

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva  
z hlediska tepelných vlastností**

Disertační práce

Autor: Ing. Miloš Pavelek  
Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Horáček

2019

## ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Miloš Pavelek

Zpracování dřeva a technika v lesním hospodářství

Název práce

**Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva z hlediska tepelných vlastností**

Název anglicky

**Thermal Performance Analysis of Wood-Based Building Envelopes**

### Cíle práce

Cílem práce je analýza stavebních obvodových konstrukcí ve formě stěnových panelů z hlediska tepelných vlastností. Zejména se jedná o součinitel prostupu tepla a tepelný odpor celé konstrukce. Stěnové panely na bázi dřeva jsou rozděleny do dvou okruhů podle způsobu porovnání naměřených parametrů. V prvním okruhu jsou panely zvoleny dle vlastních návrhů. Jedná se o panely na bázi dřeva s využitím zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu jako obnovitelné sypané tepelné izolace. Konkrétně je to sendvičový panel s výplní z pšeničných plev, sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky a sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky. Pro porovnání k těmto panelům je testován sendvičový panel s výplní z minerální vlny, která je v současné době nejvíce používanou průmyslově vyráběnou tepelnou izolací. V druhém okruhu jsou stěnové panely dodány od výrobců jako jejich nejvíce používané typy v tuzemsku. Jedná se o panely z masivního dřeva, panely rámové dřevostavby a panel z keramických bloků.

Dílním cílem práce je vytvoření návrhu konstrukce experimentálního zařízení teplé skříně, které je pro účel této práce postaveno a modifikováno. Pro zkušební zařízení je použita experimentální metoda teplé skříně při ustálených okrajových podmínkách dle současné normy ČSN EN ISO 8990 (1998) a navržená vlastní metoda měření při neustálených okrajových podmínkách. Obě metody jsou porovnány na základě vyhodnocených tepelně-technických parametrů. Naměřené hodnoty budou dále porovnány s parametry získanými z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540-3 (2005).

Dalším cílem je vývoj a optimalizace součinitele prostupu tepla za účelem získání stěnových panelů požadovaných vlastností.

### Metodika

Řešení práce je rozděleno do následujících okruhů:

1) Návrh konstrukce experimentálního zařízení teplé skříně s návrhem vlastní metody při neustálených okrajových podmínkách

2) Porovnání tepelných parametrů stěnových panelů dle vlastního návrhu, které budou testovány při ustálených a neustálených okrajových podmínkách metodou teplé skříně

3) Porovnání tepelných parametrů stěnových panelů dodaných od výrobců naměřených při neustálených okrajových podmínkách a matematického modelu

1) Návrh konstrukce experimentálního zařízení teplé skříně s návrhem vlastní metody při neustálených okrajových podmínkách

V práci bude vytvořen návrh konstrukce experimentálního zařízení teplé skříně, které bude pro účel této práce postaveno ve fakultní dílně. Na zařízení budou provedeny modifikace za účelem eliminace celkových tepelných ztrát stěnami teplé skříně. Pro zkušební zařízení bude použita experimentální metoda teplé skříně při ustálených okrajových podmínkách dle současné normy ČSN EN ISO 8990 (1998) a navržená vlastní metoda měření při neustálených okrajových podmínkách (s nastavením reálných klimatických podmínek).

2) Porovnání tepelných parametrů stěnových panelů dle vlastního návrhu, které budou experimentálně testovány při ustálených a neustálených okrajových podmínkách metodou teplé skříně

Pro stěnové panely budou použity izolační materiály obnovitelných zdrojů (pšeničné plevy, řepková řezanka, dřevní štěpka). Obě metody budou porovnány na základě naměřených tepelně-technických parametrů. Bude zhodnocen vliv okrajových podmínek na naměřené hodnoty (součinitel prostupu tepla, tepelný odpor). U obou metod bude prokázána závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku. Panely s izolačními materiály z obnovitelných zdrojů budou porovnány s panelem s průmyslově vyráběnou tepelnou izolací z minerální vlny. U izolačních výplní bude zhodnocen vliv objemové hmotnosti na součiniteli prostupu tepla.

3) Porovnání tepelných parametrů stěnových panelů dodaných od výrobců naměřených při neustálených okrajových podmínkách a matematického modelu

Stěnové panely dodané od výrobců budou zejména na bázi dřeva (panel roubené stěny, panel z křížem lepeného lamelového dřeva, panel zateplené roubené stěny, panel rámové dřevostavby s izolační výplní a panel z keramických bloků Porotherm). U panelů budou porovnány naměřené parametry při neustálených okrajových podmínkách s parametry získanými z matematického modelu (založeném na ustálených okrajových podmínkách) vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540-3 (2005). Naměřené parametry (zejména součinitel prostupu tepla) bude optimalizován za účelem získání stěnových panelů požadovaných vlastností.

## Doporučený rozsah práce

60-90 stran textu, 10-30 stran příloh

## Klíčová slova

Panely na bázi dřeva; sdílení tepla; ustálené / neustálené okrajové podmínky; metoda teplé skříně; součinitel prostupu tepla; tepelný odpor.

---

## Doporučené zdroje informací

- ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G. Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and buildings*, 2011, 43.7: 1618-1626 [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005>.
- ASDRUBALI, Francesco; D'ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI, Samuele. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 2015, 4: 1-17. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- ČSN EN ISO 6946: Stavební prvky a stavební konstrukce – Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtová metoda. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2018.
- ČSN EN ISO 8990: Tepelná izolace – Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu – Kalibrovaná a chráněná teplá skříň. Český normalizační institut. Praha, Česká republika, 1998.
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, Brusel, Belgium, 2010. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>
- EVANGELISTI, Luca, et al. Influence of the thermal inertia in the European simplified procedures for the assessment of buildings' energy performance. *Sustainability*, 2014, 6.7: 4514-4524. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.3390/su6074514>
- KULHÁNEK, František. Stavební fyzika II: stavební tepelná technika. Vyd. 3., přeprac. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3408-9.
- SULEIMAN, B. M., et al. Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood science and technology*, 1999, 33.6: 465-473. [cit. 2019-07-30]. <https://doi.org/10.1007/s002260050130>
- VAVERKA, Jiří. Stavební tepelná technika a energetika budov. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 8021429100.

---

**Předběžný termín**

2018/19 ZS – FLD – SDZ

**Vedoucí práce**

prof. Dr. Ing. Petr Horáček

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Konzultant**

Ing. Kamil Trgala Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 6. 8. 2019

---

**doc. Ing. Milan Gaff, PhD.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 6. 8. 2019

---

**doc. Ing. Milan Gaff, PhD.**

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 7. 8. 2019

---

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 07. 08. 2019

"Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „*Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva z hlediska tepelných vlastností*“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele.

Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.“

V Praze, dne 30. 7. 2019

Ing. Miloš Pavelek

Chtěl bych poděkovat prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi a Ing. Kamilu Trgalovi, Ph.D. za vedení disertační práce a za předání svých znalostí a zkušeností. Rád bych také poděkoval své rodině za podporu a za všechny příležitosti, které mi byly během studia dány. Vypracování disertační práce bylo umožněno díky finanční podpoře Interní grantové agentury Fakulty lesnické a dřevařské IGA FLD ČZU (A20/16, B04/17 a B01/18) a projektu Rozšíření a podpora transferu technologií a znalostí na ČZU realizací aktivit „proof-of-concept“, reg. č. CZ.07.1.02/0.0/0.0/16\_023/0000111 - Aktivita KZ06 - Vývoj konstrukčního řešení předsazené stěny na bázi obnovitelných surovin pro stavby s téměř nulovou spotřebou energie.

# **Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva z hlediska tepelných vlastností**

## **Abstrakt**

Disertační práce se zabývá analýzou stavebních obvodových konstrukcí ve formě stěnových panelů z hlediska tepelných vlastností. Hlavním záměrem je prověření hypotéz o porovnání ustálených a neustálených okrajových podmínek v experimentálním zařízení teplé skříně. Součástí této problematiky je návrh a vývoj tohoto zařízení s využitím vlastní metody měření při neustálených okrajových podmínkách. Naměřené tepelně-technické parametry jsou porovnány s parametry získanými z matematického modelu.

V práci jsou zhodnoceny možnosti využití obnovitelných materiálů ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka), které se doposud nevyužívají, jako tepelně izolační výplně v panelech na bázi dřeva. Dalším cílem je optimalizace součinitele prostupu tepla za účelem získání stěnových panelů požadovaných vlastností. Práce je také zaměřena na reálné tepelné chování stavebních obvodových konstrukcí ve formě panelů z masivního dřeva (panel roubené stěny z lepených smrkových profilů, panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT), panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů), panelu rámové dřevostavby s izolační výplní a panelu z keramických tvárnic Porotherm.

Byla potvrzena hypotéza o vlivu okrajových podmínek na tepelné vlastnosti testovaných panelů. Relativně vysoké rozdíly byly prokázány u panelů z obnovitelných materiálů s vyšší objemovou hmotností a tepelnou kapacitou. Testované sendvičové panely s izolací z obnovitelných materiálů mají srovnatelné tepelné vlastnosti se sendvičovým panelem s průmyslově vyráběnou minerální vlnou.

## **Klíčová slova**

Panely na bázi dřeva; sdílení tepla; ustálené / neustálené okrajové podmínky; metoda teplé skříně; součinitel prostupu tepla; tepelný odpor.



# **Thermal Performance Analysis of Wood-Based Building Envelopes**

## **Abstract**

The dissertation thesis deals with the building envelope thermal performance analysis with a focus on wall panels. The main aim of the thesis was to examine a hypotheses concerning the comparison of steady and unsteady boundary conditions in an experimental hot box. A part of this problematics targets the design and development of the experimental device and the development of an own measurement method under unsteady boundary conditions. The measured thermal-technical parameters were compared with the parameters obtained from the mathematical modeling.

The thesis evaluates the possibilities of using renewable materials from agricultural waste (wheat chaff, short-cut rapeseed) and from wood processing industry waste (short-cut woodchips). In this study, these materials that have not been in application so far, were used as thermal insulation fillers of tested wood-based panels. Another objective was to optimize the thermal transmittance to obtain the desired wall panels properties. The thesis is also focused on a real thermal behavior of building envelopes in the form of laminated log wall, cross laminated timber (CLT) wall, laminated log wall with insulation, sandwich wall based on timber frame and a ceramic hollow blocks (Porotherm) wall.

The hypothesis concerning the influence of boundary conditions on thermal properties of tested panels was confirmed. Relatively high differences were found in case of wall panels made of renewable materials with higher bulk density and heat capacity. The sandwich panels with renewable materials insulation have comparable thermal properties to the sandwich panel filled with industrially manufactured mineral wool.

## **Keywords**

Wood-Based Structural Wall; Heat Transfer; Steady / Unsteady Boundary Conditions; Hot Box Method; Thermal Transmittance; Thermal Resistance.

## OBSAH

Seznam obrázků.....	13
Seznam tabulek.....	14
Seznam grafů.....	15
Názvosloví.....	17
<b>1 Úvod.....</b>	<b>18</b>
<b>2 Cíle práce.....</b>	<b>22</b>
<b>3 Literární přehled.....</b>	<b>24</b>
3.1 Stavební obvodové konstrukce.....	24
3.1.1 Normativní požadavky.....	24
3.1.1.1 Standardní budovy.....	26
3.1.1.2 Budovy s nízkou energetickou náročností.....	30
3.1.2 Konstrukční systémy dřevěných staveb.....	32
3.1.2.1 Srubové stavby.....	33
3.1.2.2 Sloupkové stavby (Balloon-Frame a Platform-Frame).....	35
3.1.2.3 Rámové stavby.....	36
3.1.2.4 Skeletové stavby.....	39
3.1.2.5 Stavby z masivních dřevěných panelů.....	40
3.1.3 Materiály na bázi dřeva.....	43
3.1.3.1 Pojené minerálními pojivy.....	43
3.1.3.2 Pojené organickými pojivy.....	46
3.2 Teorie šíření tepla.....	51
3.2.1 Vedení tepla.....	52
3.2.2 Proudění tepla.....	53
3.2.3 Sálání tepla.....	54
3.3 Výpočtové metody stanovení tepelných vlastností.....	55
3.3.1 Stavební materiály.....	55
3.3.1.1 Objemová hmotnost.....	56
3.3.1.2 Součinitel tepelné vodivosti.....	56
3.3.1.3 Měrná tepelná kapacita.....	56
3.3.2 Stavební konstrukce.....	57
3.3.2.1 Tepelný odpor vrstvy (konstrukce).....	57
3.3.2.2 Tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla.....	57
3.3.2.3 Tepelný odpor při přestupu tepla.....	58
3.3.2.4 Součinitel prostupu tepla (U-hodnota).....	59
3.3.2.5 Okrajové podmínky.....	59
3.4 Experimentální metody stanovení tepelných vlastností.....	62
3.4.1 Stavební materiály.....	62
3.4.2 Stavební konstrukce.....	63
3.4.2.1 Metoda teplé skříně.....	64
3.5 Tepelné vlastnosti materiálů na izolační účely.....	67
3.5.1 Přehled současných tepelně izolačních materiálů.....	67

3.5.2	Potenciální využití zemědělského odpadu na izolační účely .....	70
3.5.3	Tepelné vlastnosti zemědělského odpadu / rostlinných vláken .....	72
3.5.4	Tepelné vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva .....	76
<b>4</b>	<b>Materiál</b> .....	<b>81</b>
4.1	Charakteristika testovaných panelů .....	81
4.1.1	Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev .....	83
4.1.2	Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky .....	84
4.1.3	Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky .....	84
4.1.4	Sendvičový panel s výplní z minerální vlny .....	85
4.1.5	Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů .....	86
4.1.6	Panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) .....	86
4.1.7	Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů .....	86
4.1.8	Panel rámové dřevostavby s izolační výplní .....	87
4.1.9	Panel z keramických tvárnic Porotherm .....	87
4.2	Příprava testovaných panelů .....	88
4.2.1	Stanovení vlhkosti .....	89
4.2.2	Stanovení frakce .....	89
4.2.3	Podmínky kondicionování .....	92
<b>5</b>	<b>Metodika</b> .....	<b>93</b>
5.1	Metoda teplé skříně .....	93
5.1.1	Princip modifikované teplé skříně .....	93
5.1.2	Konstrukce modifikované teplé skříně .....	94
5.1.3	Měření veličiny v modifikované teplé skříně .....	96
5.2	Okrajové podmínky .....	98
5.2.1	Ustálené okrajové podmínky .....	98
5.2.2	Neustálené okrajové podmínky .....	99
5.3	Vyhodnocení tepelných vlastností .....	100
5.3.1	Metoda modifikované teplé skříně .....	100
5.3.1.1	Ustálené okrajové podmínky .....	100
5.3.1.2	Neustálené okrajové podmínky .....	101
5.3.2	DSC metoda .....	104
<b>6</b>	<b>Výsledky</b> .....	<b>106</b>
6.1	Experimentální měření .....	106
6.1.1	Metoda teplé skříně .....	106
6.1.1.1	Ustálené okrajové podmínky .....	106
6.1.1.2	Neustálené okrajové podmínky .....	112
6.1.2	DSC metoda .....	124
6.2	Optimalizace naměřených parametrů .....	125
6.3	Matematický model .....	128
6.3.1	Okrajové podmínky .....	128
6.3.2	Model teplotního pole v konstrukci .....	129
6.4	Porovnání experimentálních výsledků s matematickým modelem .....	139

<b>7</b>	<b>Diskuze</b> .....	142
7.1	Okrajové podmínky.....	143
7.1.1	Součinitel při přestupu tepla .....	143
7.1.2	Porovnání naměřených hodnot při rozdílných okrajových podmínkách .....	145
7.2	Porovnání tepelně-technických parametrů s jinými autory .....	147
7.3	Navrhované změny experimentu do budoucna .....	150
7.4	Použití výsledků v praxi .....	151
<b>8</b>	<b>Závěr</b> .....	153
	Seznam publikovaných článků k disertační práci .....	157
	Seznam literatury a použitých zdrojů.....	158
	Seznam příloh .....	177
	Přílohy .....	178

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> (a) roh roubené stěny z lepených profilů typu BSH, (b) roh zateplené roubené stěny z lepených profilů typu BSH, (c) roh srubové stěny ze surové kulatiny (OK Pyrus, 2014).....	34
<b>Obrázek 2:</b> Druhy sloupkových staveb: (a) Balloon-Frame, (b) Platform-Frame (Winter & Okerstrom, 2015).....	35
<b>Obrázek 3:</b> Rámová konstrukce - systém Two by Four před instalací opláštění (Brotánek, 2013).....	37
<b>Obrázek 4:</b> I - nosníky na bázi dřeva – vlevo stojna z dřevovláknité desky, vpravo z OSB desky (MTA, 2015).....	38
<b>Obrázek 5:</b> Konstrukce těžkého dřevěného skeletu (ESTAV, 2016).....	39
<b>Obrázek 6:</b> Nosné dřevěné prvky: (a) rostlé dřevo, (b) konstrukční dřevo KVH, (c) lepené lamelové dřevo BSH (Hugues <i>et al.</i> , 2004).....	40
<b>Obrázek 7:</b> Ukázka napojení jednotlivých dřevěných lamel u masivních CLT panelů (Pavlas, 2016) ....	41
<b>Obrázek 8:</b> Příklad panelu z křížem lepeného lamelového dřeva s kontaktní dřevovláknitou izolací (Hudec, 2013).....	42
<b>Obrázek 9:</b> Rozdělení materiálů na bázi dřeva v závislosti na druhu použitého pojiva a podle způsobu konstrukce (Böhm <i>et al.</i> , 2012a).....	43
<b>Obrázek 10:</b> Materiály na bázi dřeva spojené minerálními pojivy: (a) cementovláknitá deska, (b) cementotřísková deska, (c) sádrovláknitá deska, (d) sádrokartonová deska (Böhm <i>et al.</i> , 2012b).....	46
<b>Obrázek 11:</b> Materiály na bázi dřeva spojené organickými pojivy: (a) deska z orientovaných plochých třísek (OSB), (b) multifunkční deska (MFP), (c) překližka, (d) biondeska (SWP), (e) dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF, DHF), (f) měkká dřevovláknitá deska (Böhm <i>et al.</i> , 2012b).....	51
<b>Obrázek 12:</b> Teplotní oblasti v zimním období, směr a rychlost převládajících větrů (ČSN 73 0540-3, 2005).....	60
<b>Obrázek 13:</b> Experimentální zařízení teplé skříně; mezi chladnou komorou (vlevo) a teplou komorou (vpravo) je umístěn testovaný vzorek (Asdrubali & Baldinelli, 2011) .....	64
<b>Obrázek 14:</b> Zkušební zařízení s chráněnou teplotou skříní (vypracoval autor podle ČSN EN ISO 8990, 1998).....	65
<b>Obrázek 15:</b> Zkušební zařízení s kalibrovanou teplotou skříní (vypracoval autor podle ČSN EN ISO 8990, 1998).....	66
<b>Obrázek 16:</b> Ukázka izolačního panelu s výplní z kokosových vláken (Alavez-Ramirez <i>et al.</i> , 2012) ...	73
<b>Obrázek 17:</b> Panely na bázi dřeva dle vlastních návrhů: (1) sendvičový panel s výplní z pšeničných plev; (2) sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky; (3) sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky; (4) sendvičový panel s výplní z minerální vlny.....	82
<b>Obrázek 18:</b> Panely (na bázi dřeva) dodané od výrobců: (5) panel roubené stěny z lepených smrkových profilů; (6) panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT); (7) panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů; (8) panel rámové dřevostavby s izolační výplní; (9) panel z keramických tvárníc Porotherm. ....	83
<b>Obrázek 19:</b> Způsob plnění obálky panelu (z MDF desek) izolací ze zemědělského odpadu (na obrázku ukázka pšeničných plev).....	84
<b>Obrázek 20:</b> Skladby panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů: (1) sendvičový panel s výplní z pšeničných plev; (2) sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky; (3) sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky; (4) sendvičový panel s výplní z minerální vlny.....	85
<b>Obrázek 21:</b> Skladby panelů (na bázi dřeva) dodaných od výrobců: (5) panel roubené stěny z lepených smrkových profilů – (a) půdorys, (b) řez; (6) panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT); (7) panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů; (8) panel rámové dřevostavby s izolační výplní; (9) panel z keramických tvárníc Porotherm. ....	88
<b>Obrázek 22:</b> Snímek pšeničné plevy z optického mikroskopu (a) vnější povrch, (b) vnitřní povrch, tzn. blízko povrchu zrna. ....	90
<b>Obrázek 23:</b> Snímek vstupního materiálu z optického mikroskopu: (a) stonek řepky olejky ( <i>Brassica napus</i> ) (b) variabilita tvarů dřevní štěpky z měkkého dřeva.....	91
<b>Obrázek 24:</b> Kondicionování panelů v laboratoři s řízenou teplotou a vlhkostí vzduchu .....	92
<b>Obrázek 25:</b> Schéma rozdílu mezi (a) chráněnou teplotou skříní (podle normy ČSN EN ISO 8990) a (b) modifikovanou chráněnou teplotou skříní použitou v experimentech. ....	94
<b>Obrázek 26:</b> Konstrukce modifikované chráněné teplé skříně a rozmístění teplotních čidel u panelu ozn. 1: (a) půdorys/horizontální řez; (b) vertikální řez 1-1'.....	95
<b>Obrázek 27:</b> Termografický snímek rovnoměrného rozložení teplot na povrchu testovaného panelu ozn. 1 v teplé komoře. ....	97

<b>Obrázek 28:</b> Konstrukce modifikované chráněné teplé skříně a rozmístění teplotních čidel u panelů ozn. 2-9: (a) půdorys/horizontální řez; (b) vertikální řez 1-1'; (c) pohled na povrch panelu z teplé/chladné komory.....	98
<b>Obrázek 29:</b> (A) Současný stav standardizovaného výpočtu tepelných ztrát budovy pomocí měření za ustálených okrajových podmínek; (B) navrhovaný výpočet tepelných ztrát budovy pomocí měření za neustálených okrajových podmínek.....	103
<b>Obrázek 30:</b> Teplotní pole 2D okolo ztužujícího nosníku na bázi dřeva.....	111
<b>Obrázek 31:</b> (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5) .....	130
<b>Obrázek 32:</b> Teplotní gradient u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5).....	130
<b>Obrázek 33:</b> (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6).....	131
<b>Obrázek 34:</b> Teplotní gradient u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6) .....	132
<b>Obrázek 35:</b> (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7) .....	134
<b>Obrázek 36:</b> Teplotní gradient u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7).....	134
<b>Obrázek 37:</b> (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8).....	136
<b>Obrázek 38:</b> Teplotní gradient u panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8).....	136
<b>Obrázek 39:</b> (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu z keramických tvárníc Porotherm (ozn. 9).....	138
<b>Obrázek 40:</b> Teplotní gradient u panelu z keramických tvárníc Porotherm (ozn. 9).....	139

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> Vývoj požadované hodnoty součinitele prostupu tepla pro vnější stěnu v letech 1962-2011 (Kučerová <i>et al.</i> , 2014) .....	18
<b>Tabulka 2:</b> Základní rozdělení budov podle měrné potřeby tepla na vytápění (Tywoniak, 2012) .....	25
<b>Tabulka 3:</b> Hodnoty součinitele prostupu tepla pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou intervalu 18 až 22° (ČSN 73 0540-2, 2011).....	27
<b>Tabulka 4:</b> Požadované hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou v intervalu 18 až 22°C (ČSN 73 0540-2, 2011) .....	28
<b>Tabulka 5:</b> Požadované a doporučené hodnoty lineárního a bodového činitele prostupu tepla tepelných vazeb mezi konstrukcemi (ČSN 730540-2, 2011) .....	29
<b>Tabulka 6:</b> Základní požadavky obytných budov v pasivním standardu (ČSN 73 0540-2, 2011) .....	31
<b>Tabulka 7:</b> Upravené doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla pro pasivní či energeticky nulový dům. (Tywoniak, 2005) .....	31
<b>Tabulka 8:</b> Základní požadavky na obytné budovy v energeticky nulovém standardu (ČSN 73 0540-2, 2011).....	32
<b>Tabulka 9:</b> Tepelné odpory při přestupu tepla podle směru tepelného toku (ČSN EN ISO 6946, 2018) .	59
<b>Tabulka 10:</b> Teplotní oblasti České republiky v zimním období, jejich průměrná nadmořská výška, základní návrhová teplota venkovního vzduchu a teplotní gradient .....	60
<b>Tabulka 11:</b> Návrhové průměrné měsíční teploty venkovního vzduchu v ročním průběhu (ČSN 73 0540-3, 2005).....	61
<b>Tabulka 12:</b> Návrhová vnitřní teplota a relativní vlhkost vzduchu v zimním období u obytných, trvale užívaných budov (ČSN 73 0540-3, 2005) .....	62
<b>Tabulka 13:</b> Požadovaná tloušťka tepelné izolace stavebních konstrukcí v závislosti na hodnotě tepelné vodivosti izolačního materiálu (bez ohledu na nosnou konstrukci) (Pregizer, 2009) .....	68
<b>Tabulka 14:</b> Fyzikální vlastnosti nejpoužívanějších tepelně - izolačních materiálů (Cihlář & Hazucha, 2013; Šípková <i>et al.</i> , 2014).....	69
<b>Tabulka 15:</b> Fyzikální vlastností izolačních desek ze zemědělského odpadu ve směru vláken kolmo na tepelný tok .....	72
<b>Tabulka 16:</b> Hodnoty tepelné vodivosti slaměných balíků od různých zdrojů.....	75
<b>Tabulka 17:</b> Fyzikální vlastnosti rostlého dřeva a materiálů na bázi dřeva používaných na obvodové konstrukce na bázi dřeva (iMateriály, 2016; Provázek & Glos, 2009; ČSN 730540-1, 2005) .....	77
<b>Tabulka 18:</b> Tepelná vodivost rostlého měkkého (jehličnatého) dřeva kolmo na vlákna podle jednotlivých zdrojů.....	80
<b>Tabulka 19:</b> Přehled všech testovaných stěnových panelů.....	81
<b>Tabulka 20:</b> Zastoupení jednotlivých frakcí pšeničných plev získané síťovou analýzou .....	90

