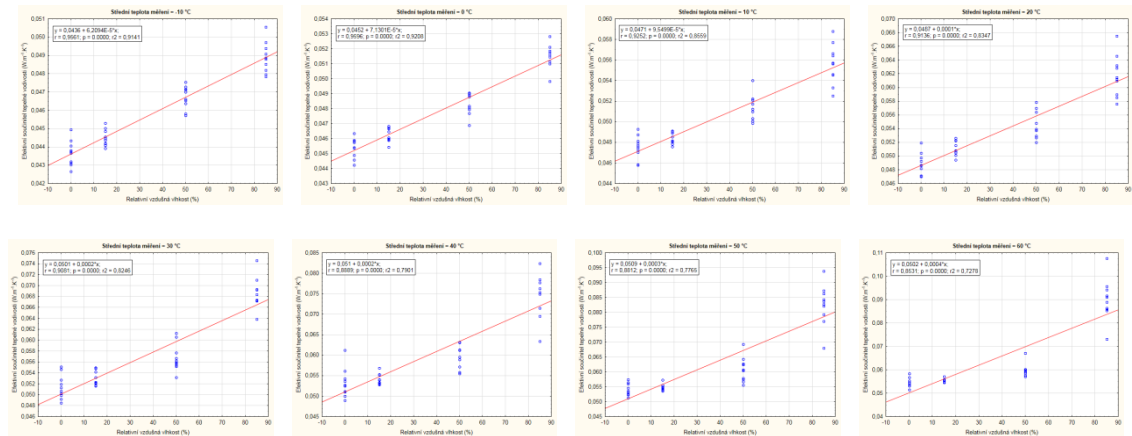
Závislost efektivního součinitele tepelné vodivosti λ na relativní vzdušné vlhkosti RH pro 8 rozdílných středních teplot měření θ_{msr} vyjadřují následující regresní rovnice

$\theta_{msr} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0436 + 6,2094\text{E-}5 * RH$; $r = 0,9561$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,9141$
$\theta_{msr} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0452 + 7,1301\text{E-}5 * RH$; $r = 0,9596$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,9208$
$\theta_{msr} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0471 + 9,5499\text{E-}5 * RH$; $r = 0,9252$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,8559$
$\theta_{msr} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0487 + 0,0001 * RH$; $r = 0,9136$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,8347$
$\theta_{msr} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0501 + 0,0002 * RH$; $r = 0,9081$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,8246$
$\theta_{msr} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,051 + 0,0002 * RH$; $r = 0,8889$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,7901$
$\theta_{msr} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0509 + 0,0003 * RH$; $r = 0,8812$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,7765$
$\theta_{msr} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$:	$\lambda = 0,0502 + 0,0004 * RH$; $r = 0,8531$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,7278$

Zde korelační koeficienty r potvrzují vysokou míru závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti. Tím je potvrzen pozitivní vztah, který je teoreticky očekáván díky rostoucímu podílu vody v materiálu při zvyšování jeho relativní vlhkosti, přičemž tepelná vodivost vody je značně vyšší, než dřevovláknitých desek.

Navržené lineární regresní rovnice jsou dle koeficientu determinace r^2 velmi dobře vystihující rozptyl naměřených hodnot zejména pro teploty -10 a 0 °C. S rostoucí teplotou měření však koeficient determinace klesá, což značí, že závislost již přechází z lineární do jiné, dle grafického znázornění pravděpodobně exponenciální.

Pozvolný pokles korelačního koeficientu s růstem teploty měření je pravděpodobně způsoben růstem variability hodnot u vyšších teplot.

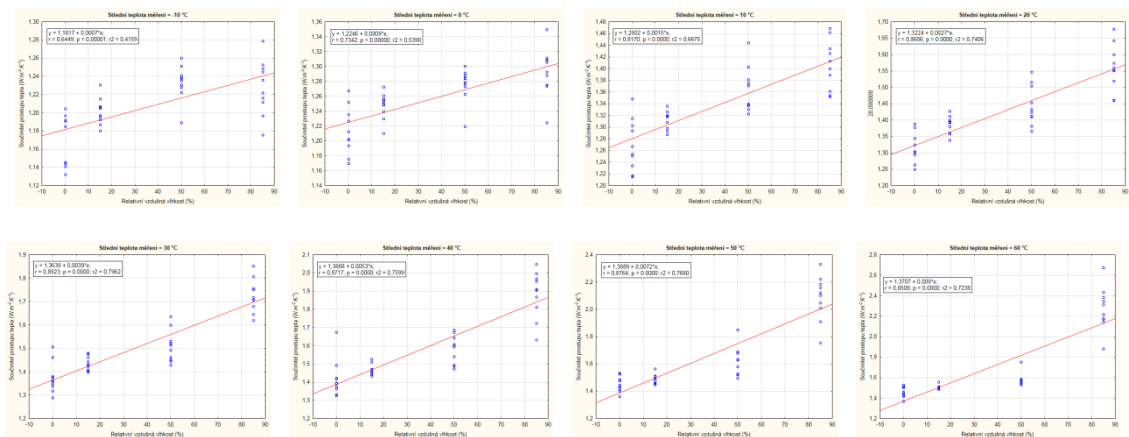


Obr. 24: Regresní přímka závislosti efektivního součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti

Závislost součinitele prostupu tepla U na relativní vzdušné vlhkosti RH pro 8 rozdílných středních teplot měření θ_{msr} vyjadřují následující regresní rovnice.

$\theta_{msr} = -10^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,1817 + 0,0007 \cdot RH$;	$r = 0,6449$;	$p = 0,00001$;	$r^2 = 0,4159$
$\theta_{msr} = 0^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,2246 + 0,0009 \cdot RH$;	$r = 0,7342$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,5390$
$\theta_{msr} = 10^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,2802 + 0,0015 \cdot RH$;	$r = 0,8170$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,6675$
$\theta_{msr} = 20^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,3224 + 0,0027 \cdot RH$;	$r = 0,8606$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,7406$
$\theta_{msr} = 30^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,3639 + 0,0039 \cdot RH$;	$r = 0,8923$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,7962$
$\theta_{msr} = 40^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,3888 + 0,0053 \cdot RH$;	$r = 0,8717$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,7599$
$\theta_{msr} = 50^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,3889 + 0,0072 \cdot RH$;	$r = 0,8764$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,7680$
$\theta_{msr} = 60^{\circ}\text{C}$:	$U = 1,3707 + 0,009 \cdot RH$;	$r = 0,8508$;	$p = 0,00000$;	$r^2 = 0,7238$

Dle korelačních koeficientů r je zde menší závislost tohoto parametru na vlhkosti, přičemž také míry vystižení daných hodnot r^2 proloženou přímkou jsou znatelně nižší, než u součinitele tepelné vodivosti. Také zde je možno pozorovat vliv teploty na korelační koeficient, který je ale opačný, než u součinitele prostupu tepla. Tedy s růstem teploty měření roste také míra závislosti součinitele prostupu tepla na vlhkosti.



Obr. 25: Regresní přímka závislosti součinitele prostupu tepla na vlhkosti

Komentář

S rostoucí teplotou dochází k růstu součinitele tepelné vodivosti dřevovláknité desky a tedy ke zhoršování jejich tepelněizolačních vlastností. To však pouze do teploty cca 40 °C, od níž dochází opět k poklesu této veličiny.

Míra vlivu obsahu vlhkosti na hodnoty součinitele prostupu tepla roste s obsahem vlhkosti v deskách. Pro materiál o vlhkosti 0 a 2,58 % nebyly zjištěny výrazné rozdíly. Největší růst součinitele tepelné vodivosti byl zaznamenán mezi deskami o vlhkosti cca 7,4 a 14,3 %.

4.2. Vliv teploty na tepelnětechnické parametry vytvořené obvodové konstrukce se vzduchovou vrstvou

Konstrukce obvodového pláště dřevostavby skládající se z CLT panelu, uzavřené vzduchové mezery a dřevovláknité desky při zabudování do stavby samozřejmě podléhá vlivu okolních podmínek. V předchozí kapitole byl studován vliv vlhkosti a teploty na dřevovláknitou desku, tedy materiál nejvíce exponovaný vnějším atmosférickým vlivům. Kromě něj je však i vzduchová vrstva, tvořící rozhraní mezi oběma materiály, ovlivňována

Metodika

Byl vytvořen model obvodové konstrukce sestávající z CLT panelu tloušťky 60 mm, vzduchové mezery tloušťky 50 mm a dřevovláknité desky tloušťky 32 mm.

Vzorky byly klimatizovány při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %, následně zváženy a byl stanoven efektivní součinitel tepelné vodivosti a součinitel prostupu tepla.

Po dokončení měření byly vzorky opětovně zváženy pro kontrolu možné změny vlhkosti.

Výsledky

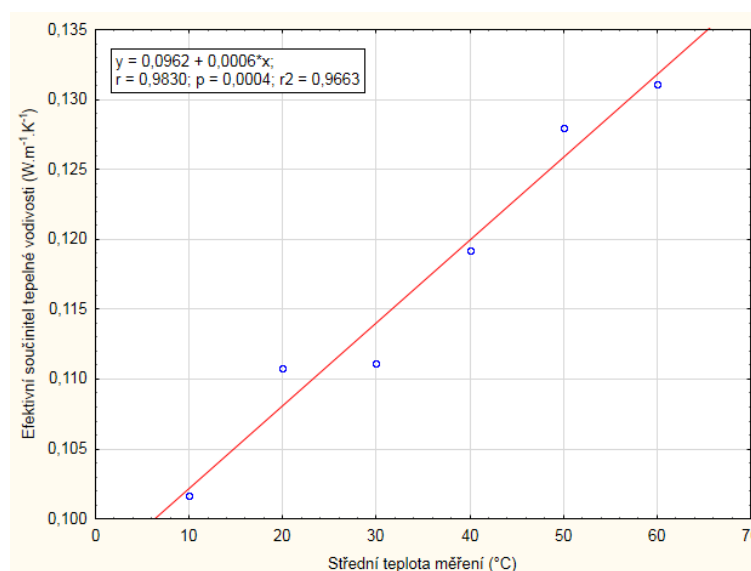
Byl zjištěn jasný příčinný vztah mezi teplotou měření a hodnotou efektivního součinitele tepelné vodivosti.

Navržená regresní přímka má parametry:

$$\lambda = 0,0962 + 0,0006 * \theta_{\text{msr}}; \quad r = 0,9830; \quad p = 0,0004; \quad r^2 = 0,9663$$

Korelační koeficient r potvrzuje vysokou míru závislosti. Koeficient determinace r^2 značí velmi dobré vystižení vzájemného vztahu lineární funkcí.

Tento fakt ukazuje na převahu vlivu CLT panelu na efektivní součinitel prostupu tepla před dřevovláknitou deskou. Složená konstrukce vykazuje lineární závislost, souhlasně jako vztah pro masivní dřevo (Yu et al. 2011). Pokles hodnot od cca 40 °C, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, je zde neznamenný.



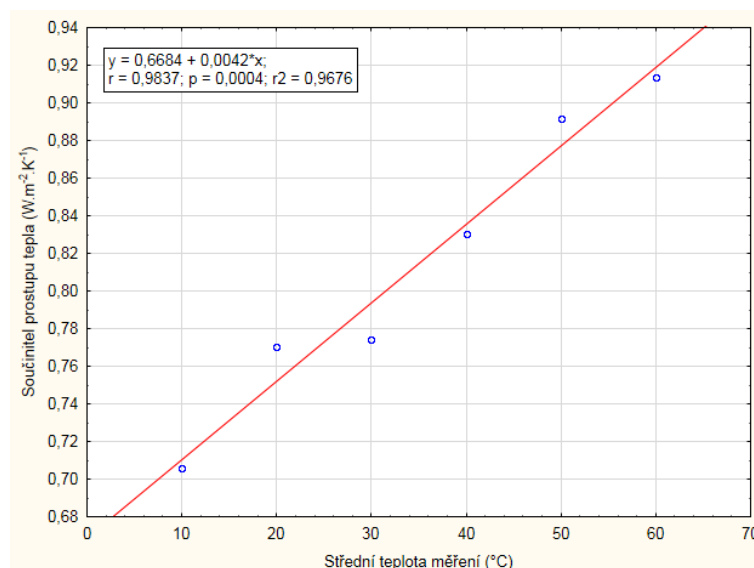
Obr. 26: Vliv teploty na hodnotu efektivního součinitele tepelné vodivosti

Vliv střední teploty měření na součinitel prostupu tepla je velmi téměř identický vlivu na efektivní součinitel tepelné vodivosti.