<b>Tabulka 21:</b> Zastoupení jednotlivých frakcí řepkové řezanky získané síťovou analýzou.....	91
<b>Tabulka 22:</b> Zastoupení jednotlivých frakcí dřevní štěpky získané síťovou analýzou .....	92
<b>Tabulka 23:</b> Měření veličiny v chladné a teplé komoře teplé skříně .....	96
<b>Tabulka 24:</b> Nastavení teplotních změn v chladné komoře teplé skříně během testu při neustálených okrajových podmínkách.....	99
<b>Tabulka 25:</b> Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z pšeničných plev - měření při ustálených okrajových podmínkách .....	107
<b>Tabulka 26:</b> Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z řepkové řezanky - měření při ustálených okrajových podmínkách.....	107
<b>Tabulka 27:</b> Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z dřevní štěpky - měření při ustálených okrajových podmínkách.....	108
<b>Tabulka 28:</b> Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z minerální vlny - měření při ustálených okrajových podmínkách.....	109
<b>Tabulka 29:</b> Srovnání hodnot součinitele prostupu tepla stěnových panelů ozn. 1 - 4 naměřených při ustálených a neustálených okrajových podmínkách .....	117
<b>Tabulka 30:</b> Hodnoty součinitele prostupu tepla stěnových panelů naměřených při neustálených okrajových podmínkách.....	126
<b>Tabulka 31:</b> Hodnoty součinitele prostupu tepla pro vnější stěnu s převažující návrhovou vnitřní teplotou budovy v intervalu 18 až 22° (ČSN 73 0540-2, 2011).....	126
<b>Tabulka 32:</b> Součinitel prostupu tepla u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5)	129
<b>Tabulka 33:</b> Součinitel prostupu tepla u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6)	131
<b>Tabulka 34:</b> Součinitel prostupu tepla u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7)	133
<b>Tabulka 35:</b> Součinitel prostupu tepla u panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8)	135
<b>Tabulka 36:</b> Součinitel prostupu tepla u panelu z keramických tvárnic Porotherm (ozn. 9)	137
<b>Tabulka 37:</b> Porovnání hodnot součinitele prostupu tepla naměřených při neustálených okrajových podmínkách a hodnot získaných z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 u panelů dodaných od výrobců (ozn. 5 - 9).....	140

## Seznam grafů

<b>Graf 1:</b> Srovnání měrné potřeby energie jednotlivých typů budov (Šance pro budovy, 2019).....	24
<b>Graf 2:</b> Průběh venkovních teplot v Praze-Suchdol (5-denní cyklus), leden 2017 .....	100
<b>Graf 3:</b> Průběh tepelného toku a teplot při ustálených okrajových podmínkách u panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů (ozn. 1 - 4): (1) pšeničné plevy (test A1 v tabulce 25), (2) řepková řezanka (test B2 v tabulce 26), (3) dřevní štěpka (test C2 v tabulce 27), (4) minerální vlna (test D1 v tabulce 28), $T_{ae}$ = teplota vzduchu v chladné komoře, $T_{ai}$ = teplota vzduchu v teplé komoře, $T_{se}$ = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře a $T_{si}$ = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře. ....	109
<b>Graf 4:</b> Závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku u panelů ozn. 1 - 4 při ustálených okrajových podmínkách.....	110
<b>Graf 5:</b> Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti izolační výplně u panelů ozn. 1 - 4 při ustálených okrajových podmínkách .....	111
<b>Graf 6:</b> Průběh množství tepla procházející panelem s použitím hledané U-hodnoty a teplot při neustálených okrajových podmínkách u panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů ( <b>ozn. 1-4</b> ); $T_{ae}$ = teplota vzduchu v chladné komoře, $T_{ai}$ = teplota vzduchu v teplé komoře, $T_{se}$ = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře, $T_{si}$ = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře, $Q_{\text{experimentální}}$ = množství tepla procházející panelem za jednotku času (Wh), $Q_{\text{hledaná}}$ = vypočtené množství tepla procházející panelem pomocí hledané U-hodnoty danou funkcí solver (Wh) .....	114
<b>Graf 7:</b> Srovnání měřeného množství tepla procházejícího panelem $Q_{\text{experimentální}}$ (Wh) u panelů ozn. 1 - 4 při neustálených okrajových podmínkách.....	115
<b>Graf 8:</b> Závislost součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem u panelů ozn. 1 - 4 při neustálených okrajových podmínkách .....	116
<b>Graf 9:</b> Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti izolační výplně u panelů ozn. 1 - 4 při neustálených okrajových podmínkách.....	117
<b>Graf 10:</b> Srovnání naměřených hodnot součinitele prostupu tepla u panelů ozn. 1 - 4 při ustálených a neustálených okrajových podmínkách u panelu .....	118
<b>Graf 11:</b> Průběh množství tepla procházející panelem s použitím hledané U-hodnoty a teplot při neustálených okrajových podmínkách u panelů na bázi dřeva dodaných od výrobců ( <b>ozn. 5-9</b> ); $T_{ae}$ = teplota	

vzduchu v chladné komoře,  $T_{ai}$  = teplota vzduchu v teplé komoře,  $T_{se}$  = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře,  $T_{si}$  = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře,  $Q_{\text{experimentální}}$  = množství tepla procházející panelem za jednotku času (Wh),  $Q_{\text{hledaná}}$  = vypočtené množství tepla procházející panelem pomocí hledané U-hodnoty danou funkcí solver a  $Q_{\text{deklarovaná}}$  = vypočtené množství tepla s použitím deklarované U-hodnoty.

..... 121

**Graf 12:** Srovnání měřeného množství tepla procházejícího panelem  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) u panelů ozn. 5 - 9

..... 122

**Graf 13:** Závislost součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem u panelů ozn. 5 - 9 při neustálených okrajových podmínkách..... 123

**Graf 14:** (a) Teplotní profil metody aplikované na pšeničné plevy pro stanovení měrné tepelné kapacity; (b) měrná tepelná kapacita jako funkce teploty pro pšeničné plevy ve formě prášku a ve formě kompaktní anatomické struktury..... 124

**Graf 15:** Měření tepelného toku a teplot při ustálených okrajových podmínkách u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů ozn. 5: (a) nastavená teplota v chladné komoře  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (b) nastavená teplota v chladné komoře  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $T_{ae}$  = teplota vzduchu v chladné komoře,  $T_{ai}$  = teplota vzduchu v teplé komoře,  $T_{se}$  = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře, a  $T_{si}$  = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře. . 141



## Názvosloví

A	Plocha	$m^2$
a	Součinitel teplotní vodivosti	$m^2 \cdot s^{-1}$
C	Tepelná kapacita na jednotku příčné plochy	$J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
c	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d	Tloušťka	m
E <sub>A</sub>	Měrná potřeba tepla na vytápění	$kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$
H	Tepelné ztráty	Wh
h	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
m	Hmotnost	kg
PEI	Svázaná primární energie	$MJ \cdot kg^{-1}$
Q	Množství tepla / Tepelná energie	Wh, J
q	Hustota tepelného toku	$W \cdot m^{-2}$
RH	Relativní vlhkost vzduchu	%
R	Tepelný odpor	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
T	Teplota	K, °C
t	Čas	h
u	Obsah vlhkosti	%
U	Součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
V	Objem	$m^3$
Δ	Rozdíl	-
ε	Emisivita povrchu tělesa	-
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	Faktor difúzního odporu	-
ρ	Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
τ <sub>s</sub>	Doba odezvy	h
φ	Tepelný tok	W
χ	Bodový činitel prostupu tepla	$W \cdot K^{-1}$
ψ	Lineární činitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

## Indexy

ae	Vnější vzduch
ai	Vnitřní Vzduch
se	Vnější povrch
si	Vnitřní povrch
t	Celkový

# 1 Úvod

Zvyšující se požadavky na snižování energetické náročnosti budov přináší během posledního desetiletí vyšší nároky na tepelně-izolační vlastnosti obvodových konstrukcí. Z průzkumu Evropské komise vyplývá, že budovy spotřebovávají 40 % celosvětové výroby energie (Energy Performance of Buildings, 2014), což stále více ovlivňuje životní prostředí. Tento sektor využívá přibližně 40% přírodních zdrojů těžených v průmyslových zemích, spotřebuje téměř 70% elektřiny a 12% pitné vody (Castro-Lacouture *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2005). Současné studie po celém světě o energetických a environmentálních otázkách ukazují na tendenci ke snižování emisí ze spotřeby energie a emisí skleníkových plynů ve stavebnictví.

Vzhledem k této situaci jsou izolační materiály často klíčovým prvkem v budovách. Cílem zemí EU je zlepšit tuto situaci a stavět od roku 2020 všechny novostavby jako budovy s téměř nulovou potřebou energie. Podobný standard by měl být dosažen pro většinu ze stávajícího fondu budov (směrnice 2010/31/EU).

Současné budovy jsou tímto vývojem silně ovlivněny. Týká se to zejména snižování součinitele prostupu tepla  $U$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) obvodové konstrukce budovy. Pro příklad uvádím v **tabulce 1** vývoj součinitele prostupu tepla pro vnější stěnu za posledních padesát let.

**Tabulka 1:** Vývoj požadované hodnoty součinitele prostupu tepla pro vnější stěnu v letech 1962-2011 (Kučerová *et al.*, 2014)

Rok	1962	1979	1992	1994	2002	2005	2011
Stěna vnější - těžká	1,45	0,89	0,46	0,46	0,4	0,38	0,3
Stěna vnější - lehká					0,3	0,3	0,3

Z tabulky je patrná klesající hodnota součinitele prostupu tepla a je otázkou, jakým směrem, se tato hodnota bude do budoucna vyvíjet. Pokud vezmeme v úvahu stavby z rostlého dřeva (především srubové a roubené stavby) nemůžou současné legislativě z hlediska těchto požadavků vyhovovat. Je to dáno tím, že metodika hodnocení domů z rostlého dřeva není zcela objasněna a není přizpůsobena tomuto typu konstrukce. Od roku 2011 požaduje norma ČSN 73 0540-2 pro tepelnou techniku budov maximální součinitel prostupu tepla  $U_{\text{stěna}} = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pro dosažení této hodnoty u stěny z rostlého dřeva by byla požadovaná tloušťka větší než 550 mm, což je z technicko-ekonomického hlediska nereálné. Do výpočtu této hodnoty součinitele prostupu tepla se

uvažuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) rostlého dřeva kolmo na vlákna  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (ČSN 73 0540-3, 2005). Je nutné poznamenat, že tato hodnota je převzata z testování při ustálených okrajových podmínkách, které je vhodné především pro posouzení lehkých stěn (s nízkou hodnotou měrné tepelné kapacity a objemové hmotnosti). Pro posouzení tepelných vlastností těžkých stěn, jako jsou stěny z rostlého dřeva, se může tento způsob testování ukázat jako nevhodný. Pro simulaci reálnějšího chování je vhodné testování při neustálených okrajových podmínkách, které je cílem této práce.

Mnoho autorů přichází se studii, které se zabývají spolehlivostí současných výpočtů, přičemž mnozí z nich nabízí použití softwaru nebo algoritmů pro výpočty tepelných vlastností založených na multiparametrických matematických modelech. Lze pochybovat o současných používaných postupech a technických normách založených na zjednodušených modelech tepelného chování a skutečném chování stavebních konstrukcí v neustále se měnících klimatických podmínkách. To je zřejmé zejména při porovnání různých výpočtů tepelných vlastností, které vycházejí z různých matematických modelů (Asdrubali *et al.*, 2015; Asdrubali & Baldinelli, 2011; Bacher & Madsen, 2011; Audenaert *et al.*, 2011; Evangelisti *et al.*, 2014; Parsons *et al.*, 2013).

Hodnota tepelné vodivosti je určena z tepelného toku za ustálených okrajových podmínek. Pro materiály s nízkou hodnotou měrné tepelné kapacity  $c$  ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a objemové hmotnosti  $\rho$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je tato metoda stanovení tepelné vodivosti pomocí lineárního modelu poměrně přesná. Materiály s vysokou tepelnou kapacitou vykazují výrazně odlišné výsledky při měnících se teplotách na vnější straně konstrukce. Při změně teploty v reálném čase je vždy významná doba odezvy  $\tau_s$  (h) a rozdíl mezi modelem založeným na ustáleném stavu a skutečným tepelným tokem.

Existují studie (Vollaro *et al.*, 2015; Aste *et al.*, 2009; Kossecka & Kosny, 2002; Martin *et al.*, 2012; Sala *et al.*, 2008) zaměřené na dynamické chování a dynamické modelování tepelných vlastností budovy s ohledem na stavební hmoty. Autoři obvykle představují dynamický model ve srovnání s modelem v semi-ustáleném stavu nebo modelem založeným na ustáleném stavu.

Kalibrace jakéhokoli dynamického modelu je v každém případě velmi obtížná, zvláště když jsou zkoumány vícevrstvé konstrukce. Samotná tepelná vodivost není jediným parametrem, který ovlivňuje tepelné vlastnosti obálky budovy. Druhým důležitým atributem je tepelná akumulace obvodových konstrukcí a zbytku celé hmoty budovy.

K dispozici jsou studie zaměřené na systémy akumulace tepelné energie jako pasivní část zvyšující energetickou účinnost budovy pro potřeby chlazení i topení (Zhu *et al.*, 2009; Feng, 2004; Roucoult *et al.*, 1999; Kalnaes & Jelle, 2015). Současné mezinárodní normy pro hodnocení energetické náročnosti budov jsou většinou založeny na parametrech měřených "in vitro" během ustálených okrajových podmínek a na zjednodušeném výpočtu, který odhaduje potřebu energie za použití měsíčních nebo sezónních průměrných venkovních teplot (Vollaro *et al.*, 2015).

S ohledem na tyto skutečnosti se v současné výstavbě využívají sendvičové obvodové konstrukce s integrovanou vrstvou tepelné izolace, které zpříšňující kritéria na součinitel prostupu tepla splňují. Ideální jsou konstrukce na bázi dřeva s využitím nosných prvků, které tvoří celkovou tloušťku stěny a mezi kterými je mezera vyplněná vrstvou tepelné izolace v celé tloušťce stěny. Vložením izolace mezi profily dojde ke zmenšení tloušťky obvodové stěny a tím vznikne větší užitná půdorysná plocha domu a celkové řešení je oproti zděné technologii levnější (Hudec, 2008).

Podle prognóz globálního trhu lze v příštích několika letech očekávat zvýšenou poptávku po tepelně izolačních materiálech a výrobních technologiích, aby se zajistilo celkové snížení energetické náročnosti budov (Markets & Markets, 2017). To by znamenalo vyšší produkci materiálů na bázi minerální vlny, polystyrenu a polyuretanu. Polystyren je vyráběn z ethylenu, složky zemního plynu a benzenu, který je získáván z ropy. Polyuretany jsou vyrobeny z polymerního methylen diisokyanátu (PMDI) a polyolu, který se získává z ropy. Tyto izolační materiály však představují ekologickou zátěž, kterou je třeba řešit alternativami šetrnými k životnímu prostředí. Biologické alternativy jsou v současné době k dispozici v omezeném, ale dostupném množství. Jedná se o materiály jako sláma, konopí, len, materiály na bázi dřeva, rákos, atd. (Asdrubali *et al.*, 2015).

Většina těchto materiálů byla používána po staletí, ale postupně byla nahrazována syntetickými materiály, díky mnoha výhodám oproti přírodním materiálům, jako je vyšší trvanlivost, vyšší odolnost proti ohni a odolnost proti vodě. Jedním z důvodů dominance syntetických izolací je i regulační nařízení trhu, které podléhá přísně kontrolované výrobě stavebních materiálů, na které se vztahují certifikační orgány. Rozhodovací proces výběru materiálu je zpravidla ovlivněn požadavky architekta, projektanta a investora a také bezpečnostními požadavky. Evropská komise uvádí, že výrobci stavebních výrobků vypracovávají prohlášení o vlastnostech, pokud se na stavební výrobek vztahuje harmonizovaná norma nebo pokud je v souladu s evropským technickým posouzením

vydaným pro tento výrobek. Kopie tohoto prohlášení by měla být poskytnuta spolu s výrobkem buď v papírové nebo elektronické podobě (Commission Delegated Regulation (EU) No 157/2014).

Aby bylo možné uspokojit stále rostoucí poptávku po energeticky efektivních stavebních materiálech, je třeba přijmout nákladově efektivní a ekologicky vhodné technologie a zdokonalovat tradiční techniky s dostupnými lokálními materiály. Proto se nabízí využití tepelně-izolačních materiálů ze zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu. K jejich výhodám patří: nízká spotřeba energie na jejich výrobu, využívání lokálních surovin, recyklovatelnost, obnovitelnost surovin a ekologická likvidace na konci životnosti.

Existuje poměrně rozpor v aplikaci těchto nekonvenčních stavebních materiálů: na jedné straně biologické původy přinášejí všechny výhody pro udržitelnou budoucnost, na druhé straně jsou zdrojem proměnlivosti vlastností materiálů v důsledku variabilního růstu rostlin v různých klimatických a půdních podmínkách. Proto je technická normalizace, kontrola kvality a hromadná výroba obtížná, což pravděpodobně vede k jisté opatrnosti nebo nedůvěře developerů, stavitelů a následně investorů. Stále je to ale malá nevýhoda ve srovnání s dlouhodobým užíváním biologických materiálů a jejich přínosy na životní prostředí. Zvláště pokud vezmeme v úvahu směrnice Evropské unie (EU) usilující o výrazné snížení spotřeby energie ve stavebnictví a především využívání energie z obnovitelných zdrojů v blízké budoucnosti 2010/31/EU a 2012/27/EU.

Vzhledem k těmto důvodům je důležitý každý výzkum zabývající se dlouhodobým testováním (monitorováním) obnovitelných materiálů. Především je důležité vyvíjet nové metody měření tepelných vlastností přizpůsobené pro konkrétní materiál.

Část této práce je zaměřena na experimentální testování sendvičových panelů s izolační výplní ze zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu jako složky pro alternativní udržitelné stavební materiály a současně panelů na bázi dřeva s využitím rostlého dřeva a materiálů na bázi dřeva ve stavebnictví. Tyto obnovitelné materiály byly podrobeny testování při ustálených a neustálených okrajových podmínkách. Obě metody byly porovnány na základě vyhodnocených tepelně-technických parametrů. Aplikace zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu pro udržitelné stavební materiály poskytuje řešení, které nabízí snížení uhlíkové stopy a dopadu na životní prostředí.

## 2 Cíle práce

Cílem práce je analýza stavebních obvodových konstrukcí ve formě stěnových panelů z hlediska tepelných vlastností. Zejména se jedná o součinitel prostupu tepla a tepelný odpor celé konstrukce. Stěnové panely na bázi dřeva jsou rozděleny do dvou okruhů podle způsobu porovnání naměřených parametrů. V prvním okruhu jsou panely zvoleny dle vlastních návrhů. Jedná se o panely na bázi dřeva s využitím zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu jako obnovitelné sypané tepelné izolace. Konkrétně je to sendvičový panel s výplní z pšeničných plev, sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky a sendvičový panel s výplní z dřevní štěrky. Pro porovnání k těmto panelům je testován sendvičový panel s výplní z minerální vlny, která je v současné době nejvíce používanou průmyslově vyráběnou tepelnou izolací. V druhém okruhu jsou stěnové panely dodány od výrobců jako jejich nejvíce používané typy v tuzemsku. Jedná se o panely z masivního dřeva (panel roubené stěny z lepených smrkových profilů, panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT), panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů), panel rámové dřevostavby s izolační výplní a panel z keramických tvárníc Porotherm.

Dílním cílem práce je vytvoření návrhu konstrukce experimentálního zařízení teplé skříně, které je pro účel této práce postaveno a modifikováno. Pro zkušební zařízení je použita experimentální metoda teplé skříně při ustálených okrajových podmínkách dle současné normy ČSN EN ISO 8990 (1998) a navržená vlastní metoda měření při neustálených okrajových podmínkách. Obě metody jsou porovnány na základě vyhodnocených tepelně-technických parametrů. Naměřené hodnoty budou dále porovnány s parametry získanými z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540-3 (2005).

Dalším cílem je optimalizace součinitele prostupu tepla za účelem získání stěnových panelů požadovaných vlastností.

### **S cílů disertační práce vyplývají tyto hypotézy:**

1. Může měření při neustálených okrajových podmínkách poskytnout rozdílné výsledky součinitele prostupu tepla stavebních konstrukcí ve srovnání s výsledky zkoušek při ustálených okrajových podmínkách?

2. Je možné použít neustálené okrajové podmínky (nastavené podle reálných klimatických podmínek) v experimentálním zařízení teplé skříně pro přesné stanovení součinitele prostupu tepla stavebních konstrukcí?
3. Jaké mají reálné tepelné vlastnosti stavební obvodové konstrukce, když se podle současných normativních požadavků vypočítávají pomocí zjednodušených matematických modelů založené zejména na předpokladu ustálených okrajových podmínek?
4. Mohou sendvičové panely z obnovitelných materiálů s výplní ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) pro udržitelnou výstavbu poskytnout srovnatelné tepelné vlastnosti jako sendvičový panel s průmyslově vyráběným izolačním materiálem (minerální vlna)?

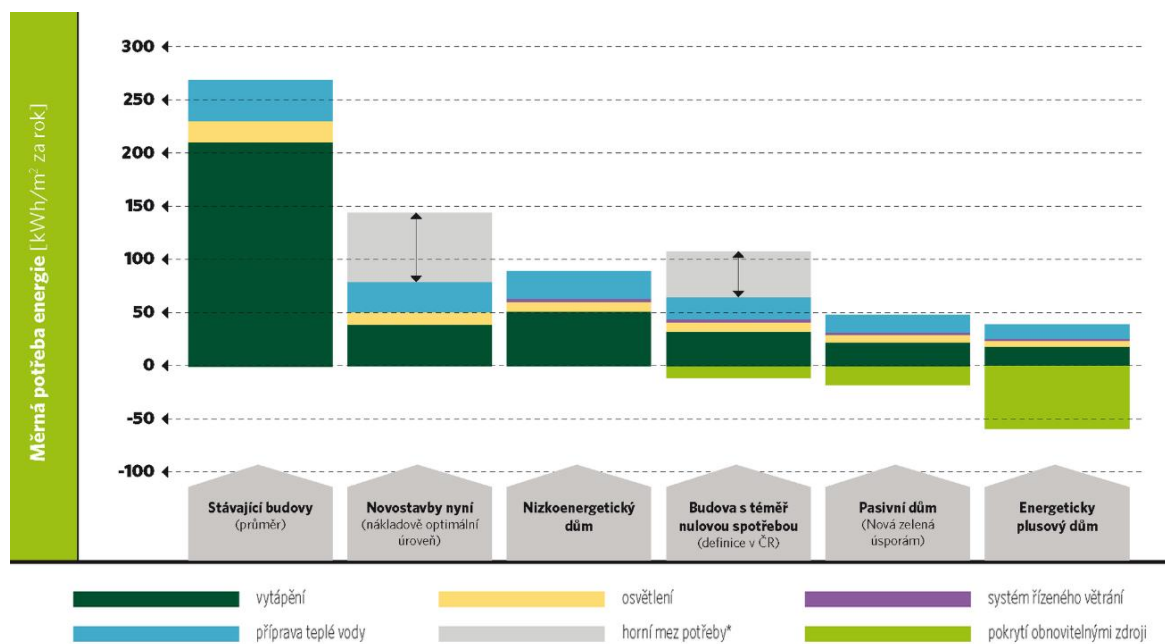
### 3 Literární přehled

#### 3.1 Stavební obvodové konstrukce

##### 3.1.1 Normativní požadavky

Dle schválené směrnice Evropského parlamentu a Rady o energetické účinnosti budov (Energy Performance of Buildings 2010/31/EU) jsou od roku 2020 požadovány všechny novostavby v téměř energeticky nulovém standardu. Základním vývojem k budovám téměř energeticky nulovým je značné snížení energie na vytápění a chlazení, což je v souladu s principy pasivních domů. Tento standard je v České republice definován přibližně od roku 2005 v ČSN 73 0540: Tepelná ochrana budov, v části 2: Požadavky.

V současnosti je dle českých norem definováno několik energetických standardů budov. Pro srovnání uvádím v **grafu 1** přehled jednotlivých typů budov podle měrné potřeby energie.



\* Požadavek není stanoven absolutní hodnotou, ale závisí na srovnání s tzv. referenční budovou. Horní mez zobrazuje rozmezí požadované potřeby energie pro různou velikost, orientaci, tvar a míru prosklení objektu.