Navržená regresní přímka má parametry:

$$U = 0,6684 + 0,0042 * \theta_{\text{msr}}; \quad r = 0,9837; \quad p = 0,0004; \quad r^2 = 0,9676$$

I zde byla prokázána velmi silná závislost na teplotě. Koeficient determinace r^2 potvrzuje velmi dobré vystižení rozložení hodnot navrženou lineární funkcí. Daný vztah lze tedy považovat za lineární.



Obr. 27: Vliv teploty na hodnotu součinitele prostupu tepla

Komentář

Vliv teploty na hodnoty součinitele prostupu tepla i efektivního součinitele tepelné vodivosti je téměř identický. V obou případech se prokázala velmi silná přímá závislost dobře popsatelná lineární regresní funkcí.

4.3. Vliv vzduchové vrstvy na tepelnětechnické parametry vytvořené obvodové konstrukce

Experiment byl proveden s cílem zjistit vliv uzavřené vzduchové mezery na tepelněizolační vlastnosti obvodové konstrukce z materiálů na bázi dřeva. Skladba je identická, jako při experimentu v předcházející kapitole. Pro nosnou část byl vybrán masivní CLT panel tloušťky 60 mm, následovaný směrem do exteriéru vzduchovou vrstvou, která byla z druhé strany uzavřena dřevovláknitou deskou o tloušťce 32 mm. Zkoumány byly varianty se silou vzduchové vrstvy: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 mm.

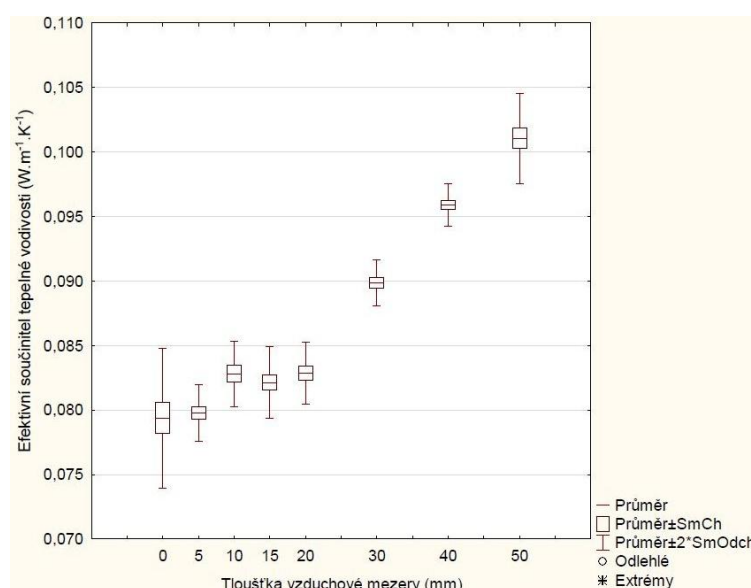
Metodika

Dřevovláknité desky i CLT panely byly klimatizovány při 20 °C a 65% relativní vzdušné vlhkosti. Následně byla vždy vytvořena konstrukce s odpovídající tloušťkou vzduchové vrstvy 0 až 50 mm a byla určena hodnota ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti konstrukce a tepelného odporu.

Výsledky

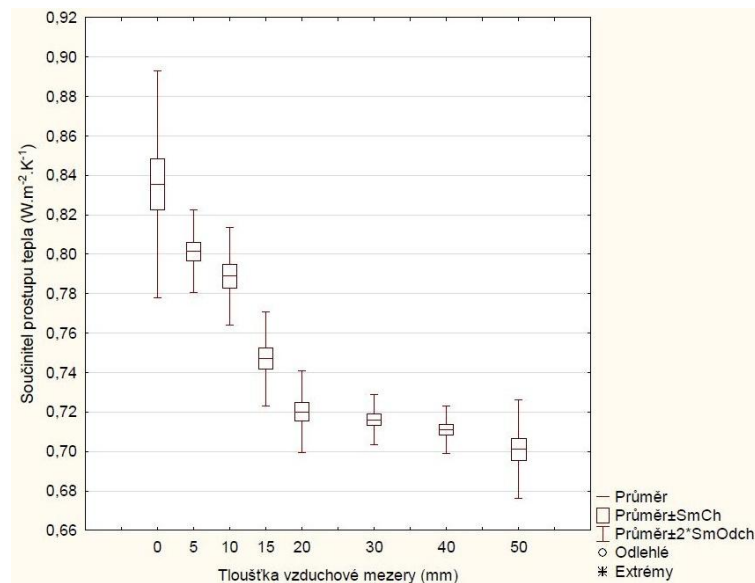
Výsledky měření efektivního součinitele tepelné vodivosti ukázaly v uvedeném intervalu pozitivní závislost na tloušťce vzduchové mezery. Uvedenému tvrzení se vymyká pouze hodnota pro mezeru tloušťky 15 mm. Vzhledem k rozptylu naměřených hodnot pro tloušťky 10, 15 i 20 mm je možno brát nižší průměrnou hodnotu u 15 mm spíše jako odchylku s předpokladem lehkého růstu součinitele tepelné vodivosti mezi 10 a 15 mm, dle teoretického předpokladu.

S růstem tloušťky dochází k čím dál rychlejšímu zvyšování součinitele tepelné vodivosti. To lze vysvětlit zvyšováním významu sdílení tepla prouděním ve vzduchové mezeře.