**Graf 1:** Srovnání měrné potřeby energie jednotlivých typů budov (Šance pro budovy, 2019)



Tywoniak (2012) uvádí rozdělení budov podle měrné potřeby tepla na vytápění (tabulka 2).

**Tabulka 2:** Základní rozdělení budov podle měrné potřeby tepla na vytápění (Tywoniak, 2012)

Kategorie	Roční měrná potřeba tepla na vytápění kWh.(m <sup>2</sup> .a <sup>-1</sup> )
Starší budovy (70. - 80. let)	> 200
Současná novostavba	80 – 140
Nízkoenergetická budova	≤ 50
Pasivní budova	doporučená: < 15 požadovaná: < 20
Budova blízka budově energeticky nulové	požadavek jako pro pasivní budovu, nejvýše o 20% vyšší, pokud odborně zdůvodněně nejde lepší hodnoty dosáhnout
Energeticky nulová budova	
Budova energeticky nezávislá (soběstačná)	
Energeticky pozitivní budova	

V následujících kapitolách jsou podrobně rozepsány definice a požadavky jak pro standardní výstavbu, tak pro budovy s nízkou energetickou náročností.

Je patrné, že následný vývoj ve stavebnictví bude směřovat ke standardu energeticky téměř nulových budov nebo energeticky nulových budov. Uvádím proto, některé zahraniční definice: Voss & Musall (2013) a Evola *et al.* (2014) popisuje, že v posledních letech bylo ve všech státech světa postaveno několik budov (více než 350) určených k dosažení nulové energetické bilance. Většina z nich je umístěna v severoevropských zemích, USA a Kanadě, vyznačující se extrémně chladným klimatem. Návrhový přístup nulových energetických budov musí být výrazně odlišný pro každé klima a musí zaměřit pozornost na tepelnou setrvačnost stavební obálky v daném podnebí (Baglivo *et al.*, 2014).

V zahraniční literatuře je energeticky nulová budova popsána jako stavba, která využívá „téměř nulové nebo velmi nízké množství energie“ na místě nebo v okolí (Atanasiu & Attia, 2011). Sartori *et al.* (2012) zdůrazňuje, že existují různé definice v souladu s politickými cíli a konkrétními podmínkami země.

Miller *et al.* (2009) vysvětluje pojem energeticky nulové jako budovy, které mají nulovou spotřebu energie s minimálními emisemi uhlíku za rok. Tyto budovy jsou samostatně zásobovány energií, která se vyrábí přímo na místě. Vzhledem k využívání energie zejména z obnovitelných zdrojů, které jsou prostředkem ke snižování emisí skleníkových plynů, jedná se v dnešní době o často využívaný princip konstrukce.

### 3.1.1.1 Standardní budovy

Tato část zahrnuje požadavky na jednotlivé stavební konstrukce obálky budovy z pohledu tepelné ochrany budov dle ČSN 73 0540-2 platné od listopadu 2011. Docílení základních požadavků je svázáno s vyhláškou č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby (zákon č. 183/2006 Sb., zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)), kde je obecně popsána povinnost dodržení normových hodnot. Zde uvádím definici obálky budovy (zóny) podle normy ČSN 73 0540-1 (2005): „*Soubor všech teplosměnných konstrukcí na systémové hranici celé budovy nebo zóny, jež jsou vystaveny přilehlému prostředí, které tvoří venkovní vzduch, přilehlá zemina, vnitřní vzduch v přilehlém nevytápěném prostoru, sousední nevytápěné budově nebo sousední zóně budovy vytápěné na nižší návrhovou teplotu*“.

#### **Součinitel prostupu tepla**

„*Součinitel prostupu tepla  $U$  ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) vyjadřuje schopnost soustavy, tvořené dvěma plynnými nebo kapalnými prostředími a jedním čtverečním metrem stěny mezi nimi, přenášet teplo*“ (Vaverka, 2006). Pro jeho hodnocení je možné použít dva způsoby. První způsob se zaměřuje na jednotlivé konstrukce a druhý způsob je zaměřen na budovu jako celek s využitím průměrného součinitele prostupu tepla  $U_{em}$ . Ve většině případů musí být oba tyto způsoby splněny společně. Pro hodnocení stavebních konstrukcí jsou používány požadované hodnoty součinitele prostupu tepla. Doporučené hodnoty jsou používány, pokud tomu nebrání technické, ekonomické nebo legislativní překážky. Hodnota součinitele prostupu tepla u konstrukcí vytápěných budov s návrhovou relativní vlhkostí vnitřního vzduchu  $\varphi_i \leq 60\%$  musí být menší nebo rovna požadované hodnotě součinitele prostupu tepla  $U_N$  ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ). Hodnoty doporučených a požadovaných součinitelů prostupu tepla pro jednotlivé konstrukce u budov s převažující návrhovou vnitřní teplotou v rozmezí 18 až 22°C jsou uvedeny v **tabulce 3** (Tywoniak, 2012). Pro srovnání jsou zde uvedeny i doporučené hodnoty pro pasivní dům.

**Tabulka 3:** Hodnoty součinitele prostupu tepla pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou intervalu 18 až 22° (ČSN 73 0540-2, 2011)

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )		
	Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy
Stěna vnější	0,30	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,12
Střecha strmá se sklonem nad 45°	0,30	0,20	0,18 až 0,12
Střecha plochá a šikmá se sklonem do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop pod nevytápěnou půdou (se střechou bez tepelné izolace)	0,30	0,20	0,15 až 0,10
Stěna k nevytápěné půdě (se střechou bez tepelné izolace)	0,30	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,12
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině	0,45	0,30	0,22 až 0,15
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru	0,60	0,40	0,30 až 0,20
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k temperovanému prostoru	0,75	0,50	0,38 až 0,25
Strop a stěna vnější z temperovaného prostoru k venkovnímu prostředí	0,75	0,50	0,38 až 0,25
Podlaha a stěna temperovaného prostoru přilehlá k zemině	0,85	0,60	0,45 až 0,30
Stěna mezi sousedními budovami	1,05	0,70	0,5
Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10° včetně	1,05	0,70	
Stěna mezi prostory s rozdílem teplot do 10° včetně	1,30	0,90	
Strop vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5° včetně	2,2	1,45	
Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5° včetně	2,7	1,80	
Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří	1,5	1,2	0,8 až 0,6
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí	1,4	1,1	0,9
Dveřní výplň otvoru z vytápěného prostoru do venkovního prostředí (včetně rámu)	1,7	1,2	0,9
Výplň otvoru vedoucí z vytápěného do temperovaného prostoru	3,5	2,3	1,7
Výplň otvoru vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	3,5	2,3	1,7
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45° vedoucí z temperovaného prostoru do venkovního prostředí	2,6	1,7	1,4

Doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla u vnější stěny jsou definovány pro těžkou a lehkou konstrukci. Definice lehké konstrukce podle ČSN 73 0540-2 (2011) je: „Konstrukce s nízkou tepelnou setrvačností, které mají plošnou hmotnost vrstev (od vnitřního líce k rozhodující tepelně izolační vrstvě včetně) nižší než  $100 \text{ kg.m}^{-2}$ . Ostatní konstrukce jsou považovány za „těžké“, tj. za konstrukce s vysokou tepelnou setrvačností“. Tepelná setrvačnost je funkcí zejména měrné tepelné kapacity. Měrná tepelná kapacita  $c$  ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) není funkcí objemové ani plošné hmotnosti.

Dalším pojmem týkající se problematiky tepelné setrvačnosti je tepelná akumulace obvodové stěny a její vliv na vnitřní teplotní stabilitu. Tepelnou akumulaci je možné vyjádřit pomocí tepelné kapacity, resp. její poměrné části vztažené na jednotku plochy stěny (plošné tepelné kapacity)  $C$  ( $\text{J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) (ASTM C1363-97, 1997).

### Průměrný součinitel prostupu tepla

Hodnota průměrného součinitele prostupu tepla  $U_{em}$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) budovy nebo vytápěné zóny budovy musí být menší nebo rovna požadované hodnotě průměrného součinitele prostupu tepla  $U_{em,N}$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ). Pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou v intervalu  $18$  až  $22^\circ\text{C}$  se požadovaná hodnota průměrného součinitele prostupu tepla stanoví dle **tabulky 4**. (Tywoniak, 2012)

**Tabulka 4:** Požadované hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla pro budovy s převažující návrhovou vnitřní teplotou v intervalu  $18$  až  $22^\circ\text{C}$  (ČSN 73 0540-2, 2011)

Typ budovy	Požadované hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla $U_{em,N}$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
Nové obytné budovy	Nejvýše 0,50
Ostatní budovy	Nejvýše hodnota: - pro objemový faktor tvaru: $A/V \leq 0,2$ ; $U_{em,N,20} = 1,05$ $A/V > 1,0$ ; $U_{em,N,20} = 0,45$ - pro ostatní hodnoty $A/V$ $U_{em,N,20} = 0,30 + 0,15 / (A/V)$

### Lineární a bodový činitel prostupu tepla

Lineární a bodový činitel prostupu tepla charakterizuje tepelné vlastnosti tepelných mostů a vazeb v konstrukci. Dle ČSN 73 0540-1 (2005) je definice tepelného mostu: „Část dané stavební konstrukce, kde se její tepelný odpor místně významně mění:

- a) úplným nebo částečným průnikem stavební konstrukce nebo vrstvy materiálu s odlišnou tepelnou vodivostí (konstrukce je tepelně nestejnorodá), nebo stavební konstrukce obsahuje alespoň jednu nestejnorodou vrstvu,
- b) změnou tloušťek vrstev stavební konstrukce,
- c) rozdílem mezi vnitřními a vnějšími plochami stavební konstrukce, např. vyztuženými žebry.

Lineární tepelný most je tepelný most (tepelná vazba) se shodnými řezy v jednom směru. Oproti tomu bodový tepelný most je tepelný most (tepelná vazba) bez shodných řezů v libovolném směru. Lineární činitel prostupu tepla  $\Psi$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a bodový činitel prostupu tepla  $\chi$  ( $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$ ) tepelných vazeb mezi konstrukcemi musí být menší nebo roven požadovaným hodnotám  $\Psi_N$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a  $\chi_N$  ( $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Požadované a doporučené hodnoty lineárního a bodového činitele prostupu tepla tepelných vazeb mezi konstrukcemi se stanoví dle **tabulky 5**. Pro srovnání jsou zde uvedeny i doporučené hodnoty pro pasivní dům.

**Tabulka 5:** Požadované a doporučené hodnoty lineárního a bodového činitele prostupu tepla tepelných vazeb mezi konstrukcemi (ČSN 730540-2, 2011)

Typ lineární tepelné vazby	Lineární činitel prostupu tepla $\Psi$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )		
	Požadované hodnoty	Doporučené hodnoty	Doporučené hodnoty pro pasivní domy
Vnější stěna navazující na další konstrukci s výjimkou výplně otvoru, např. na základ, strop nad nevytápěným prostorem, jinou vnější stěnu, střechu, lodžii či balkon, markýzu či arkýř, vnitřní stěnu a strop (při vnitřní izolaci), aj.	0,20	0,10	0,05
Vnější stěna navazující na výplň otvoru, např. na okno, dveře, vrata a část prosklené stěny v parapetu, bočním ostění a v nadpraží	0,10	0,03	0,01
Střecha navazující na výplň otvoru, např. střešní okno, světlík, poklop výlezu	0,30	0,10	0,02
Typ bodové tepelné vazby	Bodový činitel prostupu tepla $\chi$ ( $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$ )		
Průnik tyčové konstrukce (sloupy, nosníky, konzoly, apod.) vnější stěnou, podhledem nebo střechou	0,4	0,10	0,02

**Poznámka:** Pokud je návrhem i provedením zaručeno, že působení tepelných vazeb mezi konstrukcemi je menší než 5% nejnižšího součinitele prostupu tepla navazujících konstrukcí, pak se splnění požadované normové hodnoty lineárního a bodového činitele prostupu tepla v těchto stycích nemusí hodnotit.

Lineární a bodový činitel prostupu tepla  $\Psi$  a  $\chi$  se stanoví podle normy ČSN EN ISO 10 211 (2018), ČSN EN ISO 14 683 (2018), s podmínkami pro vnější rozměry konstrukcí podle ČSN 73 0540-4 (2005). Souhrnné působení tepelných vazeb je menší než 5% obvykle v těch případech, kdy hlavní tepelněizolační vrstva ve stycích mezi konstrukcemi navazuje souvisle, nemá výrazné zeslabení tloušťky a neprochází jí vodivější prvky. Hlavní tepelně izolační vrstva je vrstva s nejvyšším tepelným odporem ve stavebních konstrukcích.

### 3.1.1.2 Budovy s nízkou energetickou náročností

Budovy s nízkou energetickou náročností se dělí dle měrné potřeby tepla na vytápění na nízkoenergetické budovy (do  $50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), pasivní budovy (**dle tabulky 6**) a energeticky (téměř) nulové budovy (**dle tabulky 8**).

Nízkoenergetické budovy jsou charakterizovány nízkou potřebou tepla na vytápění a hodnota průměrného součinitele prostupu tepla nepřekračuje doporučenou hodnotu pro budovy standardní dle **tabulky 4**. Dle Počinkové *et al.* (2012) byly budovy v nízkoenergetickém standardu nutným vývojovým stupněm k pasivním budovám. Oproti pasivním budovám je rozdíl zejména v použití klasické otopné soustavy, který spolu s větracím zařízením zajišťuje optimální kvalitu vnitřního prostředí. Budova je definována nízkou hodnotou potřeby tepla na vytápění, která je docílena optimalizovaným stavebním řešením obálky budovy. Potřeba primární energie není hodnocena. Dle vyhlášky č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov (zákon č. 406/2000 Sb., zákon o hospodaření energií) musí budova splňovat třídu C, ale je vhodné, aby vyhověla požadavkům pro třídu B - úsporná.

Pasivní budovy jsou charakterizovány minimalizovanou potřebou energie na zajištění požadovaného stavu vnitřního prostředí a minimalizovanou potřebu primární energie z neobnovitelných zdrojů na jejich provoz díky optimalizovanému stavebnímu řešení a dalším opatřením. Pasivní budovy musí splňovat odpovídající požadavky z **tabulky 6**. Konstrukce teplosměnných ploch se přednostně řeší tak, aby odpovídaly doporučeným hodnotám pro pasivní budovy v **tabulce 3**. Pro rodinné domy se podle konkrétních podmínek doporučuje volit hodnoty při spodním okraji příslušného intervalu, pro kompaktní bytové domy může být dostačující použít hodnoty při horním okraji příslušného intervalu (ČSN 73 0540-2, 2011).

**Tabulka 6:** Základní požadavky obytných budov v pasivním standardu (ČSN 73 0540-2, 2011)

	Průměrný součinitel prostupu tepla $U_{em}$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	Měrná potřeba tepla na vytápění ( $kWh.m^{-2}.a^{-1}$ )	Měrná potřeba energie na chlazení ( $kWh.m^{-2}.a^{-1}$ )	Měrná potřeba primární energie ( $kWh.m^{-2}.a^{-1}$ ) *
Rodinný dům	$\leq 0,25$ požadováno $\leq 0,20$ doporučeno	$\leq 20$ požadováno $\leq 15$ doporučeno	0	$\leq 60$
Bytový dům	$\leq 0,35$ požadováno $\leq 0,30$ doporučeno	$\leq 15$	0	$\leq 60$

\* měrná potřeba primární energie zahrnuje vytápění, chlazení, přípravu teplé vody, pomocnou elektrickou energii na provoz energetických systémů budovy a nezahrnuje energii na elektrické spotřebiče a umělé osvětlení

Tywoniak (2005) udává, že je potřeba při navrhování a optimalizaci pasivního či energeticky nulového domu výrazně snížit hodnoty součinitele prostupu tepla požadovaného pro standardní budovy. Upravené hodnoty jsou zpracované do **tabulky 7**.

**Tabulka 7:** Upravené doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla pro pasivní či energeticky nulový dům. (Tywoniak, 2005)

Typ konstrukce	Součinitel prostupu tepla $U$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
Obvodové stěny	0,10 – 0,15
Střecha	0,08 – 0,12
Podlaha na terénu	0,12 – 0,15
Okna	max. 0,8

Dle Hudce (2008) je pasivní budova mezinárodně uznávaný standard s velmi nízkou spotřebou energie a vysokým komfortem bydlení. Sluneční záření a vnitřní tepelné zisky (např. osoby a spotřebiče) prakticky zajišťují vytápění domu. V porovnání s běžnou stavbou je potřeba energie na vytápění přibližně desetkrát menší, a to do  $15 kWh.m^{-2}$  za rok. Vzhledem k této nízké hodnotě se v pasivním domě nemusí používat klasická otopná soustava a ke zbytkové potřebě tepla dostačuje jen malý zdroj.

Hodnocení energeticky nulových budov vyplývá z roční bilance energetických potřeb a energetické produkce v budově a jejím okolí, které jsou vyjádřeny v hodnotách primární energie. Předpokládá se, že budova je napojena na standardní energetické sítě, jedná se tedy o budovu bilančně nulovou. Stavební řešení a technická zařízení budovy je zpravidla výhodné navrhnout tak, aby odpovídalo standardu pasivní budovy (Tywoniak, 2012). Dle ČSN 73 0540-2 (2011) jsou stanoveny dvě základní úrovně hodnocení:

**Úroveň A** - do energetických potřeb budovy se zahrne potřeba tepla na vytápění, potřeba energie na chlazení, energie na přípravu teplé vody, pomocná elektrická energie na

provoz energetických systémů budovy, elektrická energie na umělé osvětlení a elektrické spotřebiče.

**Úroveň B** - jako úroveň A, ale bez zahrnutí elektrické energie na elektrické spotřebiče

V **tabulce 8** jsou pro obě úrovně uvedeny požadavky jak pro energeticky nulovou budovu, tak pro budovu blízkou energeticky nulovému standardu.

**Tabulka 8:** Základní požadavky na obytné budovy v energeticky nulovém standardu (ČSN 73 0540-2, 2011)

Závaznost kritéria		Požadovaná hodnota	Doporučená hodnota	Požadovaná hodnota podle zvolené úrovně hodnocení	
		Průměrný součinitel prostupu tepla $U_{em} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	Měrná potřeba tepla na vytápění $E_A (kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1})$	Měrná roční bilance potřeby a produkce energie vyjádřená v hodnotách primární energie z neobnovitelných zdrojů $PE_A (kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1})$	
				Úroveň A	Úroveň B
Obytné budovy	Nulový	Rodinné domy $\leq 0,25$	Rodinné domy $\leq 20$	0	0
	Blízký nulovému	Bytové domy $\leq 0,35$	Bytové domy $\leq 15$	80	30

Konstrukce téměř energeticky nulové budovy navržena dle požadavků na budovu pasivní, s rozdílem v poloviční hodnotě měrné potřeby primární energie z neobnovitelných zdrojů bez vlivu elektrické energie na elektrické spotřebiče. Výsledná hodnota primární energie z neobnovitelných zdrojů je vyjadřována v  $kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ , a je vždy zaokrouhlena na celé číslo (Tywoniak, 2012).

### 3.1.2 Konstrukční systémy dřevěných staveb

Stále rostoucí spotřeba neobnovitelných zdrojů energie vedla k silnému povědomí průmyslových zemí v oblasti životního prostředí o snížení spotřeby energie (zejména ke snížení skleníkových plynů), tak k využívání obnovitelných zdrojů energie, jako je dřevo (Petersen & Solberg, 2002). Dřevo je ekologicky výhodný stavební materiál; dřevo má nízkou svázanou primární energii, přispívá k uhlíkové bilanci, snižuje emise CO<sub>2</sub> při nahrazování jiných energeticky náročných stavebních materiálů a je obnovitelným zdrojem (Wilson, 2006). V tomto směru představuje vývoj dřevěných konstrukcí a dřevostaveb velkou výzvu. Dřevostavby se staly zajímavou alternativou, pokud jde o



spotřebu energie a tepelný komfort (Edminster *et al.*, 1998). Masivní (rostlé) dřevo je v současnosti využíváno ve stavebnictví na konstrukci stěn, podlah, stropů a střech.

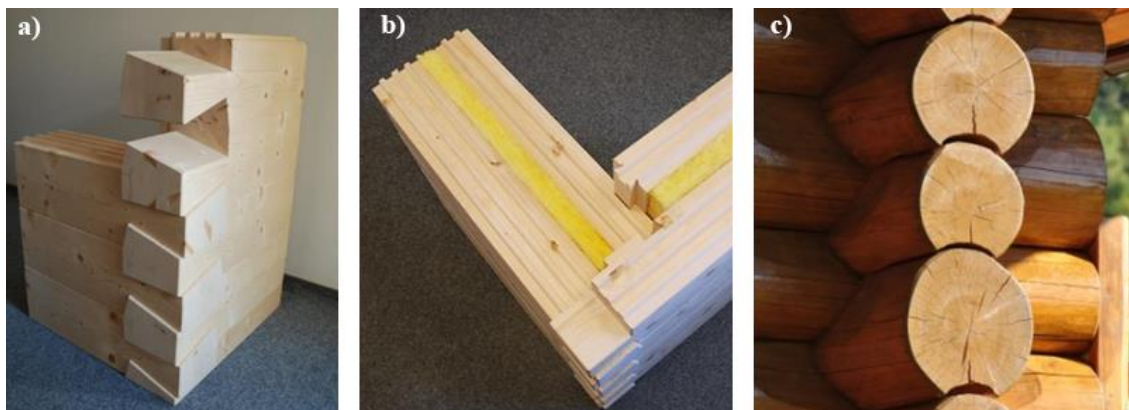
U obvodových konstrukcí na bázi dřeva se v technické oblasti objevují novodobá a výhodná řešení pláště budovy z hlediska skladby a uspořádání vrstev. Základní typy konstrukčních systémů na bázi dřeva podle Kolba (2008) jsou:

- srubové stavby,
- hrázděné stavby,
- sloupkové stavby (Ballon - Frame a Platform - Frame),
- rámové stavby,
- skeletové stavby,
- stavby z masivních dřevěných panelů.

Systémy se výrazně odlišují konstrukcí i vzhledem. Podle regionu nebo způsobu konstrukce jsou také rozdílně pojmenovány. V současné době převážně používané konstrukční systémy jsou podrobněji probrány. Tj. srubové stavby, rámové stavby, skeletové stavby a stavby z masivních dřevěných panelů. Podle Českého statistického úřadu byl v roce 2017 podíl dřevostaveb na trhu rodinných domů v České republice 14,8 % (2 159 domů), což je o 65 % více než před deseti lety (v roce 2007, 756 domů). Převládají rámové konstrukce panelové a staveništní montáže. Stavby z masivního dřeva (sruby a roubenky a konstrukce z masivních dřevěných panelů) mají z celkového zastoupení dřevostaveb cca 10%.

### 3.1.2.1 *Srubové stavby*

Masivní (rostlé) dřevo ve stavbách se v historii i dnes používá na roubené a srubové stavby (Fossdal & Edvardsen, 1995; Houdek & Koudelka, 2013). Principem těchto staveb je vždy skládání dřevěných stěn z vodorovně vrstvených (roubených) masivních dřevěných prvků. Srub je vyroben zejména z jehličnaté kulatiny tloušťky 200-400 mm (**obrázek 1c**), často pouze odkorněné, nijak tvarově upravované s přesahy v rozích. Oproti tomu roubenka je pro české území tradičnějším způsobem výstavby z hraněných dřevěných trámů s rohy spojovaným různým druhem tesařských spojů, nejčastěji tzv. rybinovým (**obrázek 1a**) (Vařeka & Frolec, 2007).



**Obrázek 1:** (a) roh roubené stěny z lepených profilů typu BSH, (b) roh zateplené roubené stěny z lepených profilů typu BSH, (c) roh srubové stěny ze surové kulatiny (OK Pyrus, 2014)

Na stavbu roubenek a srubů se používá dřevo smrku, modřínu, jedle a borovice. V současné době se se využívá i průmyslové výroby s použitím vysušených lepených BSH profilů kvůli dosažení relativní rozměrové a tvarové stálosti (Houdek & Koudelka, 2013). Pro dosažení nízkoenergetického standardu se používají i s přídavnou tepelnou izolací (**obrázek 1b**) (OK Pyrus, 2014).

Výhodou řemeslné výroby je estetický dojem stavby, přírodní a řemeslný charakter. Další výhodou je použití větších průměrů kulatiny, kterým by obráběcí centra nemusela vyhovovat. Čím větší je průměr kulatiny, tím je zpravidla dosaženo lepších tepelně-izolačních vlastností. Nevýhodou srubové stavby řemeslné výroby je sesychání, což má za následek sesedání stavby. Maximální hodnota je odhadována na 60 mm na 1 m výšky srubové stěny. Největší sedání se projevuje během prvních 5 let. Hlavním požadavkem na srubové stavby je proto tvorba konstrukčních detailů s ohledem na budoucí rozměrové změny (Houdek & Koudelka, 2013).

Charakteristické znaky srubových staveb dle Kolba (2008):

- vysoká řemeslná dovednost (v případě řemeslné výroby),
- speciální výběr dřeva,
- umělecké rohové spoje,
- pevné uspořádání půdorysu,
- velká spotřeba dřeva,
- sednutí.