Obr. 28: Vliv tloušťky vzduchové mezery na součinitel tepelné vodivosti

Hodnota součinitele prostupu tepla, vypočtená jako převrácená hodnota tepelného odporu konstrukce prudce klesá mezi hodnotami 0 a 20 mm tloušťky vzduchové vrstvy jak je vidno na následujícím krabicovém grafu. Pouhé zařazení vzduchové mezery tloušťky 5 mm do konstrukce tedy relativně významně pomůže snížit prostup tepla konstrukcí díky poklesu průměrných hodnot součinitele prostupu tepla cca o $0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Mezi sestavami bez vzduchové mezery a se vzduchovou mezerou tloušťky 50 mm byl zaznamenán markantní rozdíl hodnot součinitele prostupu tepla, a to snížení o cca $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, což představuje 16% zlepšení tepelněizolační schopnosti.



Obr. 29: Vliv tloušťky vzduchové mezery na součinitel prostupu tepla

Komentář

Vložení vzduchové vrstvy do konstrukce zlepšuje její tepelněizolační vlastnosti, jak ukazuje průběh součinitele prostupu tepla. Jako optimální tloušťku mezery je možno určit 20 mm, jelikož v tomto bodě přechází prudký pokles součinitele v další pozvolné klesání. Toto je pravděpodobně způsobeno růstem vlivu proudění vzduchu v dutině.

4.4. Vliv emisivity povrchu na tepelnětechnické parametry vytvořené obvodové konstrukce se vzduchovou vrstvou

Cílem tohoto měření bylo určit vliv emisivity vnitřních povrchů vzduchové mezery na tepelněizolační vlastnosti.

Metodika

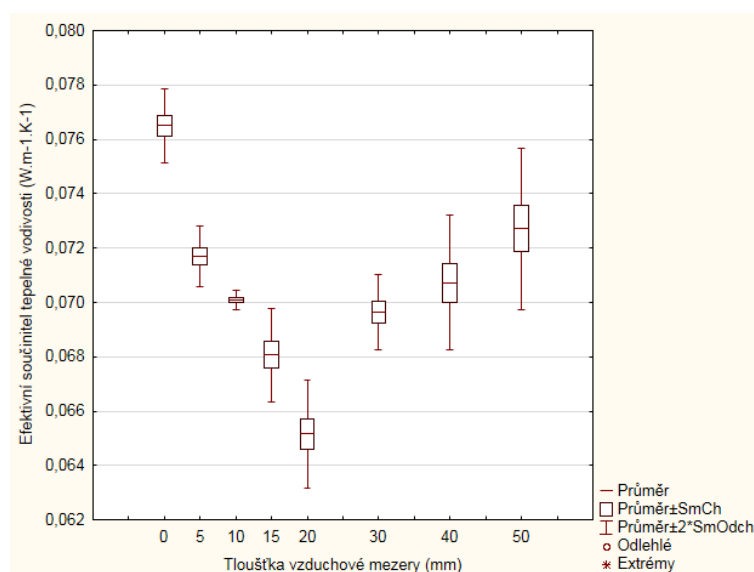
Identická konstrukce jako v předešlém měření – tedy CLT panel 60mm, vzduchová mezera, dřevovláknitá deska 32 mm byly doplněny o difuzní reflexní folii aplikovanou na oba vnitřní povrchy sousedící se vzduchovou vrstvou. Po klimatizaci při 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 % byly vzorky postupně vkládány do měřicího zařízení a stanovovány hodnoty efektivního součinitele tepelné vodivosti a součinitele prostupu tepla. Toto bylo prováděno postupně pro varianty s tloušťkami vzduchové mezery 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 mm.

Výsledky

Na rozdíl od měření efektivního součinitele tepelné vodivosti konstrukce bez reflexní folie zde nedochází v celé oblasti měřených tloušťek vzduchové vrstvy k růstu součinitele a tedy ke zhoršování tepelněizolačních vlastností konstrukce.

Z krabicového grafu je dobře patrné, že od 0 do 20mm tloušťky vzduchové vrstvy dochází ke strmému poklesu efektivního součinitele tepelné vodivosti a tedy i k poklesu tepelného toku přes danou konstrukci. To potvrzuje předpoklad snížení míry přenosu tepla vzduchovou vrstvou při aplikaci reflexních izolací na oba vnitřní povrchy. Snížením emisivity povrchů ohraničujících vzduchovou vrstvu bylo pravděpodobně dosaženo snížení sálání tepla mezi povrchy. K podobným hodnotám optimální tloušťky vzduchové vrstvy v konstrukci dospěl také Aydin (2000).

Od hodnoty 20 mm dále tepelná vodivost opět roste. Předpokládaným činitelem této změny je rostoucí vliv přenosu tepla prouděním, které kompenzuje účinek reflexní folie a dochází k vyrovnávání součinitele tepelné vodivosti na původní hodnoty a jeho dalšímu růstu.



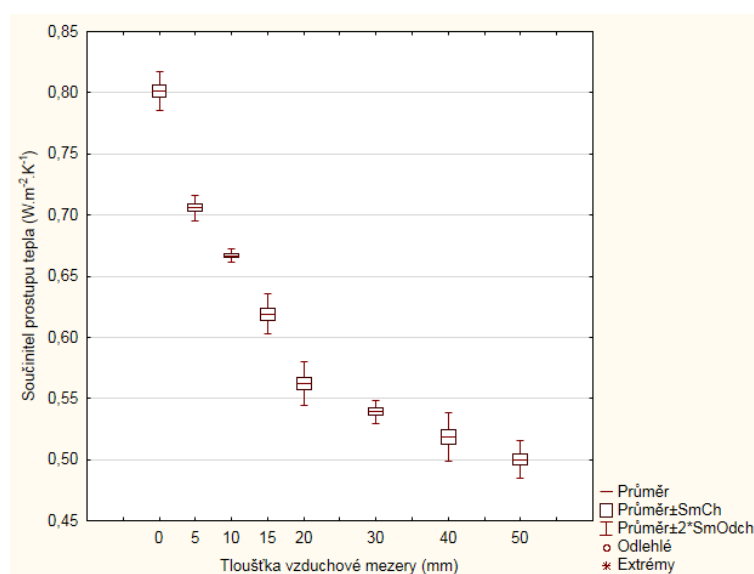
Obr. 30: Vliv tloušťky vzduchové mezery na součinitel tepelné vodivosti konstrukce s reflexní folií

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že ideální tloušťka vzduchové vrstvy ohraničené nízkoemisivními povrchy je 20 mm, jelikož tehdy vykazuje konstrukce nejnižší hodnotu efektivního součinitele tepelné vodivosti a tedy nejúčinnější tepelněizolační schopnosti.

Na následujícím grafu je zobrazen průběh součinitele prostupu tepla. Do úrovně tloušťky vzduchové mezery 20 mm hodnoty součinitele strmě klesají, což je v souladu s účinkem reflexní folie na omezení sdílení tepla uvnitř konstrukce sáláním a pokles efektivního součinitele tepelné vodivosti v tomto intervalu.

Při minimální úrovni součinitele tepelné vodivosti je přítom hodnota součinitele prostupu tepla konstrukce s reflexní folií o téměř 22 % nižší, než bez použití folie.

Od 20 do 50 mm tloušťky vzduchové mezery již hodnoty součinitele prostupu tepla klesají pomaleji, pravděpodobně díky rostoucímu vlivu přenosu tepla prouděním vzduchu v dutině.



Obr. 31: Vliv tloušťky vzduchové mezery na součinitel prostupu tepla konstrukce s reflexní folií

Komentář

Vložení reflexní folie do konstrukce pomohlo snížit součinitel prostupu tepla při každé tloušťce vzduchové mezery. Největší rozdíl mezi hodnotami s a bez reflexních folií je při tloušťce 50 mm, a to 0,2012 W.m⁻².K⁻¹, což představuje 28 %.

Efektivní součinitel prostupu tepla díky snížení emisivity obvodových povrchů vzduchové dutiny zapříčinilo pokles této hodnoty až do úrovně 20 mm tloušťky mezery. Bylo dosaženo zlepšení tepelněizolačních schopností ve srovnání s variantou bez reflexních izolací, kde hodnota efektivního součinitele tepelné vodivosti roste v celém sledovaném intervalu tlouštěk vzduchových vrstev.

Závěr

V práci byly zkoumány tepelnětechnické vlastnosti materiálů na bázi dřeva a konstrukce tyto materiály využívající.

V první části byl určován vliv vlhkosti a teploty na hodnoty efektivního součinitele tepelné vodivosti a součinitele prostupu tepla. Byl prokázán téměř lineární vztah mezi efektivním součinitelem tepelné vodivosti a teplotou v rozmezí -10 až cca 40 °C. Dále s rostoucí teplotou docházelo k pomalejšímu růstu či poklesu této veličiny, což konstatují také jiní autoři (Zhou et al. 2013).

S rostoucí vlhkostí docházelo také k růstu součinitele tepelné vodivosti i součinitele prostupu tepla. Mezi hodnotami pro relativní vlhkost desek 0 a 2,58 % nebyly nalezeny výrazné rozdíly v hodnotách. Nejmarkantnější vzrůst byl pozorován mezi 7,41 a 14,29% vlhkostí.

Ve druhé části práce byl sestaven model konstrukce sestávající z dřevěného CLT panelu, vzduchové vrstvy o různé tloušťce a dřevovláknité desky.

Byl prokázán jasný příčinný vztah mezi teplotou a hodnotami efektivního součinitele tepelné vodivosti i součinitele prostupu tepla. Vztahy byly definovány lineární regresní závislostí s dobrou mírou vystižení rozptylu měřených hodnot potvrzenou koeficientem determinace. Růst tepelné vodivosti s teplotou konstatovali například také Yu et al. (2011).

Analýza vlivu tloušťky vzduchové mezery na tepelnou vodivost ukázala pozitivní vztah obou veličin, přičemž k markantnímu růstu tepelné vodivosti dochází od hodnoty 20 mm tloušťky. Předpokladem pro tento vývoj je stoupající podíl přenosu tepla prouděním vzduchu v dutině a tím redukce tepelněizolační schopnosti dutiny.

Aplikace reflexní folie na vnitřní povrchy vzduchové dutiny vedla ke snížení součinitele prostupu tepla při všech tloušťkách dutiny. Největší vliv byl zaznamenán při 50 mm, a to snížení ve srovnání s hodnotou bez reflexní izolace o téměř 28 %.

Hodnoty efektivního součinitele prostupu tepla na rozdíl od varianty bez reflexních izolací klesaly do tloušťky vzduchové vrstvy 20 mm, dále následoval jejich opětovný růst. Tento fakt naznačuje hodnotu 20 mm jako optimální tloušťku vzduchové dutiny z hlediska míry vlivu na tepelněizolační vlastnosti konstrukce.

Získaná data z měření byla zpracována do podoby použitelné při numerické simulaci chování konstrukce a mohou tak sloužit k její verifikaci.

Práce naznačuje vhodnost užití konstrukce složené z CLT panelu, vzduchové vrstvy ohraničené reflexními povrchy a dřevovláknité desky z pohledu tepelněizolačních vlastností. Všechny použité materiály jsou otevřené průchodu vzdušné vlhkosti, proto je možno doporučit v návazné práci zhodnocení chování navržené konstrukce z pohledu difuze vlhkosti a rizika kondenzace vodních par při zabudování do stavby.

Dalším směrem vývoje může být návrh kompozitního stavebního panelu s tepelněizolačními vlastnostmi.

Summary

The main focus of the thesis is to investigate thermal properties of wood based materials and structures deriving benefit from them.

In the first part, the influence of temperature and humidity on effective thermal conductivity and thermal transmittance values was investigated. Nearly linear relation between thermal conductivity coefficient and temperature between -10 and 40 °C was proved. With further temperature increase this value happened to grow slower or rather decrease. This stated also the Zhou et al. (2013).

Moisture content rise lead to increase of both thermal conductivity coefficient and thermal transmittance coefficient. There were no emphatic differences for the values of boards with 0 and 2,58% moisture content. The most expressive growth was observed between 7,41 and 14,29 % moisture content.

In the second part of the thesis, there was assembled a model of a building structure consisting of massive wooden CLT panel, air layer of various thickness and wood insulation fibreboard.

It was proved that there is plain casual relation between temperature and effective thermal conductivity and thermal transmittance values. Interactions were defined by linear regression relationship with good explanation of measured values variance, proved by coefficient of determination. Yu et al. (2011) also stated the rise of thermal conductivity with increasing temperature.