### 3.1.2.2 Sloupkové stavby (*Balloon-Frame a Platform-Frame*)

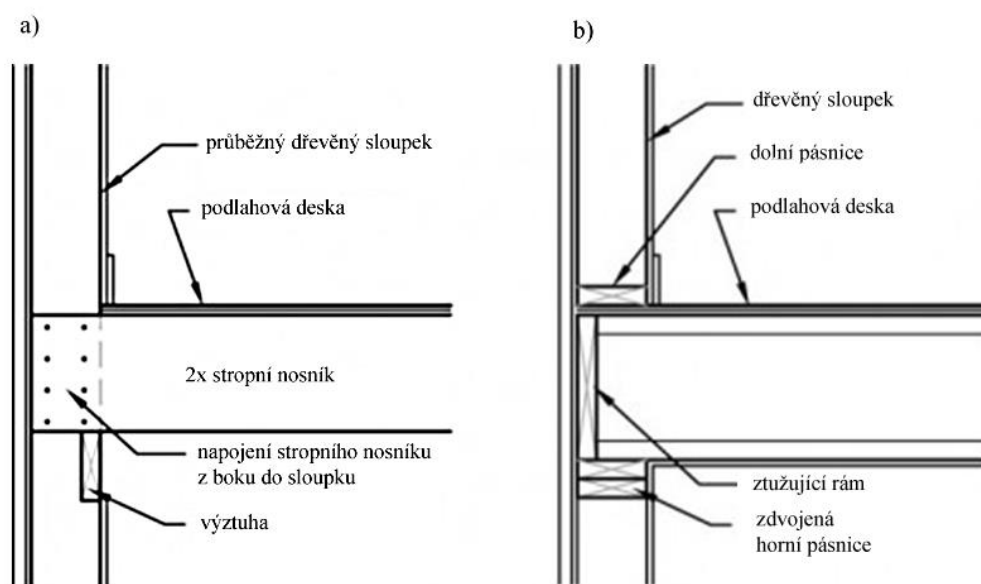
První ze systémů – Balloon - Frame se zrodil v USA okolo roku 1850 jako požadavek na rychlou výstavbu. Bylo to zapříčiněno i vlivem průmyslové a hromadné výroby hřebíků. Žebrový stavební systém ze dřeva se skládá ze sloupků postavených v malých vzdálenostech, které jsou vyztuženy prkny nebo deskami na bázi dřeva. (Kolb, 2008). V Severní Americe se v zásadě prosadily dva základní typy:

#### **Balloon - Frame**

U tohoto systému procházejí stěnové sloupky průběžně přes dvě nebo více podlaží (**obrázek 2a**). Spodní a horní uzavření tvoří vodorovná prkna (prahy a vaznice). Stropní nosníky jsou uloženy na stojaté fošně, která je zapuštěná do zářezů stěnových sloupků (Hůlka *et al.*, 2014).

#### **Platform - Frame**

Charakteristickým znakem je poschod'ová skladba. Plošina se během stavby používá jako pracovní plocha a výrobní místo (**obrázek 2b**). Systém Platform - Frame se dnes běžně používá pro jedno a dvoupodlažní domy. Tento systém umožňuje standardizaci a prefabrikaci a používání normalizovaných konstrukčních prvků. Kromě toho je tento způsob stavění velmi flexibilní vzhledem ke konstrukci a architektonickému řešení (Watts, 2013).



**Obrázek 2:** Druhy sloupkových staveb: (a) Balloon-Frame, (b) Platform-Frame (Winter & Okerstrom, 2015)

## Sloupkové stavby – rámové stavby

V návaznosti na americké zkušenosti a úspěchy se sloupkové stavby prosadily i v Evropě. Sloupkové stavby se dále zdokonalovaly, což vedlo k zavedení kvalitnějších prefabrikovaných rámových staveb. To ovšem na zcela jiné úrovni výroby než v USA a postupem přizpůsobeným evropským a národním poměrům a nárokům na kvalitu (Kolb, 2008).

Charakteristické znaky sloupkových staveb dle Kolba (2008):

- malá možnost předvýroby, vysoká pracnost na staveništi,
- budova je vyztužena pláští,
- konstrukce je oboustranně obložena,
- štíhlé, vysoké průřezy,
- těsná vzdálenost sloupků.

### 3.1.2.3 Rámové stavby

#### Konstrukční systém Two by Four

Tento systém vychází z tradičního systému rozšířeného v USA. Systém je používán od poloviny 19. století a od té doby je postupně rozšiřován. Běžně se, jako u předchůdce rámových staveb - stavebního systému Platform-Frame, stavba rozděluje po patrech a je pro něj charakteristická stropní deska (platforma). Nosná kostra jednotlivých stěn má zpravidla tvar obdélníkového rámu tvořeného spodním a horním prahem a krajními svislými sloupky (**obrázek 3**). V České republice je tento původně severoamerický systém někdy označován Two by Four (2 x 4) podle původního průřezu fošen 2 x 4 palce (cca 50 x 100 mm). Dnes je většinou hoblován a používán od minimálního rozměru 1,5 x 3,5 palce (cca 38 x 90 mm), ale i přes to se název systému stále používá. Nejčastěji používané rozměry nosné fošny jsou 60 x 120, 60 x 140, 50 x 140, 60 x 160 mm (Růžička, 2006). Dnes se ovšem u vnějších stěn požadují větší tloušťky izolace než je rozměr fošny. Buď se musí průřezy zvětšit na 180 - 200 mm nebo se pro izolaci použije druhá izolační vrstva nezávislá na nosné konstrukci. Protože druhou izolační vrstvou lze současně také eliminovat lineární tepelné mosty, je třeba tuto alternativu upřednostnit (Kolb, 2008).

Nejvhodnější materiálem na dřevěné fošny je KVH řezivo (třída pevnosti C24) s vlhkostí  $12\% \pm 2\%$ , které se v podobě cinkovaných (podélně nastavovaných profilů) lepí k sobě (**obrázek 6b**). Osová vzdálenost fošen ve stěně je 625 mm, to odpovídá dvojnásobku šířky a čtyřnásobku délky (1 250 x 2 500 mm) většiny deskových materiálů na opláštění (Zahradníček & Horák, 2011).

Opláštění z vnitřní strany je tvořeno velkoformátovými deskami na bázi dřeva (nejčastěji OSB), které tvoří staticky pevnou a velice kompaktní konstrukci a zároveň slouží jako vzduchotěsná vrstva. Tato vrstva se dále opláští sádkartonovými nebo sádrovláknitými deskami s instalační mezerou. Opláštění z vnější strany je doporučeno provádět z prodyšných materiálů (např. difúzních fólií nebo dřevovláknitých desek), aby celá konstrukce byla difúzně otevřená. To znamená, aby konstrukce umožňovala přístup vodní páry z interiéru do exteriéru. Rámové konstrukce se také provádí na staveništi, tak i v prefabrikovaném provedení z panelů, které se na stavbě pouze smontují. Výhodou panelového provedení je rychlejší výstavba a dodržení standardní kvality (Hudec, 2013).



**Obrázek 3:** Rámová konstrukce - systém Two by Four před instalací opláštění (Brotánek, 2013)

### **Konstrukční systém z nosníků na bázi dřeva**

Konstrukční systém nosíkové konstrukce využívá jako nosné prvky prefabrikované nosníky na bázi dřeva tvaru I (**obrázek 4**). I-nosníky jsou konstruovány z pásnic a stojny. K výrobě pásnic se obvykle používá jehličnatého KVH řeziva

spojovaného cinkovými spoji. Stojna je vyrobena z tvrdé dřevovláknité desky či OSB desky (Mynář & Teslík, 2016). Opláštění nosníků je tvořeno z OSB desek nebo difúzních desek DHF, které se častěji používají z vnější strany. Následně je možné instalovat fasádní dřevěný obklad či aplikovat omítku. Výhodou nosníkové konstrukce je provedení tepelné izolace mezi nosníky na celou tloušťku stěny. Dále je to minimalizace lineárních tepelných mostů díky malé tloušťce stojny. Jako tepelná izolace mezi nosníky jsou používány různé druhy sypaných či foukaných izolací. U dřevostaveb se nejčastěji používají difúzně otevřené skladby stěn s použitím izolací s menším difúzním odporem, aby vlhkost nahromaděná v interiéru mohla přecházet skrze konstrukci do exteriéru. Větší nahromadění vlhkosti by mohlo způsobit vznik hniloby, plísní a následné poškození dřevěné konstrukce. Z interiérové strany se provádí jednoduchá parobrzdňá vrstva z OSB desek (Hudec, 2008).



**Obrázek 4:** I - nosníky na bázi dřeva – vlevo stojna z dřevovláknité desky, vpravo z OSB desky (MTA, 2015)

Charakteristické znaky rámových staveb dle Kolba (2008):

- volnost architektonického řešení,
- jednoduchý konstrukční systém,
- opakující se detaily,
- nosná kostra sestává ze štíhlých, standardizovaných průřezů,
- celkové vyztužení opláštěváním,
- jednoduchá dostupnost materiálu,
- poschod'ová výstavba,
- spoje kontaktními styky a mechanickými spojovacími prostředky,
- rastrový rozměr 400 – 700 mm, přednostně 625 mm,

- konstrukce oboustranně obložená,
- krátká doba výstavby, jsou možné různě stupně předvýroby.

#### 3.1.2.4 Skeletové stavby

Tento druh konstrukce s jeho větším nebo menším rastrem sloupů ze dřeva nebo také v kombinaci s ocelí a železobetonem je ideální také pro jedno a dvoupodlažní komplexy budov. K tomuto rostoucímu významu dřevěných skeletových staveb přispěly také nové prutové konstrukce na bázi dřeva a technika jejich spojování (Kolb, 2008).

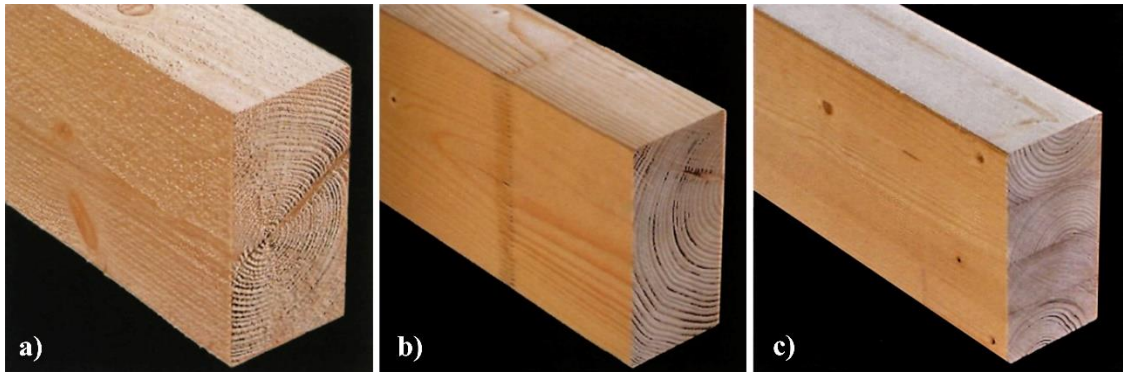
Nosná kostra je většinou tvořena lepenými tyčovými prvky spojovanými ocelovými styčnickovými deskami. Většinou se tento systém používá v kombinaci s lehkým sendvičovým obvodovým pláštěm. Zatímco u staveb z masivního dřeva a rámových staveb je nosná konstrukce lineární a zatížení přenášejí stěny, u skeletových staveb přenášejí zatížení bodově uspořádané sloupy (**obrázek 5**).



**Obrázek 5:** Konstrukce těžkého dřevěného skeletu (ESTAV, 2016)

Mezi výhody systému patří výstavba vícepatrových budov s použitím velkých prosklených ploch ve stěnách. Nosné prvky z lepeného lamelového dřeva BSH (třída pevnosti G24h) (**obrázek 6c**) jsou obvykle vyráběny z lamel o tloušťce 40 mm, u ohýbaných prvků v tloušťce 20-30 mm. Pro lepení prvku se vzhledem k malé lepené ploše

používají melaminformaldehydové pryskyřice (Hudec, 2013). Také se používá rostlé (obrázek 6a) a konstrukční dřevo KVH (obrázek 6b) třídy pevnosti C24 (Herzog, 2004).



**Obrázek 6:** Nosné dřevěné prvky: (a) rostlé dřevo, (b) konstrukční dřevo KVH, (c) lepené lamelové dřevo BSH (Hugues *et al.*, 2004)

Charakteristické znaky skeletových staveb podle Kolba (2008):

- velká kompoziční volnost,
- variabilní řešení půdorysu,
- nosný skelet a stěny ohraničující prostor zůstávají vzájemně nezávislé,
- škála rozměrů podle rastru a modulu,
- dřevěný skelet může být uvnitř nebo venku viditelný nebo také oboustranně zakrytý,
- spojování většinou ocelovými prostředky,
- u stěnových, stropních a střešních prvků je velká možnost předvýroby.

### 3.1.2.5 Stavby z masivních dřevěných panelů

V současnosti se v největším měřítku využívají panely s křížem lepeného lamelového dřeva (CLT - Cross Laminated Timber). Konstrukce CLT panelů (obrázek 7) byla vytvořena kolem roku 1996 v Evropě, zejména v Rakousku a Německu: jednotlivé vrstvy lamel jsou křížově přilepené nebo šroubované, aby se zvýšila jejich pevnost.





**Obrázek 7:** Ukázka napojení jednotlivých dřevěných lamel u masivních CLT panelů (Pavlas, 2016)

Tento systém je pak vhodný pro obytné více podlažní budovy v rozmezí 4-10 podlaží. Nejvyšší dřevostavbou světa je 18-ti podlažní budova „Brock Commons“ univerzity v Britské Kolumbii ve Vancouveru (Poirier *et al.* 2016).

Panely se vyrábějí zpravidla ze 3, 5 a maximálně 7 vrstev dřevěných lamel tloušťky 10 – 50 mm kladených kolmo na sebe. Panely jsou vyráběny ze smrkového dřeva, částečně z modřínu, jedle a borovice. Tloušťka panelů se pohybuje od 60 do 240 mm. Maximální výška panelů bývá zpravidla 3 m a maximální délka se pohybuje dle jednotlivých výrobců od 16 do 18 m. Dodávají se v různých kvalitách povrchu a profilování (Pavlas, 2016).

Tento typ dřevěné konstrukce má velkou výhodu v nižších požadavcích na kvalitu vstupní suroviny. Po rozřezání kmene na jednotlivé lamely je možné vytrídít většinu vad a v následném lepení vzniká kvalitní konstrukční materiál. V České republice se tento materiál prodává pod obchodním názvem Novatop. Při montáži na stavbě se panely z křížem lepeného dřeva opatřují, obdobně jako konstrukce zděné stavby, kontaktním zateplovacím systémem. Z přírodních materiálů je nejčastěji používaná dřevovláknitá izolace (**obrázek 8**).



**Obrázek 8:** Příklad panelu z křížem lepeného lamelového dřeva s kontaktní dřevovláknitou izolací (Hudec, 2013)

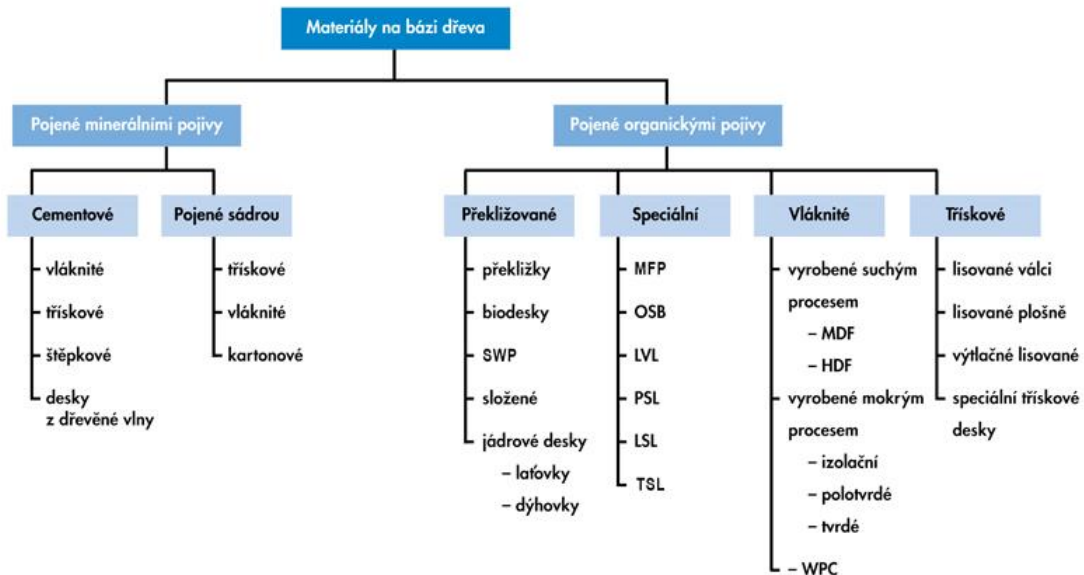
Výhodou těchto panelů je možnost výstavby vícepodlažních budov s rychlou montáží na staveništi. Díky použití dřeva ve formě masivu získává stavba lepší tepelně-akumulační vlastnosti a lepší bilanci vlhkosti vzduchu v interiéru. Velký důraz je zde kladen na kvalitní provedení a utěsnění všech spojů, zejména rohových. Pro utěsnění spojů se používají pásy a tmely, díky kterým je zaručena pružnost a těsnost spoje po celou dobu životnosti stavby. Vzduchotěsná obálka budovy je tvořena samotným masivním panelem, a tak není v konstrukci potřeba provádět další parobrzdnou vrstvu (Hudec, 2013).

Charakteristické znaky staveb z masivních dřevěných panelů podle Kolba (2008):

- nosná vrstva z masivní, plošně působící desky,
- masivní podíl je nejméně 50% uzavřené nosné vrstvy,
- plošně působící nosný systém je tvořen velkorozměrovými plošnými dílci nebo konstrukčními prvky malého formátu,
- jednovrstvé systémy spojované hřebíky nebo hmoždíky i vícevrstvé systémy slepené příčně nebo křížově nebo spojované hmoždíky,
- účinný přenos vysokých zatížení,
- vyztužení budovy se provádí plošnou nosnou konstrukcí,
- příčně nebo křížově slepené systémy jsou vysoce rozměrově stabilní.

### 3.1.3 Materiály na bázi dřeva

Materiály na bázi dřeva je možné dělit podle mnoha hledisek (např. velkoplošné, konstrukční, aglomerované, kompozitní, dle způsobu použití atd.). Nejčastější způsob dělení je podle druhu použitého pojiva a způsobu konstrukce, který je uveden na **obrázku 9**.



**Obrázek 9:** Rozdělení materiálů na bázi dřeva v závislosti na druhu použitého pojiva a podle způsobu konstrukce (Böhm *et al.*, 2012a)

Použité zkratky: SWP - vícevrstvé desky z masivního dřeva, MFP - multifunkční panely, OSB - desky z orientovaných plochých třísek, LVL - vrstvené dřevo, PSL, LSL, TSL - materiály pro nosné účely, MDF - měkké dřevovláknité desky, HDF - tvrdé dřevovláknité desky. Ve schématu jsou uvedeny pouze základní druhy materiálů, bez individuálních způsobů modifikací a typových obměn, a dále v něm nejsou zahrnuty nejjednodušší plošné materiály z masivu (Böhm *et al.*, 2012a).

Pro účel této práce zde budou podrobněji popsány materiály na bázi dřeva, které se používají na obvodové konstrukce na bázi dřeva.

#### 3.1.3.1 Pojené minerálními pojivy

##### Cementovláknité desky

Velkoplošný materiál vyráběný kromě cementu z celulósových vláken (buničina), syntetických vláken (polypropylen), minerálního plniva nebo perlitu a vodního skla (**obrázek 10a**). Některé firmy používají také přídavek celulósových vláken z kvalitního sběrného papíru. Směs vláken (buničina) se mísí s cementem a dalšími složkami a vytváří

se homogenní směs, která se dále odvodňuje a lisuje na válcových nebo plošných lisech (Hugues *et al.*, 2004). Díky jemné struktuře, vysokému podílu cementu a velkému lisovacímu tlaku, mají tyto materiály hustotu 1 350 až 1 700 kg.m<sup>-3</sup>. Vysoká homogenní hustota dodává deskám vysokou tvrdost, pevnost, trvanlivost a odolnost proti působení povětrnostních vlivů. Tento materiál má také velmi nízkou nasákavost a bobtnání, je mrazuvzdorný, nehořlavý a zdravotně nezávadný. Desky se vyrábějí v tloušťkách 3 až 20 mm (nejčastěji 6 a 8 mm). Některé typy se mohou používat i jako šablonová nebo vlnitá střešní krytina. Mohou být dodávány také s barevnou povrchovou úpravou.

Vedle speciálních typů použití je nejčastější upotřebení celých desek pro obklady větraných fasád, vnitřních stěn a stropů a také jako střešní krytina. Mohou se také používat při výrobě sendvičových panelů a izolačních podložek pod elektrická zařízení (Böhm *et al.*, 2012a).

### **Cementotřískové desky**

Velkoplošný materiál je tvořen ze směsi tenkých třísek (velikosti 0,2-0,3 mm, délky od 10-25 mm), cementu a vody (**obrázek 10b**). Vyrobené třísky jsou tříděny na dvě frakce - hrubou pro střední vrstvu a jemnou pro povrchové vrstvy desky. Ve směšovací zařízení je smícháno cca 60 % třísek, 25 % cementu, 10 % vody (dle vlhkosti třísek) a mineralizující přísady. Podobně jako při výrobě DTD se pomocí tří vrstvicích zařízení formuje třískový koberec, který je dále dělen na budoucí formáty a postupně přesouván do forem vrstvených na sebe a lisovaných za studena. Slisovaný soubor desek se stahovacím zařízením zajišťujícím trvalé působení tlaku se z lisu přesouvá asi na 8 hod. do vytvrzovacího tunelu. Částečně vytvrzené desky se oddělují, formátují a nechávají se zhruba 3 týdny vytvrdnout a klimatizovat na vlhkost cca 9 %. Část produkce vytvrzených desek se oboustranně brousí. Hustota cementotřískových desek se pohybuje okolo 1 200 kg.m<sup>-3</sup>. Desky jsou homogenní, tvrdé, odolné proti působení vlhkosti, plísním, dřevokazným houbám, hmyzu včetně termitů a proti působení ohně. Mají také dobré zvukově izolační vlastnosti a jsou mrazuvzdorné. Jsou také odolné proti působení benzínu a olejům, neobsahují azbest ani formaldehyd (Böhm *et al.*, 2012a).

Desky od českého výrobce CETRIS se vyrábějí v rozměrech 1250 x 3350 mm v tloušťkách 8-40 mm, jsou dodávány v surovém stavu nebo v barevném provedení podle stupnice RAL. Výrobce dodává také přířezy a desky s obvodovými polodrážkami nebo se spojem pero - drážka. Tyto desky lze používat na konstrukce podlah, pro půdňi

nástavby a vestavby, podhledy, pro konstrukce příček a stěn, odvětrávané fasády a protipožární zábrany (Hudec *et al.*, 2013).

### **Sádrovláknité desky**

Velkoplošný materiál je vyroben ze směsi dřevních vláken, vláken získaných rozmělněním starého papíru a sádry (**obrázek 10c**). Ve směšovací zařízení se vlákna míchají se sádrou a vzniklá směs se lisuje a vysuší (Hugues *et al.*, 2004). Vlákna jsou v celém průřezu desky rovnoměrně rozvrstvena, což má za následek homogenní strukturu sádrovláknitých desek (na rozdíl od dříve rozšířenějších sádrokartonových desek, kde je sádrové jádro pouze opláštěvání papírem). Doba konečného vytvrzení je výrazně kratší než u desek pojených cementem. Vyráběné desky mají hustotu kolem  $1\ 100\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , dobré mechanické vlastnosti, jsou nehořlavé, dají se velmi dobře obrábět a povrchově dokončovat foliováním a zejména stěrkovými omítkami.

Vzhledem k menší odolnosti proti působení vysoké vlhkosti jsou určeny zejména pro použití v interiéru, nejčastěji jako vnitřní plášť rámových dílů sendvičových dřevostaveb (Josten *et al.*, 2010).

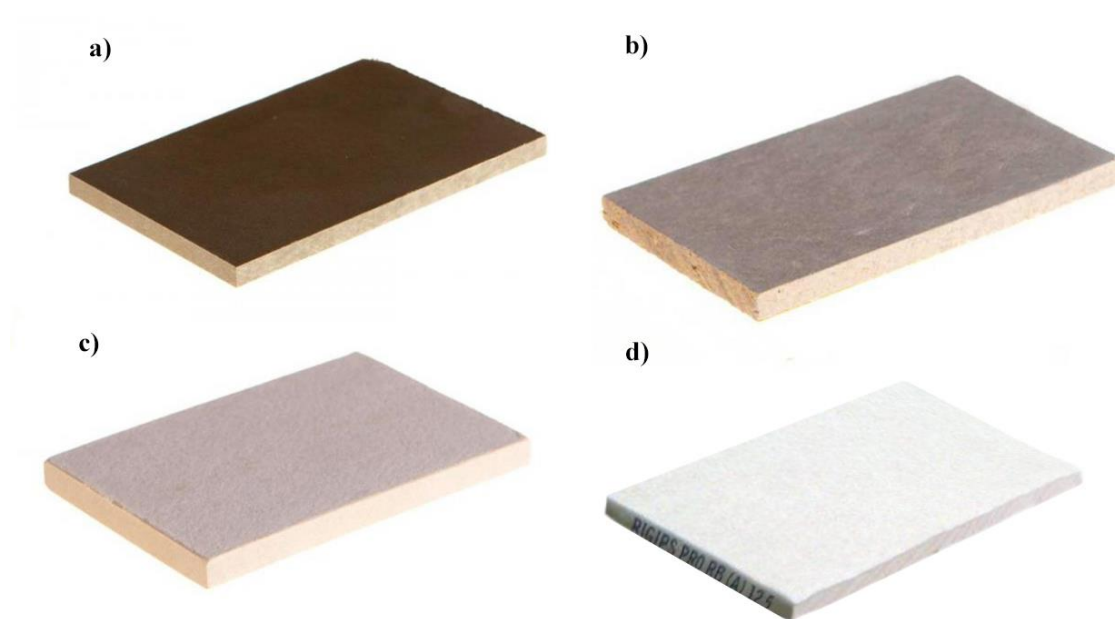
### **Sádrokartonové desky**

Základní surovinou na výrobu sádrokartonových desek (**obrázek 10d**) je sádrovec a papír. Ze sádrovce se po kalcinaci (zahřívání jemně mleté horniny) smícháním s vodní párou vytvoří sádra. Ta se ochladí a smíchá s dalšími surovinami. Pro výrobu se používají speciální papíry s vysokou pevností (pevnost papíru určuje z cca 80-90 % pevnost sádrokartonové desky). Těsně před zformováním desky se na papír tiskne označení typu desky a čas výroby (Nyč, 2005).

Na spodní vrstvu papíru je pomocí mixéru nanášena mokrá kašovité směs. Po rozprostření směsi po papíru je nanášena horní vrstva papíru. Připravený sendvič zarovnává dvojice válců do požadované tloušťky. Připravený sendvič se suší ve velké sušicí komoře. Po vysušení se sendvič stane tuhý a dostatečně silný pro použití jako stavební materiál. Vyrobené desky mají hustotu kolem  $750\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , dobré mechanické vlastnosti, jsou nehořlavé a zajišťují regulaci vlhkosti v místnostech.

Tyto desky lze používat na konstrukce podlah, pro půdní nástavby a vestavby, podhledy, pro konstrukce příček a stěn (Hugues *et al.*, 2004). Existuje několik typů desek

podle navrhovaného prostředí: stavební deska, protipožární deska, impregnovaná deska (Nyč, 2005).



**Obrázek 10:** Materiály na bázi dřeva pojené minerálními pojivy: (a) cementovláknitá deska, (b) cementotřísková deska, (c) sádrovláknitá deska, (d) sádrokartonová deska (Böhm *et al.*, 2012b)

### 3.1.3.2 Pojené organickými pojivy

#### **Desky z orientovaných plochých třísek (OSB)**

Velkoplošný materiál vyráběný z dlouhých, štíhlých a tenkých třísek (**obrázek 11a**). Třísky ve vnějších vrstvách jsou orientovány rovnoběžně s délkou nebo šířkou desky, třísky ve středové vrstvě jsou orientovány kolmo na třísky vnějších vrstev (Hugues *et al.*, 2004). V Evropě se nejčastěji zpracovávají jehličnany, převážně borovice a smrk. Skutečnost, že surovina nízké kvality může být použita pro výrobu vysoce kvalitního produktu, je pokládán za jednu z největších výhod OSB. Výroba třísek pro OSB desky probíhá tzv. tangenciálním řezem. Jednotlivé třísky jsou získávány ve směru rovnoběžném s vlákny dřeva (nejčastěji v prstencových nebo diskových roztřískovačích). Velikost typické třísky pro výrobu OSB má rozměry  $0,3-0,7 \times 15-25 \times 75-150$  mm. Nejdelší třísky, se používají pro povrchové vrstvy OSB, menší na středové vrstvy (Berge 1, 2015). Na lepení třísek se většinou používá kombinace melamin-formaldehydových (MF) lepidel na třísky pro povrchové vrstvy a izokyanátových (MDI) lepidel na třísky pro středovou vrstvu (Berge, 2009).

V některých provozech jsou na kontinuálních lisech vyráběny OSB lepené pouze MDI lepidly. Výhodou MDI lepidel je snížení lisovacího času, které vede ke snižování

nákladů, a jejich vysoká odolnost proti vlhkosti. Se stoupajícím obsahem lepidla se zlepšují mechanické vlastnosti, ale protože lepidlo (zejména s vysokou odolností proti vlhkosti) je nejdražší složkou při výrobě desek, zvyšuje se také jejich cena. Lepidla používaná pro výrobu OSB uvolňují jen velmi málo (nebo v případě MDI lepidel žádné) emise formaldehydu.

Na mechanické a fyzikální vlastnosti OSB mají výrazný vliv téměř všechny výrobní faktory. Mezi nejpodstatnější se obvykle uvádí: druh dřeviny, geometrie a kvalita třísek, orientace a formování třísek, obsah vlhkosti, typ a množství použitého lepidla a přídavných látek a dále potom lisovací parametry, které vzájemnou interakcí v průběhu lisování třískového koberce usměrňují zejména tvorbu hustotního profilu charakterizující rozložení hustoty v deskách. Důležité jsou i další faktory, jako např. poměr třísek středové vrstvy k povrchovým vrstvám, stupeň komprese, adhezní síly pojiva atd. (Böhm *et al.*, 2012a).

Největší uplatnění ve stavebnictví je jako konstrukční materiál na opláštění stěn, záklopy střech a podlah u dřevostaveb a výroba tzv. I-nosníků a sendvičových panelů. OSB desky se rozdělují podle použitého lepidla do čtyř skupin: OSB 1 - desky pro všeobecné účely a pro použití v interiéru v suchém prostředí, OSB 2 - desky pro nosné účely pro použití v suchém prostředí, OSB 3 - desky pro nosné účely pro použití ve vlhkém prostředí, OSB 4 - zvlášť zatížitelné nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí (Hudec *et al.*, 2013).

### **Multifunkční desky (MFP)**

Jednovrstvý deskový materiál vyráběný z plochých netříděných třísek, které jsou rozvrstveny neuspořádaně a doplněny vyšším podílem jemných třísek (**obrázek 11b**). Tato struktura vyžaduje větší nános lepicí směsi (obvykle pouze na bázi močovino/melamin-formaldehydových lepidel) a zapříčiňuje vyšší hustotu (hmotnost) desek. Multifunkční desky (MFP), označované někdy mikroštepkové desky (GSB) mají podobné vlastnosti jako OSB, ale stejnou pevnost v obou směrech (nižší než OSB v hlavním směru) a hladký povrch. Způsobem použití odpovídají konstrukčním dřevotřískovým deskám P5. Používají se pro širokou škálu aplikací, nejčastěji jako konstrukční desky ve stavebnictví (např. na podlahy), ale i pro výrobu nábytku a obalů (Böhm *et al.*, 2012a).

## Překližky

Velkoplošný materiál vyráběný ze vzájemného slepení 3 nebo více tenkých velkoplošných listů dřeva (dýh) (**obrázek 11c**). Počet vrstev bývá lichý, aby byla zajištěna konstrukční vyváženost (osová souměrnost), přičemž směry vláken sousedních vrstev jsou zpravidla na sebe kolmé (Herzog *et al.*, 2004). Pro výrobu překližek se obvykle používají měkčí dřeviny s nevýraznou kresbou a dřeviny méně ceněné. Z domácích dřevin se užívá SM, BO, TP, BK, BR, OL. Cennější dřeviny a nejkvalitnější sortimenty jsou používány pro výrobu krájených okrasných dýh. Hlavní předností překližek je odstranění anizotropního charakteru masivního dřeva, a z toho vyplývající zajištění dobré pevnosti ve všech směrech. Další předností tohoto materiálu je omezení pracování dřeva při změně vlhkosti prostředí. Překližky se běžně vyrábějí od 2 do 40 mm tloušťky. Použitím vhodného lepidla je možno zajistit vysokou odolnost lepených spojů, kterou je možno ještě zvýšit povrchovými nátěry, nebo nalisováním (laminováním) papírové folie s voděvzdornou pryskyřicí. Tyto překližky se používají jako bednicí materiál při betonáži ve stavebnictví. Nevýhodami u překližek jsou potřeba kvalitní vstupní suroviny, poměrně pracná výroba a z toho plynoucí vyšší cena. Při loupání může u některých tvrdých dřevin docházet vlivem nutného příčného ohýbání listu dýhy v loupacím stroji ke vzniku drobných trhlin, které se mohou projevit popraskáním nátěru až po konstrukci hotového výrobku. Na lepení se používají syntetická termoreaktivní lepidla (močovinoformaldehydová - UF a fenolformaldehydová - PF), která mají výrazně vyšší odolnost proti působení vlhkosti. Tato lepidla umožnila díky termoreaktivitě zkrácení lisovacího cyklu. Překližky lepené PF a případně melaminformaldehydovým (MUF) lepidlem mají vysokou odolnost proti působení vlhkosti a umožnily používání překližek s foliovaným nebo nefoliovaným povrchem ve vlhkém a vnějším prostředí, především ve stavebnictví a na obaly.

Stavební překližky mohou být také používány pro stavební dílce, např. pro součásti střešních vazníků. Překližky s protiskluzovou úpravou povrchu se využívají na lešenové podlahy ve stavebnictví a na ložné plochy nákladních automobilů. Truhlářské překližky jsou určeny k použití v interiéru, nejčastěji na dílce nábytku a obklady stěn a stropů (Böhm *et al.*, 2012a).



### **Biodesky (třívrstvé desky z rostlého dřeva, SWP)**

Velkoplošný materiál z rostlého dřeva vyrobený obvykle ze tří vzájemně na sebe lepených vrstev (**obrázek 11d**). Vnější vrstvy jsou složeny z průběžných lamel lepených po délce. Středová vrstva je lepena z lamel, které jsou na sebe průběžně podélně napojeny. Po přebroušení jsou všechny tři vrstvy slepeny v jeden celek tak, že středová vrstva je lepena příčně pod úhlem 90° oproti vrchním vrstvám. Středová vrstva je nejčastěji lepena PVAC lepidlem. Plošné lisování všech tří vrstev se provádí na vyhřívaném lisu při použití termoreaktivního močovino-formaldehydového lepidla (Böhm *et al.*, 2012a). Desky z rostlého dřeva, někdy označované Solid Wood Panels (SWP) se vyrábějí pro nosné a nenosné účely. Z hlediska jejich použití je rozdělujeme na desky určené do suchého (SWP/1), vlhkého (SWP/2) nebo venkovního prostředí (SWP/3) (Blass & Sandhaas, 2013). Hlavní předností je odstranění anizotropního charakteru desky a větší tvarová stálost. Oproti aglomerovaným materiálům (např. dřevotříska) obsahují tyto desky výrazně méně lepidla. Na plochách a hranách desek je patrné, že se jedná o výrobek z masivního dřeva.

Nejčastější použití tohoto materiálu je ve stolařství a truhlářství (obvykle lepší kvalita A/B) například na stolové desky, kuchyňská dvířka, na celé výrobky jako jsou postele a skříňky, ale také pro obklady stěn a stropů, podlahy apod. Desky, které jsou lepeny vlhkuvzdorným melamin-formaldehydovým lepidlem, se vyrábějí pro použití pro stavebnictví (obvykle horší kvalita C), kde se používají pro nosné konstrukce šikmých střech, konstrukční prvky, nosníky, opláštění pro nadstavby, jako bednicí dílce apod. Všechny plochy těchto stavebních desek jsou opatřeny nátěry, které omezují navlhavost (Böhm *et al.*, 2012a).

### **Dřevovláknité desky se střední hustotou (MDF, DHF)**

Velkoplošný materiál vyráběný z dřevních vláken (**obrázek 11e**). Výroba probíhá suchým výrobním procesem. Dřevo bez kůry (většinou jehličnaté - smrk) je zpracováno na mezistupňový polotovar - štěpky, které jsou po hydrotermické úpravě následně rozvlákněny na drobné vláknité částice - vlákna. Vlákna jsou dále vrstvena a lisována za použití lepidla a přídatných chemických látek (Hugues *et al.*, 2004). Hustota desek zásadně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti jednotlivých druhů desek. Pro desky určené jen pro interiéry je používáno močovinoformaldehydové lepidlo. U desek určených do prostředí s vyšší vlhkostí (např. na vchodové dveře nebo na koupelňový

nábytek) se používá fenolformaldehydové nebo melaminformaldehydové lepidlo. Dřevovláknité desky se střední hustotou se vyrábějí v celé škále tvrdostí a tloušťek s rozdílnými úpravami povrchu. Výroba těchto desek částečně využívá poznatků získaných při výrobě celulózy a papíru. Polotvrdé dřevovláknité desky, obvykle označované jako MDF desky (Medium Density Fiberboard), mají hustotu od 400 do 900 kg/m<sup>3</sup>. Nejdůležitější vlastností MDF je homogenita v celém průřezu desky, která umožňuje čisté kvalitní opracování frézováním reliéfů do ploch desek a profilování boků desek. U tohoto typu desek je také pozitivně hodnocena poměrně vysoká hodnota pevnosti v tahu kolmo na plochu (rozlupčivosti).

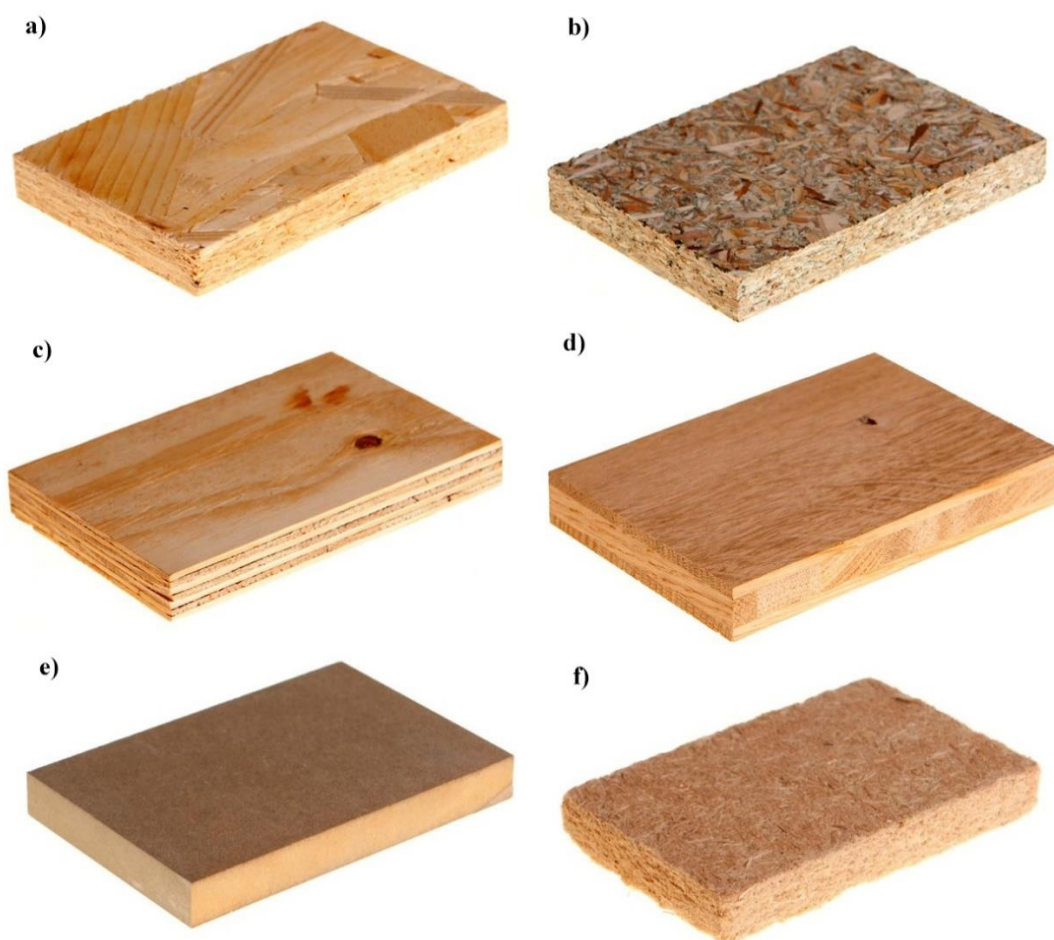
MDF desky jsou používány tam, kde nevyhovují běžné typy dřevotřískových desek, které jsou levnější, ale mají nehomogenní strukturu. Nejčastější použití tohoto materiálu je ve výrobě nábytku, kde bývají používány desky s hustotou okolo 650 kg/m<sup>3</sup>. Používají se na dílce s tvarově profilovanými boky nebo na dílce s reliéfovanými plochami. Velmi časté použití je také na kuchyňská dvířka a čela zásuvek. V laminovaném nebo dýhovaném provedení mohou být využívány pro výrobu stolních desek (Böhm *et al.*, 2012a).

Ve stavebnictví jsou dřevovláknité desky se střední hustotou většinou označovány jako DHF. Díky obsahu parafínu získává tento materiál také odolnost proti vlhkosti, současně při zachování difúzní propustnosti. Používá se v difúzně otevřených konstrukcích pro vnější opláštění nosné dřevěné části (Hudec *et al.*, 2013).

### **Měkké dřevovláknité desky**

Velkoplošný materiál vyrobený z lignocelulózových vláken za použití tepla a/nebo tlaku (**obrázek 11f**). Výroba probíhá mokrým výrobním procesem s přídavkem lepidla a hydrofobizačních přísad (obvykle parafínu). Po rozvláknění štěpek a přidání lepicí směsi se vláknitá suspenze formuje na podložní síto, kde dochází k postupnému odvodňování, lisování a vytvrzování desek. Lisování tohoto typu desek probíhá jen velmi nízkým tlakem většinou pomocí válcových lisů. V posledním desetiletí se jejich výroba opět rozšířila, je oceňován především jejich přírodní charakter a také to, že působí jako difúzně otevřený izolační materiál (umožňují přístup vlhkosti). Jako měkké bývají označovány vláknité desky, jejichž hustota je nižší než 400 kg.m<sup>-3</sup>. V současné době jsou nejčastěji vyráběny s hmotností kolem 250 kg.m<sup>-3</sup>. Hlavními přednostmi těchto desek je odstranění anizotropního charakteru dřeva, dobré zvukově a tepelně izolační vlastnosti, biologická nezávadnost a jednoduché zpracování.

Desky jsou dodávány v normalizovaných formátech s rovnou hranou nebo úpravou hran na pero a drážku (Böhm *et al.*, 2012a). Nejčastěji bývají měkké dřevovláknité desky používány jako výplňový nebo izolační materiál připevněný k nosné konstrukci. V současné době je na trhu nabízeno několik typů měkkých dřevovláknitých desek v tloušťkách od 40 mm až do 240 mm. Měkké vláknité desky jsou používány zejména jako tepelná a zvuková izolace, např. při novém i dodatečném zateplení vnějších stěn a podkrovních prostorů, podhledů a stropů, při stavbě příček a dále jako podklad různých druhů podlah a izolace kročejového hluku (Chybík, 2009).



**Obrázek 11:** Materiály na bázi dřeva pojené organickými pojivky: (a) deska z orientovaných plochých třísek (OSB), (b) multifunkční deska (MFP), (c) překližka, (d) biodeska (SWP), (e) dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF, DHF), (f) měkká dřevovláknitá deska (Böhm *et al.*, 2012b)

### 3.2 Teorie šíření tepla

Teplo je druh energie, která se šíří v libovolném prostředí, pokud v tomto prostředí jsou místa s rozdílnými teplotami. Vzhledem ke snaze o vyrovnání teplotního

stavu tělesa nebo prostoru dochází k šíření tepla od míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší (Kulhánek, 2006).

V závislosti na tom, v jakém prostředí se teplo šíří a podle jakých fyzikálních zákonů se toto šíření tepla uskutečňuje, rozeznáváme tři způsoby šíření tepla (ČSN 730540-1, 2005):

- vedení (kondukce)
- proudění (konvekce)
- sálání (radiace)

### 3.2.1 Vedení tepla

K šíření tepla vedením (kondukcí) dochází zejména v pevných látkách. Z hlediska stavební tepelné techniky se jedná o nejběžnější způsob šíření tepla, protože se uplatňuje prakticky u všech stavebních konstrukcí. Vedení tepla popisují základní fyzikální zákony, a to první a druhý Fourierův zákon. První Fourierův zákon definuje závislost tepelného toku na gradientu teploty, to znamená na teplotním spádu. Tento zákon vychází z předpokladu ustáleného (stacionárního) teplotního pole. To znamená stav, kdy rozložení teplot v tělese se s časem nemění. Dalším předpokladem je homogenita a izotropnost tělesa. Pro první Fourierův zákon platí vztah (Fourier, 1822):

$$q = -\text{grad } T = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

kde  $q$  hustota tepelného toku ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )  
 $\text{grad } T$  teplotní spád ( $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ )  
 $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

Záporné znaménko na pravé straně vztahu respektuje stav, kdy směr tepelného toku je protichůdný gradientu teploty, neboť teplo se šíří od míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Výše uvedená formulace prvního Fourierova zákona platí pro jednorozměrné teplotní pole a ustálený teplotní stav. Rovnice (1) platí i pro trojrozměrné teplotní pole a ustálený stav:

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Obecná formulace druhého Fourierova zákona popisuje vztah mezi časovou a místní změnou teploty, to znamená, že se týká neustáleného (časově proměnného) teplotního pole v trojrozměrném prostoru (Fourier, 1822):

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

kde	T	teplota (°C)
	t	čas (s)
	x, y, z	souřadné osy trojrozměrného prostoru
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	$\rho$	objemová hmotnost materiálu (kg.m <sup>-3</sup> )
	c	měrná tepelná kapacita (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ).

Současně lze II. Fourierův zákon upravit na I. Fourierův zákon odstraněním tepelné kapacity a časové závislosti změn teploty, viz. vztah (2). Součinitel teplotní vodivosti a (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>), který vyjadřuje rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty, se určí:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

kde	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	$\rho$	objemová hmotnost materiálu (kg.m <sup>-3</sup> )
	c	měrná tepelná kapacita (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ).

### 3.2.2 Proudění tepla

K šíření tepla prouděním (konvekci) dochází v kapalných a plynných látkách. Existují dva druhy proudění. Přirozené proudění vzniká přemísťováním částic různé hmotnosti při zahřátí látky a vynucené proudění, kde je proudění vyvoláno vnějšími vlivy - v technické praxi obvykle čerpadlem nebo ventilátorem (Svoboda & Novák, 2014). Tento děj podléhá řadě faktorů (vlastnosti tekutiny, geometrie prostoru konvekce a teplosměnné plochy, rychlost a teplota tekutiny, aj.). Tyto faktory jsou soustředěny do jediné konstanty, tzv. součinitele přestupu tepla v Newtonově zákoně ochlazování (Newton, 1785\*):

$$q_c = h_c \cdot (T_i - T_{si}) \quad (5)$$

kde	$q_c$	hustota tepelného toku při proudění ( $W.m^{-2}$ )
	$h_c$	součinitel přestupu tepla při proudění ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
	$T_i$	teplota vnitřního vzduchu ( $^{\circ}C$ )
	$T_{si}$	teplota vnitřního povrchu konstrukce ( $^{\circ}C$ ).

### 3.2.3 Sálání tepla

Šíření tepla sáláním (radiací) je v podstatě přenos elektromagnetického záření, zejména záření infračerveného. Toto záření vydává každé těleso o teplotě vyšší než 0 K. Takové těleso nejen záření vydává, ale částečně i pohlcuje, odráží a propouští. Rozdělení celkového sálavého toku dopadajícího na stavební konstrukci se skládá z těchto jednotlivých složek. Pro celkový sálavý tepelný tok dopadající na konstrukci platí vztah:

$$\varphi_S = \varphi_A + \varphi_R + \varphi_T \quad (6)$$

kde	$\varphi_S$	celkový sálavý tepelný tok dopadající na konstrukci (W)
	$\varphi_A$	část energie konstrukcí pohlcená (W)
	$\varphi_R$	část energie konstrukcí odražená (W)
	$\varphi_T$	část energie konstrukcí procházející (W).

Po jednoduché matematické úpravě

$$\frac{\varphi_A}{\varphi_S} + \frac{\varphi_R}{\varphi_S} + \frac{\varphi_T}{\varphi_S} = 1 \quad (7)$$

můžeme psát

$$A + R + T = 1 \quad (8)$$

kde	A	pohltivost záření
	R	odrazivost záření
	T	propustnost záření.

Ze vztahu 6 je patrné, že se ve všech případech jedná o bezrozměrné relativní veličiny, které nabývají teoreticky hodnoty mezi 0 a 1. V případě, že  $A = 1,0$  a  $R = T = 0$  je všechna dopadající sálavá energie pohlcena a jedná se o dokonale černé těleso. Dokonale černé těleso je pojem daný teoretickou fyzikou, v technické praxi se vždy jedná o tělesa „šedá“, jejichž pohltivost je nižší než  $A = 1,0$ . Pokud je  $R = 1,0$  a  $A = T = 0$ , jedná

se o dokonale odrazivé těleso neboli dokonalé zrcadlo. Při  $T = 1,0$  a  $A = R = 0$  se jedná o dokonale propustné těleso (Kulhánek, 2006).

Mezi základní zákony v oblasti sálání patří Stefan-Boltzmanův zákon, který popisuje hustotu sálavého tepelného toku ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) emitovaného (vyzářeného) povrchem tělesa (Svoboda & Novák, 2014):

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

kde	$\varepsilon$	emisivita povrchu tělesa (-)
	$\sigma$	Stefanova-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ )
	$T_s$	teplota povrchu pevné látky (K)
	$T_\infty$	teplota tekutiny (K).