Analysis of influence of the air layer thickness on the thermal conductivity showed positive relation of both values. Considerable increase of thermal conductivity was observed up from the 20 mm air layer thickness. This tendency is probably thanks to the rising ratio of thermal convection in the air gap and therefore reduction of the thermal insulation ability of the air layer.

Use of the reflex foil for the air gap's inner surface coating lead to drop of thermal transmittance for all air layer thicknesses. the biggest influence was recorded at 50 mm – decrease of 28 % compared to the value without the reflex foil.

Values of effective thermal conductivity fell for the air gap layer thickness of 0 – 20 mm (unlike the version without reflex foils). From 20 mm up, the values rose again.

This fact implies the 20 mm air gap thickness as an optimal value for the highest relative thermal insulation ability.

Acquired data was processed to be utilizable for numerical simulation and its verification.

The thesis predicates the structure consisting of CLT, air gap coated with reflex foils and wood fibreboard to be acceptable for use as thermal insulation. All used materials are diffusive opened to the air humidity. Therefore it is suggested to evaluate proposed structure composition from the aspect of humidity diffusion when mounted into the building.

Another development direction can be to design a composite building material with thermal insulating properties.

Informační zdroje

BERGMAN, T a Frank P INCROPERA. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. / Hoboken, NJ: Wiley, c2011, xxiii, 1048 p. ISBN 978-047-0501-979.

ÇENGEL, Yunus A. *Heat and mass transfer: a practical approach*. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, c2007, xxiv, 901 p. McGraw-Hill series in mechanical and aerospace engineering. ISBN 978-007-3250-359.

HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM, c2013, 576 s. ISBN 978-80-214-4123-1.

HAŠEK, Pavel. *Tabulky pro tepelnou techniku*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1980.

HEJHÁLEK, Jiří. *Tepelné záření a navrhování reflexních fólií do staveb*. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2014, 119 s. ISBN 978-80-900860-9-8.

HRÁZSKÝ, Jaroslav, Pavel KRÁL. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007. ISBN 978-80-7375-034-3.

CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2009, 268 s. ISBN 978-80-247-2532-1.

KOLB, Josef. *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 2., aktualiz. vyd. v České republice. Překlad Bohumil Koželouh. Praha: Grada, 2011, 317 s. ISBN 978-80-247-4071-3.

PŘÍHODA, Miroslav, Miroslav RÉDR. *Sdílení tepla a proudění*. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 9788024831923.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material* [online]. Madison, Wisconsin: United States Department of Agriculture Forest Service, 2010 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.fpl.fs.fed.us/>

SIAU, John F. *Transport Processes in Wood*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. ISBN 978-3-642-69215-4.

SIAU, John F. *Wood: Influences of moisture on physical properties*. Virginia: Virg.Polytech.Institute&State University, 1995. ISBN 0-9622181-0-3.

VAVERKA, J. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. ISBN 80-214-2910-0.

VAVERKA, J. CHYBÍK, J. MRLÍK, F. *Stavební fyzika: Stavební tepelná technika*. 2. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1649-1.

M. A. Antar, *Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block*, Energy, 35 (2010) 3508-3516.

R. Arambakam, H. Vahedi Tafreshi, B. Pourdeyhimi, *Modeling performance of multi-component fibrous insulations against conductive and radiative heat transfer*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71 (2014) 341-348.

- G.-M. Armando, B.-B. J. Armando, V.-C. Christian, V.H. Rangel-Hernández, J.M. Belman-Flores, *Analysis of the conjugate heat transfer in a multi-layer wall including an air layer*, Applied Thermal Engineering, 30 (2010) 599-604.
- D.P. Aviram, A.N. Fried, J.J. Roberts, *Thermal properties of a variable cavity wall*, Building and Environment, 36 (2001) 1057-1072
- R. Baetens, B. P. Jellea, J. V. Thueb, M. J. Tenpierikd, S. Grynninga, S. Uvsløkka, A. Gustavsene, *Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond*, Energy and Buildings, 42 (2010a) 147-172.
- R. Baetens, B. P. Jellea, A. Gustavsend, S. Grynninga, *Gas-filled panels for building applications: A state-of-the-art review*, Energy and Buildings, 42 (2010b) 1969-1975.
- P. Bekhta, E. Dobrowolska, *Thermal properties of wood-gypsum boards*, Holz Als Roh - Und Werkstoff, 64 (2005) 427-428.
- V. Brombacher, F. Michel, P. Niemz, T. Volkmer, *Investigation of thermal conductivity and moisture behaviour of fiberboards and material combinations*, Bauphysik, 34 (2012) 157-169.
- G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu, *Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance*, Energy and Buildings, 43 (2011) 2613-2620.
- J. Dömény, V. Koiš, P. Pařil, *Impregnability of european beech false heart wood after microwave treatment*, Pro Ligno. 9 (2013)190-194.
- H-P. Ebert, F. Hemberger, *Intercomparison of thermal conductivity measurements on a calcium silicate insulation material*, International Journal of Thermal Sciences, 50 (2011) 1838-1844
- V. Gur'ev, S. Khainer, *Correlation of structure and thermal conductivity of highly disperse porous-fiber materials under variations of temperature and moisture*, Glass & Ceramics, 56 (1999) 364-368.
- L. Gustavsson, R. Madlener, H.-F. Hoen, G. Jungmeier, T. Karjalainen, S. Klöhn, K. Mahapatra, J. Pohjola, B. Solberg, H. Spelter, *The Role of Wood Material for Greenhouse Gas Mitigation*, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11 (2006a) 1097-1127.
- L. Gustavsson, K. Pingoud, R. Sathre, *Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings*, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11 (2006b) 667-691.
- M. Jiřičková, Z. Pavlík, L. Fiala, R. Černý, *Thermal Conductivity of Mineral Wool Materials Partially Saturated by Water*, International Journal Of Thermophysics 27 (2006) 1214-1227.
- H. Klímová, J. Tippner, V. Sebera, *Influence Analysis of Density Distribution of the Wood-based Composite Material on the Stiffness with Use of Numerical Simulation*, International conference "wood science and engineering in the third millennium" – icwse. 9 (2013) 918.
- J. Kosny, A. Asizb, I. Smithc, S. Shresthad, A. Fallahi, *A review of high R-value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques*, Energy and Buildings, 72 (2014) 441-456.