### 3.3 Výpočtové metody stanovení tepelných vlastností

Národní normy ČSN 73 0540-1 až 4 tvoří rámec pro posuzování tepelné ochrany v České republice. Tyto normy stanovují jednotnou terminologii (část 1), jednotné požadavky (část 2), popisují, jaké mají být při prokazování splnění těchto požadavků uvažovány okrajové klimatické podmínky a materiálové vlastnosti (část 3) a jaké postupy mají být použity pro výpočty (část 4). Často se odkazují na Evropské normy např. ČSN EN ISO 6946 (2018): Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda.

#### 3.3.1 Stavební materiály

Ve stavební praxi se fyzikální vlastnosti stavebních materiálů obvykle stanovují přímým způsobem, to znamená z tabulek, které jsou přílohou tepelně technických norem. Výpočtové a charakteristické hodnoty základních stavebně fyzikálních parametrů stavebních materiálů jsou uvedeny ČSN 73 0540-3 (2005). Metodika, uvedená v této normě, umožňuje stanovení následujících materiálových charakteristik:

- objemová hmotnost
- součinitel tepelné vodivosti
- měrná tepelná kapacita

Tyto veličiny mohou být také vypočítány podle vztahů z normy ČSN 73 0540-1 (2005).

### 3.3.1.1 Objemová hmotnost

$\rho$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), hmotnost materiálu/výrobku v definovaném stavu, např. vlhkosti, stlačení, o objemu  $1 \text{ m}^3$ , je definována vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

kde  $m$  hmotnost materiálu/výrobku v definovaném stavu vlhkosti, stlačení apod. (kg)

$V$  objem materiálu/výrobku ( $\text{m}^3$ )

### 3.3.1.2 Součinitel tepelné vodivosti

$\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), schopnost materiálu, který je při dané střední teplotě (v případě navlhavých materiálů závisí též na jejich vlhkosti) schopen vést teplo; je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{\bar{q}}{-\text{grad } T} \quad (11)$$

kde  $q$  vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího materiálem ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )

$\text{grad } T$  gradient teploty ( $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ )

### 3.3.1.3 Měrná tepelná kapacita

$c$  ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), množství tepelné energie, kterou je třeba dodat při stálém tlaku, vzorku materiálu o definované vlhkosti, teplotě a hmotnosti  $1 \text{ kg}$ , aby se jeho teplota zvýšila o  $1 \text{ K}$ ; je definována vztahem:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (12)$$

kde  $Q$  tepelná energie (množství přivedeného tepla) (J)

$m$  hmotnost (kg)

$\Delta T$  přírůstek teploty (K)



### 3.3.2 Stavební konstrukce

#### 3.3.2.1 Tepelný odpor vrstvy (konstrukce)

$R$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ), tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu, popř. nestejnorodé vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky, je definován vztahem (ČSN EN ISO 6946, 2018):

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (13)$$

kde  $d$  tloušťka vrstvy; tloušťka vrstvy v konstrukci (m)  
 $\lambda$  návrhová tepelná vodivost materiálu, buď vypočítaná (analyticky nebo empiricky) podle ČSN EN ISO 10 456 (2009), nebo stanovena z tabulkových hodnot ČSN 73 0540-3 (2005), popřípadě lze tuto hodnotu také experimentálně naměřit (přímo nebo nepřímo) ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Obsahuje-li konstrukce vrstvy, v nichž se vyskytují pravidelně se opakující (systematické) tepelné mosty, je nutné jejich vliv zohlednit. Pro ruční výpočet je vhodné orientační zohlednění vlivu tepelných mostů s pomocí váženého průměru, kterým se vypočte součinitel tepelné vodivosti vrstvy s tepelnými mosty:

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum A_j \cdot \lambda_j}{\sum A_j} \quad (14)$$

kde  $A_j$  průřezová plocha  $j$ -tého materiálu v charakteristickém výseku ( $\text{m}^2$ )  
 $\lambda_j$  součinitel tepelné vodivosti  $j$ -tého materiálu v charakteristickém výseku ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

#### 3.3.2.2 Tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla

$R_t$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ), celkový tepelný odpor bránící výměně tepla mezi prostředím oddělenými od sebe stavební konstrukcí o tepelném odporu  $R$  s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, je definován vztahem:

$$R_t = R_{si} + R + R_{se} \quad (15)$$

kde  $R_{si}$  tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )

R tepelný odpor konstrukce ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )

$R_{se}$  tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ )

### 3.3.2.3 Tepelný odpor při přestupu tepla

Na povrchu konstrukce dochází k výměně tepla mezi konstrukcí a okolním prostředím. Tuto výměnu tepla nazýváme přestupem tepla a dochází k ní na vnějším i vnitřním povrchu konstrukce. Proto rozlišujeme součinitel přestupu tepla na vnitřním a vnějším povrchu. K přestupovým jevům dochází na základě proudění vzduchu na povrchu konstrukce a sálání mezi povrchem konstrukce a okolními tělesy. Vzhledem k malé hodnotě tepelnému toku (cca méně než  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) lze složku sálání zanedbat. Dle normy ČSN EN ISO 8990 (1998) je sálání zanedbáno, v případě že teplota vzduchu a střední sálavá teplota vzorkem jsou velmi blízké. Součinitel přestupu tepla stavební konstrukce, který zahrnuje dvě složky, a to součinitel přestupu tepla při proudění a součinitel přestupu tepla při sálání udává hustotu tepelného toku, přestupujícího ze vzduchu do konstrukce (nebo i v opačném směru) při jednotkovém rozdílu teplot (Svoboda & Novák, 2014).

Ze součinitelů přestupu tepla je možné vypočítat tepelné odpory při přestupu tepla. V případě definovaných okrajových podmínek jsou tepelné odpory při přestupu tepla vypočteny podle vztahů (16) a (17) (Kulhánek, 2006).

$$R_{si} = \frac{T_{ai} - T_{si}}{q} = \frac{1}{h_{si}} \quad (16)$$

kde  $R_{si}$  tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce  
 $q$  hustota tepelného toku ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $T_{ai}$  teplota vnitřního vzduchu ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{si}$  vnitřní povrchová teplota konstrukce ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $h_{si}$  součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$$R_{se} = \frac{T_{se} - T_{ae}}{q} = \frac{1}{h_{se}} \quad (17)$$

kde  $R_{se}$  tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce  
 $q$  hustota tepelného toku ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $T_{ae}$  teplota venkovního vzduchu ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{se}$  vnější/venkovní povrchová teplota konstrukce ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h_{si}$  součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

Tepelné odpory při přestupu tepla  $R_{si}$  a  $R_{se}$  se v technické praxi uvažují smluvními hodnotami uvedenými v **tabulce 9**. Tyto hodnoty platí pro rovinné povrchy (ČSN EN ISO 6949, 2018).

**Tabulka 9:** Tepelné odpory při přestupu tepla podle směru tepelného toku (ČSN EN ISO 6946, 2018)

Tepelný odpor při přestupu tepla ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )	Směr tepelného toku		
	nahoru	vodorovně	dolů
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04

#### 3.3.2.4 Součinitel prostupu tepla ( $U$ -hodnota)

$U_t$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ), celková výměna tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředím vzájemně oddělenými stavební konstrukcí o tepelném odporu  $R$  s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, zahrnuje vliv všech tepelných mostů včetně vlivu prostupujících hmoždinek a kotev, které jsou součástí konstrukce, je definován vztahem (ČSN 73 0540-4, 2005):

$$U_t = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{1}{R_t} \quad (18)$$

kde  $R_{si}$  tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )  
 $R$  tepelný odpor konstrukce ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )  
 $R_{se}$  tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )  
 $R_t$  tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )

#### 3.3.2.5 Okrajové podmínky

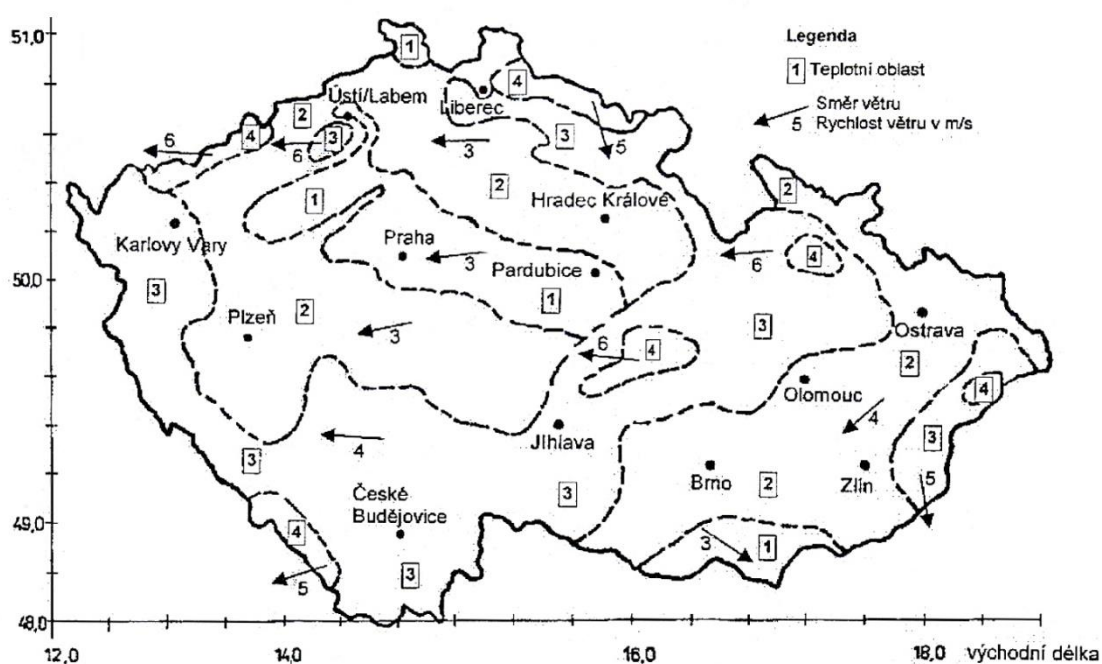
##### Návrhové hodnoty parametrů venkovního prostředí

Návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období se stanoví podle ČSN 73 0540-3 (2005). Hodnota je určena podle teplotní oblasti a nadmořské výšky (**tabulka 10**).

**Tabulka 10:** Teplotní oblasti České republiky v zimním období, jejich průměrná nadmořská výška, základní návrhová teplota venkovního vzduchu a teplotní gradient

Teplotní oblast	Průměrná nadmořská výška v teplotní oblasti m n.m.	Základní návrhová teplota venkovního vzduchu pro 100 m n.m. (°C)	Základní teplotní gradient nad 100 m n.m. (K)
1	240	- 12	- 0,5
2	320	- 14	- 0,3
3	540	- 16	- 0,2
4	820	- 18	- 0,2

Mapa jednotlivých teplotních oblastí je znázorněna na **obrázku 12**.



**Obrázek 12:** Teplotní oblasti v zimním období, směr a rychlost převládajících větrů (ČSN 73 0540-3, 2005)

Návrhová průměrná měsíční teplota venkovního vzduchu v ročním průběhu se stanoví podle **tabulky 11**.

**Tabulka 11:** Návrhové průměrné měsíční teploty venkovního vzduchu v ročním průběhu (ČSN 73 0540-3, 2005)

Nadmořská výška místa budovy h (m n.m.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Průměrná celoroční teplota (°C)
	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	
200	-1,7	0,1	4,2	9,3	14,3	17,5	19,0	18,6	14,5	9,5	4,1	0,1	9,1
300	-2,2	-0,4	3,6	9,1	13,4	17,0	18,0	17,9	13,8	8,9	3,5	-0,2	8,5
400	-2,5	-0,8	3,0	8,6	13,0	15,9	17,6	17,5	13,1	8,3	3,0	-0,5	8,0
500	-2,8	-1,3	2,6	7,2	12,7	15,1	17,4	17,1	12,5	8,0	2,3	-0,9	7,5
600	-3,3	-1,8	1,8	6,5	11,5	14,7	16,2	15,6	12,2	7,4	2,1	-1,4	6,8
700	-3,7	-2,3	1,2	5,8	10,8	14,0	15,5	15,0	11,7	7,0	1,6	-2,0	6,2
800	-3,9	-2,7	0,6	4,9	10,0	13,2	14,8	14,3	11,0	6,5	1,2	-2,4	5,6
900	-4,3	-3,2	-0,1	4,2	9,2	12,5	14,0	13,6	10,4	6,0	0,7	-2,9	5,0
1 000	-4,7	-3,8	-0,8	3,3	8,4	11,7	13,2	12,8	9,6	5,4	0,2	-3,4	4,3
1 100	-5,3	-4,4	-1,5	2,5	7,7	11,0	12,5	12,0	8,9	4,8	-0,4	-4,0	3,7
1 200	-5,9	-5,1	-2,2	1,7	6,9	10,3	11,7	11,3	8,2	4,2	-1,1	-4,6	3,0

Norma také uvádí teplotní oblasti v zimním období a zatížení větrem v krajině pro vybrané obce v České republice. Například pro Prahu s nadmořskou výškou 181 m n.m. v teplotní oblasti 1 je návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období -13 °C.

### Návrhové hodnoty parametrů vnitřního prostředí

Návrhová teplota vnitřního vzduchu v zimním období se stanoví podle druhu a účelu vnitřního prostoru v **tabulce 12** (ČSN 73 0540-3, 2005). Vzhledem k navlhavosti materiálů na bázi dřeva zde uvádím též návrhové hodnoty relativní vlhkosti vzduchu v interiéru.

**Tabulka 12:** Návrhová vnitřní teplota a relativní vlhkost vzduchu v zimním období u obytných, trvale užívaných budov (ČSN 73 0540-3, 2005)

Druh místnosti s požadovaným stavem vnitřního prostředí	Návrhová vnitřní teplota v zimním období (°C)	Relativní vlhkost vnitřního vzduchu (%)
Obývací místnosti (obývací pokoje, ložnice, jídelny, jídelny s kuchyňským koutem, pracovny, dětské pokoje, aj.)	20	50
Kuchyně	20	50
Koupelny	24	*
Klozety	20	50
Vytápěné vedlejší místnosti (předsíně, chodby, aj.)	15	50
Vytápěná schodiště	10	50

\* Relativní vlhkost vnitřního vzduchu se stanoví jako střední hodnota z celodenního časového snímku vnitřního prostředí daného vnitřního prostoru.

### 3.4 Experimentální metody stanovení tepelných vlastností

#### 3.4.1 Stavební materiály

Pro experimentální testování homogenních materiálů existuje několik metod, například: metoda chráněné topné desky a měřidel tepelného toku (guarded hot plate and heat flow meter methods), přechodný horký most (transient hot-bridge), fototermální metody (photo-thermal methods) a metoda nestacionárního tepelného zdroje - horký disk (hot-disc) (Lagüela *et al.*, 2015). Nejčastěji je však používána standardizovaná metoda topné desky („hot plate“) podle ISO 8302 (1991).

Tyto metody jsou především založeny na stanovení součinitele tepelné vodivosti. Pro měření specifické tepelné kapacity tepelně-izolačního materiálu se využívají adiabatické, reakční a diferenciální skenovací kalorimetry. Diferenciální skenovací kalorimetrie je od nedávna používána pro měření komplexní anatomické struktury dřeva (Miki *et al.*, 2012).

Existují také další absolutní a relativní metody měření tepelné vodivosti, jak je popsáno například v Zhao *et al.* (2016) či kvazistacionární metoda (Hrčka & Babiak, 2017). Účinnost izolačních materiálů obecně závisí na hustotě, teplotě, obsahu vlhkosti a vnitřní struktuře (Franco, 2007). Pro měření tepelné vodivosti všech typů izolací v různých podmínkách neexistuje jediná dokonalá technika. Spolehlivost konkrétní metody závisí na různých faktorech, jako je požadovaná přesnost, rychlost měření a provedení za různých podmínek prostředí, fyzikální vlastnosti zkoumaného materiálu, velikost a tvar dostupného vzorku. Z tohoto důvodu je velmi důležité zdokonalení

stávajících a vývoj nových experimentálních metod měření za různých podmínek prostředí (Anis-ur-Rehman *et al.*, 2002).

### 3.4.2 Stavební konstrukce

U složitějších heterogenních konstrukcí složených z více materiálů je tepelné chování obvykle testováno metodou teplé skříně (anglicky „hot box“, **obrázek 13**) podle ČSN EN ISO 8990 (1998). Zařízení teplé skříně se skládá ze studené a teplé komory, které jsou oddělené testovaným vzorkem - například panel na bázi dřeva s tepelnou izolací ze zemědělského odpadu. Z důvodu rozdílných teplot v obou komorách se měří tepelný tok skrze vzorek, z něhož se stanoví součinitel prostupu tepla resp. tepelný odpor konstrukce (Buratti *et al.*, 2016a; Asdrubali & Baldinelli, 2011; ČSN EN ISO 8990, 1998). V závislosti na strukturální složitosti a materiálové heterogenitě testovaných prvků je třeba ve výpočtech zohlednit tepelné mosty způsobené spárami, popř. nosnou konstrukcí (Capozzoli *et al.*, 2013; Capozzoli *et al.*, 2015).

Výsledky zveřejněné (Buratti *et al.*, 2016b) ukazují různé hodnoty stejných vzorků ze sedmi materiálů měřených různými metodami. Materiály jako pěnový polyuretan, polystyrol a polystyren byly měřeny s vyššími hodnotami tepelné vodivosti než výrobcem. Rozdíl je také významný mezi metodami teplé skříně a měřidel tepelného toku. Polyuretanová pěna s deklarovanou tepelnou vodivostí  $0,0245 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  byla měřena metodou teplé skříně s výsledkem  $0,0379 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a metodou měřidla tepelného toku  $0,0254 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Rozdíl mezi oběma metodami byl asi 50%. Tento rozdíl je pravděpodobně vzhledem k vnitřním rozměrům skříně zapříčiněn zanedbáním sálání. Přímé metody tak měří zpravidla pouze vedení tepla. Teplá skříň měří současně vedení a proudění. To je sice blíže realitě, ale nelze takto porovnávat materiálové vlastnosti dílčích tepelných toků (vedení, proudění a sálání), protože je tato metoda agreguje.

Všechny tyto syntetické materiály byly v této studii měřeny s horšími výsledky tepelné vodivosti. Přesto u dřeva a sádrokartonových desek byla naměřena nižší hodnota tepelné vodivosti okolo  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Důležitá je otázka, zda tyto metody poskytují dostatečně reprezentativní a srovnávací hodnoty.



**Obrázek 13:** Experimentální zařízení teplé skříně; mezi chladnou komorou (vlevo) a teplou komorou (vpravo) je umístěn testovaný vzorek (Asdrubali & Baldinelli, 2011)

Při zohlednění skutečného tepelného zatížení obálek budov lze předpokládat, že metoda teplé skříně je vhodnější pro simulaci skutečného chování stěn a střech v reálných klimatických podmínkách. Tyto části pláště jsou vždy v přímém kontaktu se vzduchem z venkovního a vnitřního prostoru, jaký je v zařízení teplé skříně (ČSN EN ISO 8990, 1998). V opačném případě je metoda topné desky založena na přímém kontaktu a přenosu tepla mezi topnou deskou a povrchem vzorku (ISO 8302, 1991). Zařízení s teplou skříní rovněž poskytuje dobrou schopnost testovat celé stavební systémy ve stejné míře jako v reálných podmínkách (Mumaw, 1974).

#### 3.4.2.1 Metoda teplé skříně

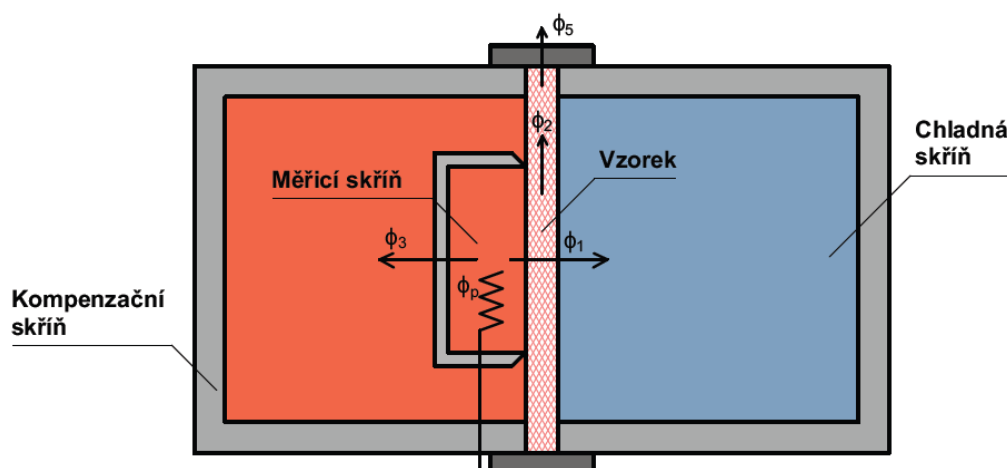
Existují dva typy zkušebního zařízení. Metoda chráněné teplé skříně a metoda kalibrované teplé skříně mají napodobovat okrajové podmínky (při stálé teplotě) na vzorku mezi dvěma prostředími, kterým je obvykle atmosférický vzduch. Vzorek je umístěn mezi teplou a chladnou komorou, ve kterých jsou známé teploty prostředí. Měření probíhá při ustálené teplotě vzduchu, povrchových teplotách a celkovém vstupním tepelném výkonu v měřicí skříně. Z těchto měření jsou vypočteny tepelně-technické vlastnosti vzorku (součinitel prostupu tepla a tepelný odpor) (ČSN EN ISO 8990, 1998; ČSN EN 1946-4, 2001; ASTM C1363-97, 1997).



## Chráněna teplá skříň

U zkušebního zařízení s chráněnou teplou skříní je měřicí skříň umístěna v kompenzační skříní. V kompenzační skříní je prostředí řízeno tak, aby byl minimalizován boční tepelný tok vzorkem  $\phi_2$  a ztrátový tepelný tok stěnami měřicí skříně  $\phi_3$ . V ideálním případě, kdy je stejnorodý vzorek instalován ve zkušebním zařízení a když jsou teploty prostředí na obou stranách zkušební vzorku ustálené a rovnoměrné. Potom stejné teploty prostředí uvnitř a vně měřicí skříně způsobují stejnou teplotu povrchu vzorku a naopak. Celkový tepelný tok vzorkem v měrné ploše měřicí skříně bude potom roven tepelnému toku vstupujícímu do měřicí skříně (ČSN EN ISO 8990, 1998).

Princip měření metodou chráněné teplé skříně je na **obrázku 14**. Měřicí skříň je umístěna v kompenzačním prostoru, ve kterém se dosahuje takových teplotních podmínek, aby tepelný tok z chráněné skříně do kompenzačního prostoru  $\phi_3$  a tepelný tok v podélném směru vzorkem  $\phi_2$  byl minimální. Optimálně  $\phi_3 = \phi_2 = 0$ .

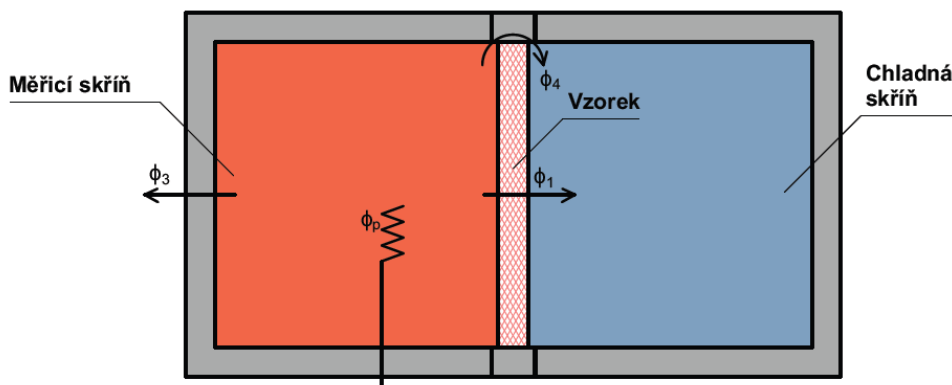


**Obrázek 14:** Zkušební zařízení s chráněnou teplou skříní (vypracoval autor podle ČSN EN ISO 8990, 1998)

## Kalibrovaná teplá skříň

U zkušebního zařízení s kalibrovanou teplou skříní je měřicí skříň obklopena prostředím s řízenou teplotou, která nemusí být nutně stejná, jako je teplota v měřicí skříní. Ztrátový tepelný tok stěnami skříně  $\phi_3$  je minimální v důsledku použití konstrukce skříně s vysokým tepelným odporem. Celkový vstupní tepelný výkon  $\phi_p$ , musí být opraven o ztráty stěnami měřicí skříně  $\phi_3$  a okrajové ztráty vzorku  $\phi_4$ . Opravy na tepelné ztráty stěnami měřicí skříně a okrajové ztráty se stanoví ze zkoušek na kalibračních vzorcích o známém tepelném odporu. Pro kalibraci okrajových ztrát by měly kalibrační vzorky

zahrnovat tloušťky a tepelné odpory v rozsahu jako u vzorků, na kterých se mají zkoušky provádět a teplotu v rozsahu zamýšleném při zkouškách na vzorcích (ČSN EN ISO 8990, 1998). Pro tento způsob měření v kalorimetrické komoře je aplikace uvedena na **obrázku 15**.



**Obrázek 15:** Zkušební zařízení s kalibrovanou teplotou skříní (vypracoval autor podle ČSN EN ISO 8990, 1998)

### Požadavky a postup zkoušky

Principy návrhu zkušebního zařízení a základní požadavky, které musí být splněny, pro laboratorní stanovení vlastností prostupu tepla části staveb jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 8990, 1998. Zkušenosti ukazují, že při zkouškách na stejnorodých vzorcích provedených podle této normy, může být všeobecně dosažena přesnost  $\pm 5\%$ .

Cílem zkoušky je změřit celkové množství tepla procházejícího z jedné strany vzorku na druhou stranu pro daný rozdíl teplot, nezávisle na jednotlivých způsobech sdílení (kombinace vedení, sálání a proudění), výsledky pak mohou být použity v situacích, kdy je tato vlastnost požadována. Měření probíhá při ustálené teplotě vzduchu, nekonstantních povrchových teplotách a celkovém vstupním tepelném výkonu v měřicí skříní. Z měření se vypočítají tepelně technické vlastnosti vzorku.

Na konstrukci stěn zkušebního zařízení se doporučuje použít sendvičovou konstrukci s tepelnou izolací z pěnových plastů. Celá teplá skříň a obvodové těsnění musí tvořit vzduchotěsný a parotěsný celek. V teplé komoře je umístěn topný zdroj. Nejvhodnější je použít topná elektrická odporová tělesa. Stěny chladné komory zkonstruovat tak, aby zde nezkondenzovala vodní pára a aby snižovaly výkon chladícího zařízení. Pro simulaci přirozených podmínek u stavebních prvků vyhovuje rozsah rychlosti proudění vzduchu v chladné komoře v rozhraní  $0,1-10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Minimální rozměr měrné plochy vzorku je dán větší hodnotou z trojnásobku tloušťky zkušebního vzorku nebo rozměru 1 x 1 m. Minimální rozměr zkušebního zařízení je 1,5 x 1,5 m. Vlhkost vzorku je nutné zaznamenat před a po provedení zkoušky. Vzorek musí být usazen a utěsněn tak, aby byl vyloučen průnik vzduchu a vlhkosti do vzorku. Využívá se těsnění a vzduchotěsných pásek.

Zkušební podmínky musí být nastaveny tak, aby rozdíl teplot prostředí (mezi teplou a chladnou stranou vzorku) byl alespoň 20°C. Interval měření závisí na tepelném odporu a tepelné kapacitě vzorku, součinitelích přestupu tepla, přítomnosti přenosu vlhkosti nebo změně rozložení vlhkosti ve vzorku. V důsledku rozličnosti těchto činitelů, není možno uvést jednoduché kritérium pro ustálený stav. Příklad požadavku pro ustálený stav: výsledky měření tepelného odporu a součinitele prostupu tepla, tepelného toku a teplot ze dvou úspěšných po sobě jdoucích měření provedených v intervalu alespoň 3 hodiny po dosažení téměř stabilních podmínek, se nesmí lišit o více než 1% a nesmí se měnit jedním směrem. Pro vzorky s vysokým tepelným odporem nebo s velkou hmotností nebo s obojím, mohou být tyto minimální požadavky nedostatečné a interval měření musí být prodloužen.

Měření teplot vzduchu a povrchových teplot vzorku se provádí pomocí čidel. Čidla měření teploty vzduchu a povrchové teploty vzorku by měla být rovnoměrně rozmístěna na površích vzorku a umístěna proti sobě na teplé a chladné straně. Počet čidel měření teploty vzduchu a povrchové teploty musí být takový, aby připadla alespoň 2 čidla na 1 m<sup>2</sup> povrchu vzorku s tím, že minimální počet čidel na povrchu je 9. Kolísání teplot během testu je dovoleno v rozsahu 1%.

### **3.5 Tepelné vlastnosti materiálů na izolační účely**

#### **3.5.1 Přehled současných tepelně izolačních materiálů**

Většina energie vyráběné moderní západní společností, mimo spotřebu energie v dopravě, se spotřebovává do systémů vytápění budov (téměř 1/2 a 1/3 příspěvku k emisím CO<sub>2</sub>, Asdrubali *et al.*, 2015). Celková spotřeba energie budovy se nevztahuje jen k jejímu provozu, ale je třeba vzít v potaz energii obsaženou ve stavebních materiálech během jejich procesu výroby, instalace a likvidace po skončení životnosti. V případě tepelně-izolačních materiálů existují dvě možnosti úspor energie, a to funkční (energetická úspora z důvodu tepelné účinnosti izolace) a ztělesněná (energetická spotřeba při výrobě, instalaci a likvidaci takové izolace).

Materiál využívaný jako tepelná izolace musí splňovat parametry: nízká hustota, vysoká specifická kapacita a nízká tepelná vodivost. Charakteristika tepelně-izolačního materiálu podle ČSN 730540-1 (2005): „Materiál výrazně omezující šíření tepla, vykazující charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti max.  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při referenčních teplotních a vlhkostních podmínkách a daném stáří“.

Nejčastěji používané izolační materiály mají tepelnou vodivost mezi 0,03 a 0,05  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Berardi & Naldi, 2017). Pregizer (2009) v **tabulce 13** uvádí, jaká tloušťka tepelné izolace je zapotřebí k dosažení požadovaného součinitele prostupu tepla.

**Tabulka 13:** Požadovaná tloušťka tepelné izolace stavebních konstrukcí v závislosti na hodnotě tepelné vodivosti izolačního materiálu (bez ohledu na nosnou konstrukci) (Pregizer, 2009)

Požadovaný součinitel prostupu tepla $U \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$	Návrhová hodnota tepelné vodivosti $\lambda \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$			
	0,025	0,030	0,035	0,040
$0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	16 cm	19 cm	23 cm	26 cm
$0,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	24 cm	29 cm	34 cm	38 cm

Cihlár & Hazucha (2013) uvádí v **tabulce 14** přehled v současné době nejpoužívanějších izolačních materiálů. Pro porovnání ekologické stopy materiálů je v posledním sloupci tabulky uvedena i hodnota svázané primární energie (PEI), tzv. „šedá energie“. Jedná se o množství spotřebované primární energie vynaložené k získání suroviny, výrobě a dopravě materiálů v  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $1 \text{ MJ} = \text{cca } 0,27 \text{ kWh}$ ). Je to jedním z faktorů ekologického hodnocení materiálu, které stále víc nabývá na důležitosti.

**Tabulka 14:** Fyzikální vlastnosti nejpoužívanějších tepelně - izolačních materiálů (Cihlář & Hazucha, 2013; Šípková *et al.*, 2014)

yp izolace	objemová hmotnost $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	měrná tepelná kapacita c (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	faktor difúzního odporu $\mu_n$ (-)	součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )*	svázaná primární energie (PEI) (MJ.kg <sup>-1</sup> )
expandovaný polystyren EPS	30 - 60	1 270	40 - 100	0,031 - 0,040	98,5
extrudovaný polystyren XPS	30	2 060	100 - 200	0,029 – 0,038	104
minerální vlna	50 - 150	800	1 - 3	0,030 – 0,042	23,3
pěnový polyuretan PUR - deska	30 - 40	1400 – 1 500	180 - 200	0,024 – 0,028	49,8
pěnové sklo - deska	120 - 190	850 – 1 000	70 000	0,040 – 0,050	15,7
pěnové sklo - štěrky	150 - 180	850	1	0,075 – 0,090	6,7
vakuová izolace	170 - 210	-	> 100 000	0,008	62,1
celulóza	30 - 90	2 000 – 2 100	1 - 2	0,037 - 0,042	7,0
dřevovláknitá deska - měkká, tepelný kolmo na vlákna	50 - 240	2 100	5 - 10	0,038 - 0,046	13,7
deska na bázi konopí, tepelný kolmo na vlákna	30 - 40	2 100	1 - 4	0,040	31,1
sláma – balíky **	90	2 000	10 - 15	0,050 - 0,080	3,2

\*) uvedené hodnoty jsou deklarované

\*\*) rozsah naměřených hodnot ve směru vláken kolmo na tepelný tok a rovnoběžně s tepelným tokem

V současné době byl zaznamenán výrazný růst poptávky po obnovitelných (přírodních) izolačních materiálech. Jejich poměrně vyšší cena oproti syntetickým je dána zejména zpracováním v menších množstvích a nutností dovozu. Výjimkou je zejména sláma, která je všeobecně nejlevnějším materiálem na izolaci a také celulóza, která je konkurence schopná syntetickým materiálům. Výhodami těchto materiálů na přírodní bázi je nízká zátěž životního prostředí (Márton, 2014).

### 3.5.2 Potenciální využití zemědělského odpadu na izolační účely

V posledních patnácti letech je možné pozorovat stále se zvyšující zájem o obnovitelné (ekologické) materiály, služby a technologie. To potvrzuje i nárůst publikovaných článků od r. 2003 v různých vědeckých časopisech na toto téma (Liu *et al.*, 2017). Je to způsobeno jednak vyčerpatelností fosilních paliv (ropa, zemní plyn a uhlí), a také z důvodu odpovědnosti za životní prostředí dle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/35/ES či informovanosti o klimatických změnách.

Bylo provedeno množství výzkumů se zaměřením na nahrazení fosilních paliv udržitelnými, aby se uhlíková stopa a dopad na životní prostředí minimalizovaly. Tyto chemické látky, a také jejich odvozené materiály, jsou často získávány biologicky z průmyslových plodin a produktů. Například byla zkoumána tvorba elektřiny z hydrolyzátu pšeničné slámy a mikrobiální ekologie mikrobiálních komunit produkujících elektřinu v dvoukomorových mikrobních palivových článcích (Zhang *et al.*, 2009; Thygesen *et al.*, 2011), výroba metanu a etanolu ze substrátu pšeničné slámy k výrobě elektřiny a tepla (Bauer *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2013), a konečně zpevňování termoplastických kompozitů rostlinnými vlákny z bagasy, kukuřice a pšeničné slámy (Sain & Panthapulakkal, 2006; Panthapulakkal *et al.*, 2006; Castro-Aguirre *et al.*, 2016).

Z výzkumů poslední doby je patrný rostoucí zájem o biologicky založené materiály, což ukazuje i stále rostoucí podíl pěstovaných průmyslových plodin. Z důvodu zavádění udržitelného rozvoje a technologií v odborné praxi z obdělávání průmyslových plodin vzniká velké množství zemědělského odpadu. Snahou směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/EC je snížení závislosti na ropě v hospodářství EU. To znamená, že do roku 2020 bude mít každá země EU 1/10 přepravního paliva z obnovitelných zdrojů, z toho plyne větší využívání průmyslových plodin do budoucna. V současné době je nejvýznamnějším obilným produktem v Evropě pšenice setá (*Triticum aestivum*), což je jedno nebo dvouletá rostlina, která dosahuje výšky 50-130 cm. Pšeničná sláma obsahuje 35-45 % celulózy, 20-30 % hemicelulózy a 8-15 % ligninu, jako hlavní chemické složky (Saha *et al.*, 2005). Objemová hmotnost při obsahu vlhkosti 10 % je okolo 269 kg.m<sup>-3</sup> a hustota vláken je 1585 kg.m<sup>-3</sup> (Adapa *et al.*, 2009).

Hlavním produktem pšenice seté jsou škrobová zrna využívaná jako potravina, vedlejší produkty - plevy a sláma jsou považovány za zemědělský odpad. Roční celosvětová sklizeň pšenice je asi 755 milionů tun, což představuje asi 29,4 % celkové produkce osiva obilí (USDA, 2018). Celková sklizeň pšenice v Evropské unii činí 134,5

milionů tun, což představuje asi 44,7 % celkové produkce osiva obilí v EU (Eurostat, 2017). Podíl plev v pšeničné slámě může být až 20 % (McCartney *et al.*, 2006), z toho lze vyvodit, že je v Evropské unii ročně vyprodukováno přibližně 30 milionů tun pšeničných plev, což hmotnostně představuje 1,5 násobek dřeva potřebného pro výrobu dřevotřískových desek v Evropské unii (Pretzsch, 2009).

Dalším důsledkem zavádění udržitelného rozvoje a technologií v odborné praxi vzniká značné množství zemědělského odpadu z obdělávání průmyslových plodin, zejména rostlin z olejnatých semen, které jsou surovinami pro syntézu biologické nafty (Azadi *et al.*, 2017). Dnes je nevýznamnější rostlinou pěstovanou pro olejnatá semena v Evropě řepka olejka (*Brassica napus*), což je roční rostlina, která dosahuje až jednoho metru výšky. Stonek se skládá z vláken o délce 0,7-2 mm a šířce 9-20  $\mu\text{m}$ , obsahujících 40-50 % celulózy (Kürschner - Hofferová metoda), 25-30 % hemicelulózy a 17-21 % ligninu jako hlavní chemické složky (Tofanica *et al.*, 2011). Objemová hmotnost při obsahu vlhkosti 10 % je okolo 273  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a hustota vláken je 1550  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Adapa *et al.*, 2009). Roční celosvětová sklizeň řepky je asi 12,6 milionů tun, což představuje asi 14 % celkové produkce osiva obilí (Carré & Pouzet, 2014). Celková plocha pěstování řepky v Evropské unii činí 6,6 milionu hektarů, což je přibližně polovina celkové plochy produkce olejnatých semen v EU (USDA, 2017). Dalším potenciálně použitelným biologickým odpadem z dřevozpracujícího průmyslu je dřevní štěpka (Binici & Aksogan, 2016). Roční celosvětová produkce dřevní štěpky představuje 66,9 milionů tun (FAO, 2018).

Z předchozích odstavců vyplývá důležité zamyšlení, jak bude takové značné množství zemědělského odpadu vhodně použité zejména v rámci zachování udržitelnosti. Dosud hlavními oblastmi použití zemědělského odpadu z obilovin jsou krmivo pro zvířata, půdní hnojiva, pelety a brikety, které slouží ke spalování pro výrobu tepelné energie. V porovnání se dřevem jsou však zbytky z obilovin hůře peletovány, což je způsobeno menším obsahem ligninu a vyšším obsahem extraktivních látek (Whittaker & Shield, 2017) a také mají obvykle menší hustotu v závislosti na velikosti částic, což souvisí i s výhřevností (Harun & Afzal, 2016). Část zemědělců spaluje strniště po sklizni z důvodu nedostatečné ekonomické hodnoty pšeničných stonků. Tento jev má za následek ztrátu národního bohatství a kromě znečištění atmosféry ničí mikroflóru půdy. Uvolňování kouře a oxidu uhličitého do atmosféry způsobuje tvorbu skleníkových plynů a globálního oteplování (Binici *et al.*, 2013). Plodná půda každý rok vytváří velké množství odpadu - sláma (až 6 t / ha a vyšší), která se běžně používá jako hnojivo. Její mineralizace a přeměna organických látek v půdě je problematická (Arlauskienė *et al.*,

2009; Curtin *et al.*, 1998). Jsou hledány možnosti využití přebytečné slámy ze zemědělského sektoru v jiných oblastech.

Na základě těchto informací vyplývá, že kombinací využití průmyslových zemědělských odpadů z výroby biopaliv a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu s požadavky na snížení energetické náročnosti ve stavebnictví, vzniká příležitost využití slaměné řezanky, slaměných plev či dřevní štěpky jako tepelné izolace v udržitelné výstavbě budov.

### 3.5.3 Tepelné vlastnosti zemědělského odpadu / rostlinných vláken

Rostlinná vlákna jsou využívána díky jejich nízké hustotě, specifickými mechanickými vlastnostmi, biologickou rozložitelností, nízkou uhlíkovou stopou, obnovitelností a cenovou dostupností (Joshi *et al.*, 2004; Wambua *et al.*, 2003).

Existuje značná tradice po celé generace při používání vláken z rostlinných zdrojů v různých aplikacích, zejména v textiliích a cenově dostupných bytových stavbách, příkladem jsou cihly vyztužené slaměnými vlákny (Binici *et al.*, 2007; Ashour *et al.*, 2010), zlepšení akustických parametrů dřevotřískových desek pomocí slaměných vláken (Yang *et al.*, 2003), rákosové střechy (Brischke & Hanske, 2016) a využití konopných vláken ve stavebnictví na izolační desky (Ingrao *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2016). Do popředí se dostává i využití plev z různých bio-materiálů na tepelné izolace, dosud byly zveřejněny publikace: kávové plevy (Ricciardi *et al.*, 2017), plevy (slupky) z kokosu a bagasy, (Panyakaew & Fotios, 2011) nebo rýžové plevy (da Rosa *et al.*, 2015). **V tabulce 15** jsou uvedeny další materiály ze zemědělského odpadu využívané na izolační účely.

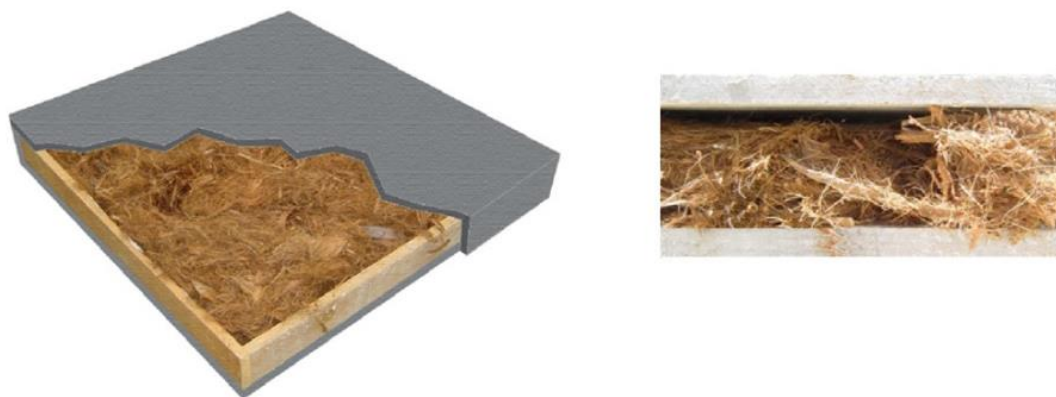
**Tabulka 15:** Fyzikální vlastností izolačních desek ze zemědělského odpadu ve směru vláken kolmo na tepelný tok

typ zemědělského odpadu	objemová hmotnost $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	zdroj
Rýžové plevy	150 - 170	0,044 - 0,057	Panyakaew & Fotios (2008); Yarbrough <i>et al.</i> (2005)
Kokosová vlákna	300 - 350	0,047 - 0,085	Panyakaew & Fotios (2008); Manohar <i>et al.</i> (2006)
Bagasa	90 - 140	0,047 - 0,050	Panyakaew & Fotios (2008); Onésippe <i>et al.</i> (2010)
Kukuřičné klasy	300 - 330	0,097 - 0,098	Panyakaew & Fotios (2008); Pinto <i>et al.</i> (2011)
Durian (kůra)	400 - 875	0,065 - 0,150	Khedari <i>et al.</i> (2004); Panyakaew & Fotios (2008)
Palma olejná (listy)	800 - 1000	0,118 - 0,240	Panyakaew & Fotios (2008); Al-Juruf <i>et al.</i> (1988)



Při navrhování a samotné instalaci tepelné izolace ze zemědělských odpadů je důležité, vzhledem k jejich biologickému původu, zohlednit jejich citlivost na absorpci vlhkosti, napadení biotickými škůdci a možnou degradaci (Lelievre *et al.*, 2014; Palumbo *et al.*, 2016). Například sláma je bez obtíží schopná odolávat opakovaným cyklům vlhnutí a vysychání. Pokud je však dlouhodobě vystavena relativní vlhkosti prostředí překračující 70% nebo pokud její hmotností vlhkost přesáhne 30%, zplesniví (Farm, 2001).

Obnovitelné izolační materiály mají několik tvarů - balíky, kompozitní desky a sendvičové panely (**obrázek 16**), z nichž některé jsou bez pojiva, některé jsou lepeny společně s udržitelnými omítkami nebo polymerovými lepidly, některé z nich mohou být konstruovány jako nosné konstrukce (Alavez-Ramirez *et al.*, 2012; Panyakaew & Fotios, 2011; Chikhi *et al.*, 2013 a Wei *et al.*, 2015).



**Obrázek 16:** Ukázka izolačního panelu s výplní z kokosových vláken (Alavez-Ramirez *et al.*, 2012)

Jako tepelná izolace na přírodní bázi jsou doposud využívány slaměné balíky (D'Alessandro *et al.*, 2017), konopná vlákna (Kymäläinen & Sjöberg, 2008), dřevovláknó (Vay *et al.*, 2015), bambusová vlákna (Huang *et al.*, 2016), a jiné průmyslové plodiny například: palmová vlákna (Benmansour *et al.*, 2014;), kukuřičné klasy (Pinto *et al.*, 2012; Paiva *et al.*, 2012), slunečnice (Evon *et al.*, 2014) a bavlněné stonky (Zhou *et al.*, 2010). Nebo méně používaná rostlinná vlákna kenafu (Charca *et al.*, 2015) používána jako tepelná izolace ve stavebních konstrukcích.

Na rozdíl od umělých materiálů vykazují přírodní materiály relativně vysokou hustotu a specifickou tepelnou kapacitu, což může být přínosné pro akumulaci tepla, které kompenzuje náhlé kolísání teploty a udržuje konstantní teplotu prostředí uvnitř budovy. Specifické tepelné kapacity a tepelné vodivosti některých nedávno zkoumaných nekonvenčních materiálů na přírodní bázi jsou shrnuty v přehledu Asdrubali *et al.*, (2015). Tepelná vodivost ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) rákosu (0,045-0,056) bagasy (0,046-0,055) a

kenafu (0,034-0,043) je velmi blízká konvenčním umělým materiálům jako expandovaný polystyren (0,031-0,038) nebo minerální vlně (0,033-0,040). Tepelná vodivost většiny ostatních nekonvenčních materiálů byla menší než  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , nejvyšší hodnoty byly naměřeny u směsi banánových vláken a polypropylenu (PP) (0,157-0,182).

Dutá rostlinná vlákna mají vzhledem ke své anatomické struktuře rozdílné hodnoty tepelné kapacity a tepelné vodivosti v závislosti orientace vzorku na tepelném toku. Například u slaměných balíků je tento rozdíl patrný. V Německu existuje závazný předpis pro tepelně-technické posuzování konstrukcí z balíků slámy Deutsches Institut für Bautechnik, který od roku 2006 povoluje provádět tepelně-technické výpočty s hodnotami součinitele tepelné vodivosti  $0,080 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ve směru rovnoběžném se stébly a  $0,052 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ve směru kolmém na stébla. Obsahem dokumentu je detailní popis normovaných balíků a zveřejnění hodnot tepelné vodivosti.

Sláma ve formě balíku je jeden z nekonvenčních udržitelných materiálů využívaný v současnosti na tepelnou izolaci. Jedno z aktuálních porovnání tepelné vodivosti provedl (Costes *et al.*, 2017) v závislosti na orientaci slámových vláken vzhledem k tepelnému toku a hustotě. Ve směru vláken kolmo na tepelný tok byla tepelná vodivost  $0,045\text{-}0,056 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a ve směru vláken rovnoběžně s tepelným tokem  $0,056\text{-}0,08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Objemová hmotnost balíků byla v rozsahu  $75\text{-}125 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tepelná vodivost slaměných balíků je nejvíce závislá na objemové hmotnosti (míře slisování) slámy. Nejvyšší hodnoty tepelného odporu mají konstrukce z balíků slisovaných cca na  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Pfeiferová *et al.*, 2001). Ukázky různých měření tepelné vodivosti jsou přehledně zpracovány v **tabulce 16**. Naměřené hodnoty kolísají od 0,04 do  $0,09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Přitom je třeba brát v úvahu, že početní hodnota, tedy hodnota, která smí být při výpočtu dosazována za tepelnou vodivost, se udává pro danou vlhkost zpravidla navýšená o bezpečnostní přírážku ve výši 20% (Minke & Mahlke, 2009).

**Tabulka 16:** Hodnoty tepelné vodivosti slaměných balíků od různých zdrojů

zdroj	objemová hmotnost $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	
		tepelný tok kolmo k vláknům	tepelný tok ve směru vláken
Farm (2001) - Straw bale guide	-	0,090 *	
Munch-Andersen & Andersen (2004)	75	0,052	0,057
Munch-Andersen & Andersen (2004)	90	0,056	0,060
Forschungsunstitut für Wärmeschutz München (2003) dle DIN 52612 (Minke & Mahlke, 2009)	90-110	0,038 0,045 (+20%)	-
Christian <i>et al.</i> (1998)	62. resp. 81	0,057	0,082
McCabe (1993)	150	0,048	0,060
McCabe (1993)	133	0,054	0,061
Sandia National Lab. (1994)	90	0,050-0,060*	
Wimmer <i>et al.</i> (2001) – Haus der Zukunft	73	0,037 0,044 (+20%)	-
	83,8	0,034 0,040 (+20%)	
	100	0,038 - 0,041 0,045 (+20%)	
Bautechnik Institut (2006)**	90-120	0,044	0,067
Grmela (2008)**	70	0,052	0,063

\* nespecifikovaný směr vláken v závislosti na tepelném toku

\*\* vlhkost vzorku < 15%

Od klasických (konvenčních) tepelných izolací se izolace ze slaměných balíků vyznačuje především větší průvzdušností a tloušťkou. S rostoucí průvzdušností, teplotním spádem a tloušťkou vrstvy roste vliv šíření tepla prouděním (konvekci) v tepelně izolační vrstvě. Velikost proudění však závisí na použitém stavebním systému, technologii a kvalitě provedení. Zahraniční i historické zkušenosti vykazují, že nejlépe fungují stěny z nosné slámy oboustranně omítnuté hliněnou omítkou. Ve stěnách z nosné slámy je vliv konvekce menší. V zatížených slaměných stěnách se balíky rozpínají do stran a minimalizují tak mezery. Sláma je rovnoměrně stlačena a průvzdušnost je tak snížena (King, 2006). V Litvě byla v roce 2009 firmou Ecococon vytvořena technologie lisovaných panelů ze slámy, která radikálně zvýšila úroveň kvality oproti slaměným balíkům (Šadzevičius *et al.*, 2015). Panely jsou lisovány na objemovou hmotnost 100 kg.m<sup>-3</sup> s vlhkostí 12% a dosahují tepelné vodivosti 0,057 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (Ecococon, 2012)

K výhodám tepelně-izolačních materiálů ze zemědělských odpadů patří: nízká spotřeba energie na jejich výrobu, využívání lokálních surovin, recyklovatelnost,

obnovitelnost surovin a ekologická likvidace na konci životnosti. Přes všechny tyto výhody jsou přírodní izolace stále méně populární než syntetické.