S.-H. Li, H. Xie, *Building professionals' attitudes towards the use of wood in building design and construction in Taiwan*, *European Journal of Wood and Wood Products*, 71 (2013) 497-505.

T.M.I. Mahlia, A. Iqbal, *Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives*, *Energy*, 23 (2010) 2242-2250.

L. Matias, C. Santos, M. Reis, L. Gil, *Declared value for the thermal conductivity coefficient of insulation corkboard*, *Wood Science And Technology*, 31 (1997) 355-365.

L. E. Mavromatidis, A. Bykalyuka, M. El Mankibia, P. Michela, M. Santamourisb, *Numerical estimation of air gaps' influence on the insulating performance of multilayer thermal insulation*, *Building and Environment*, 49 (2012) 227-237

G. Pajchrowski, A. Noskowiak, A. Lewandowska, W. Strykowski, *Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings*, *Construction and Building Materials*, 52 (2014) 428-436.

Z. Pasztory, P.N. Peralta, I. Peszlen, *Multi-layer heat insulation system for frame construction buildings*, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 713-717.

H. H. Saber, *Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications*, *Building and Environment*, 52 (2012) 32-44.

D. Salmon, *Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and source of reference materials*, *Measurement Science and Technology*, 12 (2001) 89-98.

V. Sebera, J. Tippner, M. Šimek, J. Šrajer, D. Děcký, H. Klímová, *Poisson's ratio of the MDF in respect to vertical density profile*, *European Journal of Wood and Wood Products*, 72 (2014) 407-410.

ISSN 0018-3768.

D. Smith, *Thermal conductivity of fibrous glass board by guarded hot plates and heat flow meters: An international round-robin*, *International Journal Of Thermophysics* 18 (1997) 1557-1573.

W. Sonderegger, P. Niemz, *Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials*, *European Journal of Wood and Wood Products*, 67 (2009) 313-321.

W. Sonderegger, P. Niemz, *Thermal and moisture flux in soft fibreboards*, *European Journal of Wood and Wood Products*, 70 (2012) 25-35.

J. Tippner, E. Troppová, R. Hřčka, P. Halachan, R. Lagaña, V. Sebera, M. Trcala, *Probabilistic Numerical Analysis of Quasi-stationary Thermal Measurement of Medium Density Fiberboard*. 57th SWST International convention, 7th Wood structure and properties conference, 6th European hardwood conference, (2014) 878-886.

I. Traoré, , D. Lacroix, , L. Trovalet, G. Jeandel, *Heat and moisture transport in wooden multi-composite panels. Dynamic study of the air layer impact on the building envelope energetic behavior*, *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (2011) 2290-2303.

- E. Troppová, M. Švehlík, J. Tippner, R. Wimmer, *Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards*, *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-014-0467-4 (2014).
- E. Troppová, J. Tippner, R. Hřčka, P. Halachan, *Quasi-Stationary Measurements of Lignamon Thermal Properties*, *BioResources*, 8 (2013) 6288–6296.
- M. G. Vrachopoulos, M. K. Koukou, D. G. Stavlas, V. N. Stamatopoulos, A. F. Gonidis, E. D. Kravvaritis, *Testing reflective insulation for improvement of buildings energy efficiency*, *Central European Journal of Engineering*, 2 (2012) 83-90.
- K.G. Wakili, C. Tanner, *U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks: Hot box measurement versus numerical analysis*, *Energy and Buildings*, 35 (2003) 675-680.
- K. G. Wakili, T. Stahl, S. Brunner, *Effective thermal conductivity of a staggered double layer of vacuum insulation panels*, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 1241-1246.
- Q. Wu, O. Suchsland, *Prediction of moisture content and moisture gradient of an overlaid particleboard*, *Wood and Fiber Science* 28(2) (1996) 227-239.
- R. Wulf, G. Barth, U. Gross, *Intercomparison of Insulation Thermal Conductivities Measured by Various Methods*, *International Journal of Thermophysics*, 28,(2007) 1679-1692.
- Z. Xie, L. Chena, F. Sun, *Constructal optimization for an insulating wall combining heat flow, strength and volume*, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54 (2014) 141-147.
- G.F. Xie, X.D. Li, R.S. Wang, *Study on the heat transfer of high-vacuum-multilayer-insulation tank after sudden, catastrophic loss of insulating vakuuum*, *Cryogenics*, 50 (2010) 682-687.
- Z.T. Yu, X. Xu, L.W. Fan, Y.C. Hu, K.F. Cen, *Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature and moisture content*, *Forest Product Journal*, 61 (2011) 130-135.
- J. Zhou, H. Zhou, C. Hu, S. Hu, *Measurement of thermal and dielectric properties of medium density fiberboard with different moisture contents*, *BioResources*, 8 (2013) 4185-4192.
- A - SERVICE, s.r.o. AGEPAN SYSTEM [online]. 2014 [cit. 2014-12-04]. Dostupné z: <http://www.agepan-system.cz/>
- AGROP NOVA a. s. Agrop [online]. 2014 [cit. 2014-09-15]. Dostupné z: <http://www.agrop.cz/>
- EKOPANELY SERVIS s.r.o. EKOPANELY [online]. 2014 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <http://www.ekopanely.cz/>
- GUTTA ČR - Praha spol. s r.o. GUTTA [online]. 2014 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <https://www.gutta.com>
- INSOWOOL s.r.o. INSOWOOL [online]. 2014 [cit. 2014-12-04]. Dostupné z: <http://www.insowool.cz/>
- JUTA a.s. JUTA [online]. 2014 [cit. 2014-012-05]. Dostupné z: <http://www.juta-turnov.cz/>
- NETZSCH. Operating Instructions HEAT FLOW METER HFM 436/3 Lambda. 2008.

OMEGA project s.r.o. Konopná izolace - Canabest [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.konopna-izolace.cz/>

SMREČINA HOFATEX, a.s. Hofatex UD. leden 2011.

STEICO Gruppe. STEICO [online]. 2014 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.steico.com/cz/>

SOLID PRO STĚNY A PŘÍČKY. AGROP NOVA a.s. Novatop system [online]. 2013 © [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.novatop-system.cz/co-je-novatop/sortiment/solid-pro-steny-a-pricky/>

TART, s.r.o. SUNFLEX [online]. 2013 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.sunflex.cz/>

VICARIUS s.r.o. VICARIUS Canna [online]. 2013 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://www.vicarius.cz/>

ČSN EN ISO 6946 Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda

ČSN EN ISO 10456 Stavební materiály a výrobky - Tepelně vlhkostní vlastnosti - Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot

ČSN 72 7306 Stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů a výrobků

ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov

ČSN 72 7010 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Společná ustanovení

ČSN 72 7012-1 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Deskové metody. Část 1: Společná ustanovení

ČSN 72 7012-2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 2: Metoda chráněné teplé desky

ČSN 72 7012-3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku

ČSN EN ISO 8990. Tepelná izolace - Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu - Kalibrovaná a chráněná teplá skříň

ČSN 72 7013 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda koule

ČSN 72 7011 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda válce

Seznam příloh

Příloha č. 1: Vliv teploty a vlhkosti na tepelnětechnické parametry dřevovláknitých desek – data

Příloha č. 2: Vliv teploty na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce se vzduchovou vrstvou – data

Příloha č. 3: Vliv vzduchové vrstvy na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce - data

Příloha č. 4: Vliv emisivity povrchu na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce se vzduchovou vrstvou – data

Datová příloha – CD:

- **Výstupy měření tepelnětechnických vlastností**
- **Zpracovaná data měření tepelnětechnických vlastností**
- **Grafy závislostí**

**Příloha č. 1: Vliv teploty a vlhkosti na tepelnětechnické
parametry dřevovláknitých desek - data**

		Relativní vzdušná vlhkost (%)	Střední teplota měření (°C)							
			-10	0	10	20	30	40	50	60
Efektivní součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Průměrná hodnota	0	0,0437	0,0454	0,0475	0,0490	0,0514	0,0531	0,0544	0,0550
	Variační koeficient		1,56%	1,46%	2,34%	3,01%	4,30%	6,66%	3,79%	3,83%
	Průměrná hodnota	15	0,0445	0,0462	0,0484	0,0511	0,0529	0,0541	0,0549	0,0555
	Variační koeficient		0,99%	0,98%	1,10%	2,07%	2,43%	2,46%	1,88%	1,24%
	Průměrná hodnota	50	0,0467	0,0483	0,0514	0,0544	0,0568	0,0595	0,0608	0,0595
	Variační koeficient		1,32%	1,47%	2,40%	3,76%	4,35%	4,63%	6,81%	4,89%
	Průměrná hodnota	85	0,0489	0,0515	0,0556	0,0617	0,0682	0,0744	0,0825	0,0900
	Variační koeficient		2%	2%	3%	5%	5%	7%	8%	10%

		Relativní vzdušná vlhkost (%)	Střední teplota měření (°C)							
			-10	0	10	20	30	40	50	60
Součinitel prostu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Průměrná hodnota	0	1,1658	1,2130	1,2685	1,3085	1,3717	1,4144	1,4503	1,4626
	Variační koeficient		2,53%	2,61%	3,43%	3,74%	4,57%	6,44%	3,72%	3,67%
	Průměrná hodnota	15	1,2016	1,2473	1,3124	1,3853	1,4353	1,4661	1,4884	1,5056
	Variační koeficient		1,21%	1,42%	1,18%	1,96%	2,04%	2,00%	2,28%	1,34%
	Průměrná hodnota	50	1,2332	1,2757	1,3634	1,4424	1,5054	1,5776	1,6071	1,5779
	Variační koeficient		1,57%	1,81%	2,75%	4,07%	4,38%	4,97%	6,39%	3,71%
	Průměrná hodnota	85	1,2277	1,2932	1,4051	1,5574	1,7225	1,8745	2,0730	2,2573
	Variační koeficient		2,46%	2,56%	3,01%	4,50%	4,05%	7,17%	8,37%	9,42%

**Příloha č. 2: Vliv teploty na tepelnětechnické parametry
stavební konstrukce se vzduchovou vrstvou – data**

	Střední teplota měření (°C)					
	10	20	30	40	50	60
Efektivní součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0,1016	0,1107	0,1111	0,1192	0,1280	0,1311
Součinitel prostupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	0,7056	0,7706	0,7741	0,8303	0,8916	0,9134

Příloha č. 3: Vliv vzduchové vrstvy na tepelnětechnické parametry stavební konstrukce - data

		Tloušťka vzduchové mezery (mm)							
		0	5	10	15	20	30	40	50
Efektivní součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Průměrná hodnota	0,0794	0,0798	0,0828	0,0821	0,0828	0,0898	0,0959	0,1011
	Variační koeficient	3,42%	1,37%	1,54%	1,68%	1,44%	1,00%	0,87%	1,74%
Součinitel prostupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Průměrná hodnota	0,8346	0,8013	0,7888	0,7469	0,7200	0,7161	0,7108	0,7009
	Variační koeficient	3,45%	1,31%	1,56%	1,57%	1,44%	0,89%	0,84%	1,78%

**Příloha č. 4: Vliv emisivity povrchu na tepelnětechnické
parametry stavební konstrukce se vzduchovou vrstvou -
data**

		Tloušťka vzduchové mezery (mm)							
		0	5	10	15	20	30	40	50
Efektivní součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Průměrná hodnota	0,0767	0,0717	0,0701	0,0681	0,0652	0,0696	0,0707	0,0727
	Variační koeficient	0,73%	0,77%	0,24%	1,26%	1,52%	0,99%	1,75%	2,04%
Součinitel prostupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Průměrná hodnota	0,8039	0,7057	0,6668	0,6190	0,5619	0,5393	0,5184	0,4997
	Variační koeficient	0,85%	0,75%	0,40%	1,32%	1,59%	0,88%	1,89%	1,53%