Existuje poměrně rozpor v provádění nekonvenčních stavebních materiálů: na jedné straně biologické původy přinášejí všechny výhody pro udržitelnou budoucnost, na druhé straně jsou zdrojem proměnlivosti vlastností materiálů v důsledku variabilního růstu rostlin v různých klimatických a půdních podmínkách. Proto je technická normalizace, kontrola kvality a hromadná výroba obtížná, což pravděpodobně vede k jisté opatrnosti nebo nedůvěře developerů, stavitelů a následně investorů. Stále je to ale malá nevýhoda ve srovnání s dlouhodobým užíváním biologických materiálů a jejich přínosy na životní prostředí. Zvláště pokud vezmeme v úvahu směrnice Evropské unie (EU) usilující o výrazné snížení spotřeby energie ve stavebnictví a především využívání energie z obnovitelných zdrojů v blízké budoucnosti 2010/31/EU a 2012/27/EU (Williams *et al.*, 2016).

Vzhledem k těmto důvodům je důležitý každý výzkum zabývající se dlouhodobým testováním (monitorováním) obnovitelných materiálů. Z toho plyne, že testování demonstračních vzorků v reálné velikosti může přesvědčit stavebníky a investory k většímu využití těchto energeticky obnovitelných materiálů.

### 3.5.4 Tepelné vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva

Asdrubali *et al.* (2017) uvádí, že dřevo a materiály na bázi dřeva mají nízkou tepelnou vodivost, která se pohybuje od 0,042 do 0,18 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, což umožňuje vytvářet obvodové stěnové konstrukce s vysokým tepelným odporem a nízkými tloušťkami. Tyto konstrukce umožňují ukládání a uvolňování tepla; což vede k úspoře energie, která se může pohybovat v rozmezí 15 % až 40 % ve srovnání se zděnou budovou.

Dřevo má anizotropní charakter, a proto má rozdílné vlastnosti v závislosti na směru vláken. Z literatury lze vyvodit značné množství informací o tepelné vodivosti dřeva (TenWolde *et al.*, 1988; Suleiman *et al.*, 1999; Ragland *et al.*, 1991). Významnými faktory, které ovlivňují tepelnou vodivost (Gupta *et al.*, 2003):

- druh dřeva
- objemová hmotnost
- vlhkost
- směr tepelného toku na směru vláken (anizotropie)

Tepelná vodivost dřeva je zhruba dvakrát větší ve směru rovnoběžném s vlákny ve srovnání se směrem kolmo na vlákna, zatímco podobné hodnoty lze dosáhnout pro tangenciální a radiální směry (Lagüela *et al.*, 2015).

Tuzemské a zahraniční normy rozlišují tepelnou vodivost pro tvrdé a měkké dřevo v závislosti na orientaci vláken. U stavebních obvodových konstrukcí z masivního dřeva je využíváno převážně měkké dřevo a tepelný tok je ve většině případů kolmo na orientaci vláken. V **tabulce 17** uvádím fyzikální vlastnosti rostlého dřeva a materiálů na bázi dřeva využívané na obvodové konstrukce na bázi dřeva.

**Tabulka 17:** Fyzikální vlastnosti rostlého dřeva a materiálů na bázi dřeva používaných na obvodové konstrukce na bázi dřeva (iMateriály, 2016; Provázek & Glos, 2009; ČSN 730540-1, 2005)

druh materiálu	objemová hmotnost $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )*	měrná tepelná kapacita $c$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )*	faktor difúzního odporu $\mu_n$ (-)	součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )**
dřevo rostlé - měkké (jehličnaté) tepelný tok kolmo k vláknům	400	2 510	157	0,18
dřevo rostlé - tvrdé (listnaté) tepelný tok kolmo k vláknům	600	2 510	157	0,22
cementovláknitá deska	950-1 150	1 000	40-50	0,25-0,30
cementotřísková deska	1 100-1 500	1 100	30-50	0,28-0,31
sádrovláknitá deska	1 150-1 200	1 000-1 100	15-40	0,32-0,38
sádrokartonová deska	650-850	960-1 100	6-15	0,21-0,22
OSB deska	600	1 700	150-200	0,10-0,13
multifunkční deska (MFP)	650-700	1 600	50-100	0,13
překližka	500-550	1 210	150-200	0,12
biodeska (SWP)	490-580	1 600	70-200	0,13-0,15
dřevovláknitá deska s vyšší hustotou (HDF)	800-1000	2 100	30	0,15-0,17
dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF, DHF)	600-650	2 100	11	0,10
dřevovláknitá deska - měkká	50-240	2 100	5 - 10	0,038-0,046
dřevotřísková deska	800	1 500	12,5	0,11

\*) uvedené hodnoty jsou pro materiál v suchém stavu

\*\*\*) uvedené hodnoty jsou návrhové

Rostlé dřevo je v současné době využíváno na konstrukci křížem lepených panelů (CLT). Objemová hmotnost panelů se pohybuje obvykle okolo 500 kg.m<sup>-3</sup> s hodnotou tepelné vodivosti 0,13 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (Lehmann, 2013). Ve skutečnosti několik studií ukázalo, že tepelná vodivost materiálu v suchém stavu je vždy nižší, než když je materiál nasycen, bez ohledu na druh materiálu (cihla, autoklávovaný pórobeton, vápenná omítka či různé druhy tepelné izolace) (Ducoulombier & Lafhaj, 2017; Vrána &

Gudmundsson, 2010; Pavlík *et al.*, 2013; Jin *et al.*, 2016). Proto je důležité vždy vliv vlhkosti nezanedbat.

Tepelná vodivost dřeva je většinou měřena metodou topné desky při ustálených okrajových podmínkách. Nicméně jsou využívány i další experimentální metody k stanovení tepelné vodivosti dřeva. Jedno z nejrozsáhlejších měření tepelné vodivosti různých druhů dřevin provedl TenWolde *et al.* (1988) metodou chráněné topné desky.

Další měření metodou chráněné topné desky pro měření masivního dřeva menších vzorku provedla Vololonirina *et al.* (2014). Byly použity vysušené vzorky dřeva s různými hustotami s úzkými a širokými letokruhy pro teploty 10, 25 a 40 °C. V rozsahu použitých teplot se tepelná vodivost měřila lineárně s teplotou. Vzhledem k tomu, že byly získány relativně nízké hodnoty tepelné vodivosti ( $0,080 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  v radiálním směru při teplotě 25°C), lze považovat vzorky dřeva za tepelné izolátory.

Suleiman *et al.* (1999) měřil tepelnou vodivost vysušeného tvrdého dřeva metodou nestacionárního rovinného tepelného zdroje - horkého disku při pokojové teplotě 21°C a při teplotě 100 °C. Tepelná vodivost se při stoupající teplotě mírně zvyšuje jak v podélném, tak v příčném směru. Pralat (2016) měřil tepelnou vodivost pro šest druhů dřeva v různých směrech s vlhkostí 6-8 % uvnitř vzorků metodou horkého drátu. Vypočtené hodnoty byly v rozmezí  $0,126 \pm 0,225 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a odchylka od hodnot uváděných v literatuře byla do 10 %. Nejnížší hodnoty byly získány u borového dřeva, nejvyššího u habrového dřeva.

V poslední době se často používá metoda diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC), která je velmi přesná a lze získat data pro velmi malou velikost vzorku. Navíc dynamická povaha DSC umožňuje stanovení tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity jako funkce teploty. Stejnou metodu použil i Limam *et al.* (2016), který testoval šest vzorků masivního dřeva borovice Aleppo s relativní vlhkostí do 15 % ve srovnání s metodou měřidla tepelného toku s průměrnou hodnotou rostlého dřeva  $0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (při objemové hmotnosti  $580 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a lepeného dřeva  $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ve směru kolmém na vlákna.

Raji *et al.* (2009) měřil tepelnou vodivost 130 mm roubené stěny z vysušeného lepeného dřeva skotské borovice metodou horkého pásu (Jannot & Meukam, 2004). Tepelné vlastnosti borovice velmi závisí na obsahu vody. V důsledku toho by bylo obtížné vzít v úvahu pouze průměrnou hodnotu této vodivosti pro simulaci změn vlhkosti ve stěně. Tepelná vodivost ve směru kolmém na vlákna byla naměřena v rozmezí  $0,1-0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  vlivem rozdílu objemových hmotností dřeva  $364-415 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a obsahu

vlhkosti. Závěrem uvádí, že lepicí těsnění hraje klíčovou roli při proudění vzduchu a difuzi vodní páry.

Vzorky masivních dřevěných stěn reálné velikosti se měří pomocí zařízení teplé skříně. Jochym (2016) uvádí hodnoty součinitele prostupu tepla dle výpočtu z ČSN EN ISO 6946 (2018) srubové stěny o průměru 260 mm s využitím jednotlivých hodnot tepelných vodivostí ( $0,13$  a  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), které porovnává s experimentálním měřením při ustálených okrajových podmínkách v zařízení teplé skříně ( $U = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Pro výpočet používá rozměrovou substituční metodu a plošnou substituční metodu. Vypočtené hodnoty součinitele prostupu tepla pomocí rozměrové substituční metody jsou vyšší o 5-38 % v porovnání s experimentálním výsledkem. Při použití plošné substituční metody jsou vypočtené hodnoty nižší o 8,3 % (při použití tepelné vodivosti  $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a vyšší o 21,7 % (při použití tepelné vodivosti  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) v porovnání s experimentálním výsledkem. Přesnost výpočtu srubové stěny je tedy závislá na výpočtu konstantní tloušťky profilu kulatiny uvedenými substitučními metodami.

Pro porovnání provedl Řihák & Školník (2016) měření srubové stěny o průměru 300 mm metodou chráněné teplé skříně při ustálených okrajových podmínkách. Průměrná výsledná hodnota součinitele prostupu tepla  $0,44 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnota tepelného odporu  $2,11 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Naměřená hodnota vyšla o 46 % vyšší než je požadovaná hodnota daná normou. V **tabulce 18** uvádím porovnání hodnot tepelných vodivostí deklarovaných normou a experimentálně naměřených dle různých autorů.

**Tabulka 18:** Tepelná vodivost rostlého měkkého (jehličnatého) dřeva kolmo na vlákna podle jednotlivých zdrojů

metoda	tloušťka d (mm)	objemová hmotnost $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		zdroj
deklarováno normou	x	400	charakteristická hodnota 0,15	návrhová hodnota 0,18	ČSN 73 0540-3 (2005) STN 73 0540-3 (2012)
deklarováno normou	x	500	návrhová hodnota 0,13		ČSN EN ISO 10 456 (2009)
Teplá skříň (ČSN EN ISO 8990)	300 (průměr)	neuvedeno	U = 0,44, R = 2,11 => $\lambda = 0,15$ *		Řihák & Školník (2016)
Teplá skříň (ČSN EN ISO 8990)	260 (průměr)	400	U = 0,60, R = 1,66 => $\lambda = 0,14$ *		Jochim (2016)
Horký pás	130	390	0,10 - 0,30 **		Raji <i>et al.</i> (2009)
Chráněná topná deska (ČSN EN 12 667)	48,6	383	úzké letokruhy - radiální směr	0,079 (t = 10 °C); 0,080 (t = 25 a 40 °C)	Vololonirina <i>et al.</i> (2014)
	48,5	393	úzké letokruhy - tangenciální směr	0,082 (t = 10 °C); 0,084 (t = 25 a 40 °C)	
	49,5	367	široké letokruhy - radiální směr	0,080 (t = 10 °C); 0,081 (t = 25 a 40 °C)	
	49,7	368	široké letokruhy - tangenciální směr	0,093 (t = 10 °C); 0,095 (t = 25 a 40 °C)	
Horký drát (ČSN EN ISO 8894-1)	50	400	0,13		Pralat (2016)

vlhkost dřeva  $\approx$  13% nebo vysušené

\* přibližná tepelná vodivost je odvozena z tepelného odporu

\*\* pro rozdílné objemové hmotnosti dřeva v rozmezí 364-415 kg.m<sup>-3</sup>

Další zkoumané parametry u dřeva a materiálů na bázi dřeva kromě součinitele tepelné vodivosti jsou měrná tepelná kapacita  $c$  (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) a součinitel teplotní vodivosti (tepelná difuzivita) a (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>). Měrnou tepelnou kapacitu pro dřevo v suchém stavu uvádí tuzemské i zahraniční normy hodnotu dřeva 2 510 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Limam *et al.* (2016) naměřil hodnotu součinitele teplotní vodivosti metodou měřidla tepelného toku masivního dřeva borovice Aleppo s relativní vlhkostí do 15 % u rostlého dřeva 0,00079 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> (při objemové hmotnosti (580 kg.m<sup>-3</sup>) a lepeného dřeva 0,00092 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> (360 kg.m<sup>-3</sup>) ve směru kolmém na vlákna. Měrná tepelná kapacita byla měřena pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) v teplotním rozmezí 0-45 °C u rostlého dřeva 1 550 J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a u lepeného dřeva přibližně 1 500 J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Rozdíl je daný odlišnými hustotami vzorků.



## 4 Materiál

Pro experimentální analýzu zabývající se stanovením tepelných vlastností bylo vybráno 9 stěnových panelů. Stěnové panely se dělí do dvou okruhů podle způsobu porovnání testovaných parametrů. V prvním okruhu byly panely na bázi dřeva zvoleny dle vlastních návrhů. Jedná se o panely na bázi dřeva s využitím zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) jako obnovitelné sypané tepelné izolace. Důležitým faktorem ovlivňujícím tepelné vlastnosti je objemová hmotnost, vlhkost a použitá frakce sypaného materiálu. Pro porovnání k těmto panelům byl navržen panel na bázi dřeva s využitím průmyslově vyrobené tepelné izolace z minerální vlny.

V druhém okruhu byly stěnové panely dodány od výrobců jako jejich nejvíce používané typy v tuzemsku. Jedná se panely z rostlého dřeva, panely rámové dřevostavby a panel z keramických bloků. Důležitým faktorem ovlivňujícím experiment je sjednocení obsahu vlhkosti pomocí kondicionování všech panelů.

### 4.1 Charakteristika testovaných panelů

V této podkapitole jsou popsány konstrukce jednotlivých testovaných stěnových panelů. Jejich geometrické vlastnosti a materiálové skladby. V **tabulce 19** uvádím přehled všech testovaných panelů.

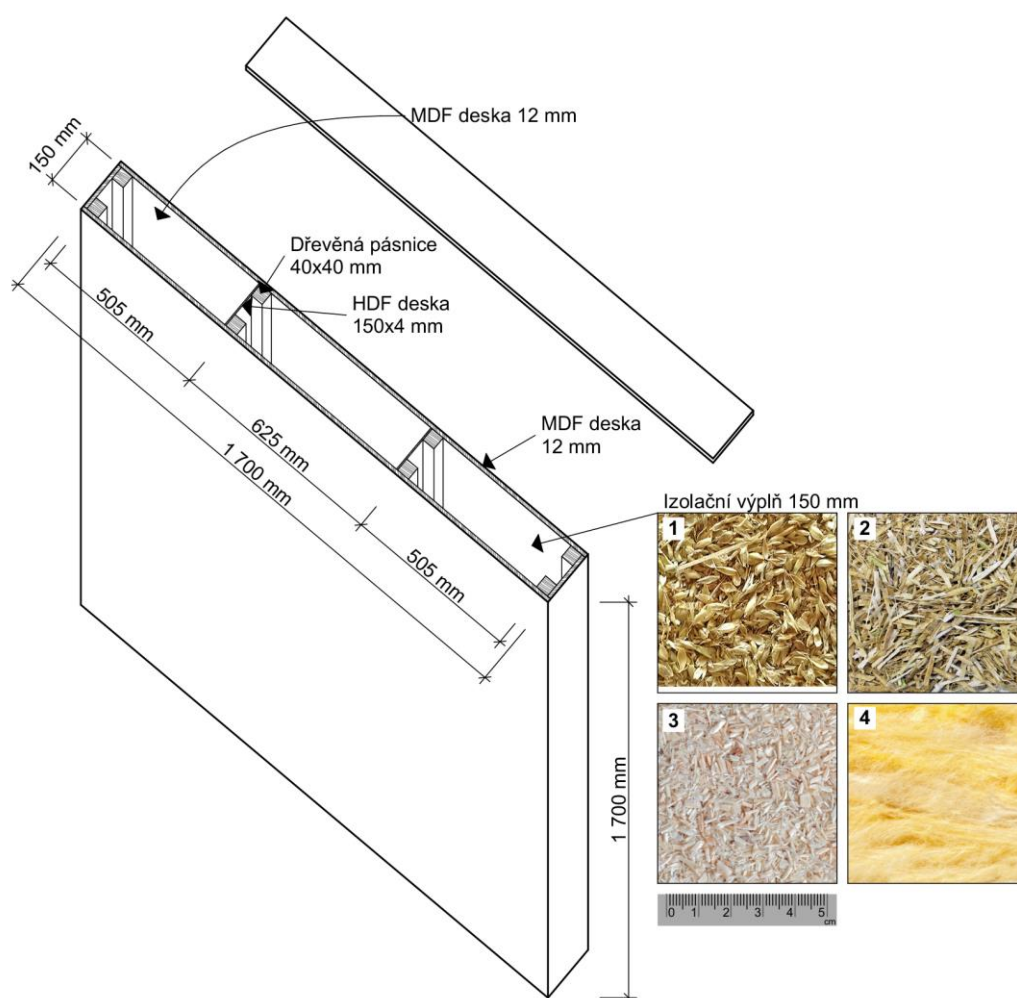
**Tabulka 19:** Přehled všech testovaných stěnových panelů

Okruh stěnových panelů	Typ stěnového panelu	Způsob porovnání testovaných parametrů
<b>I.</b> Panely na bázi dřeva dle vlastních návrhů	1) Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev	Porovnání naměřených parametrů* panelů se zemědělským odpadem a odpadem z dřevozpracujícího průmyslu s panelem s minerální vlnou při ustálených a neustálených okrajových podmínkách
	2) Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky	
	3) Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky	
	4) Sendvičový panel s výplní z minerální vlny	
<b>II.</b> Panely (na bázi dřeva) dodané od výrobců	5) Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů	Porovnání naměřených parametrů* panelů (na bázi dřeva) při neustálených okrajových podmínkách s parametry získanými z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540 - 3
	6) Panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT)	
	7) Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů	
	8) Panel rámové dřevostavby s izolační výplní	
	9) Panel z keramických tvárnic Porotherm**	

\* testované parametry budou uvedeny v kapitole metodika

\*\* tento typ panelu není na bázi dřeva

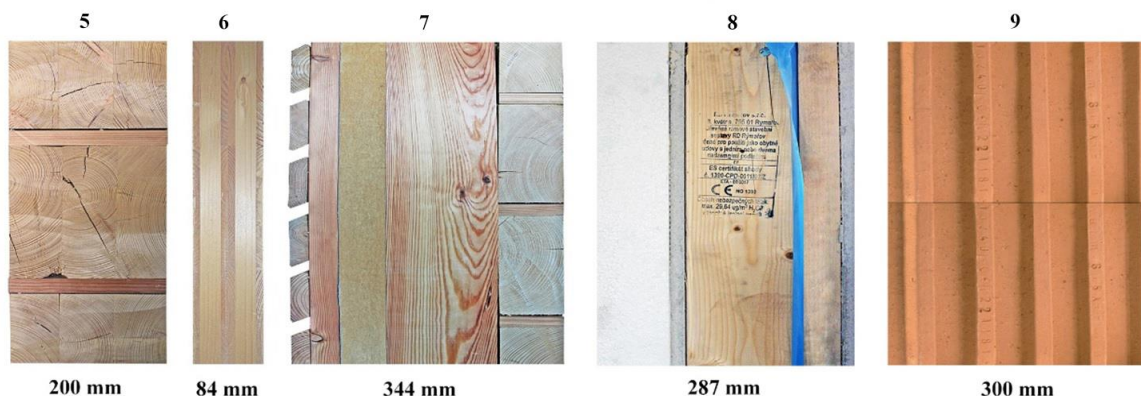
Testované panely jsou rozděleny do dvou okruhů podle způsobu porovnání testovaných parametrů. V prvním okruhu byly použité materiály v testovaných panelech vybrané dle vlastních návrhů (**obrázek 17**, ozn. 1-4). Tyto sendvičové panely s výplní ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) jsou porovnány se sendvičovým panelem s průmyslově vyráběnou izolační výplní z minerální vlny při ustálených a neustálených okrajových podmínkách.



**Obrázek 17:** Panely na bázi dřeva dle vlastních návrhů: (1) sendvičový panel s výplní z pšeničných plev; (2) sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky; (3) sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky; (4) sendvičový panel s výplní z minerální vlny.

V druhém okruhu byly panely dodané přímo výrobcem či zkonstruované podle návrhu výrobce (**obrázek 18**, ozn. 5-9). U těchto panelů na bázi dřeva a panelu z keramických tvárnic standardně používaných v tuzemsku jsou porovnány naměřené parametry při neustálených okrajových podmínkách s parametry získanými

z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540-3 (2005).



**Obrázek 18:** Panely (na bázi dřeva) dodané od výrobců: (5) panel roubené stěny z lepených smrkových profilů; (6) panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT); (7) panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů; (8) panel rámové dřevostavby s izolační výplní; (9) panel z keramických tvárcí Porotherm.

#### 4.1.1 Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev

Pro testování sendvičového panelu s izolační výplní z pšeničných plev v tloušťce 150 mm byl vyroben plášť (obálka), který byl sestaven z dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF) s vnějšími rozměry 1 700 x 1 700 x 174 mm - délka x výška x tloušťka (obrázek 17, ozn. 1). Plevy z pšenice seté (*Triticum aestivum*) byly použity od lokálního dodavatele ze Středočeského kraje, ČR. Panel byl vyroben na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze. Vnitřní dutina panelu byla naplněna tepelnou izolací z pšeničných plev, volně sypaných a náhodně orientovaných (obrázek 19). Při vyplňování panelu izolací nebylo použito žádné pojivo.

Desky MDF (Egger CZ s.r.o., Hradec Králové, ČR) o tloušťce 12 mm byly zvoleny z důvodu homogenního průřezu a tudíž stabilní tepelné vodivosti ( $0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $600\text{-}650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Vnitřní část panelu byla rozdělena do tří částí z nosníků na bázi dřeva, které tvoří nosnou kostru. Pásnice nosníků jsou vyrobeny z borovicového dřeva o rozměrech 1 700 x 40 x 40 mm a stojna z dřevovláknité desky s vyšší hustotou (HDF) o tloušťce 4 mm a tepelné vodivosti  $0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tloušťka izolačního jádra je dána výškou nosníků (150 mm). Všechny dřevěné, MDF a HDF prvky panelu byly spojeny vruty  $1,5 \times 15 \text{ mm}$  a  $3,0 \times 30 \text{ mm}$ . Detailní konstrukční výkres je umístěn na obrázku 20, ozn. 1.

Objemová hmotnost pšeničných plev v panelu byla určena jako poměr mezi celkovou hmotností plev v dutině panelu a objemem dutiny. Objemová hmotnost byla stanovena  $104 \text{ kg.m}^{-3}$ .



**Obrázek 19:** Způsob plnění obálky panelu (z MDF desek) izolací ze zemědělského odpadu (na obrázku ukázka pšeničných plev)

#### 4.1.2 Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky

Pro testování sendvičového panelu s izolační výplní z řepkové řezanky v tloušťce 150 mm byl vyroben plášť (obálka), který byl sestaven z dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF) s vnějšími rozměry 1 700 x 1 700 x 174 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 17**, ozn. 2). Řezanka z řepky olejky (*Brassica napus*) byla použita od lokálního dodavatele ze Středočeského kraje, ČR. Panel byl vyroben na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze. Vnitřní dutina panelu byla naplněna tepelnou izolací z řepkové řezanky, volně sypané a náhodně orientované. Při vyplňování panelu izolací nebylo použito žádné pojivo. Konstrukce panelu je stejná jako u sendvičového panelu s výplní z pšeničných plev (popis 4.1.1). Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 20** ozn. 2.

Objemová hmotnost pšeničných plev v panelu byla určena jako poměr mezi celkovou hmotností řezanky v dutině panelu a objemem dutiny. Objemová hmotnost byla stanovena  $110 \text{ kg.m}^{-3}$ .

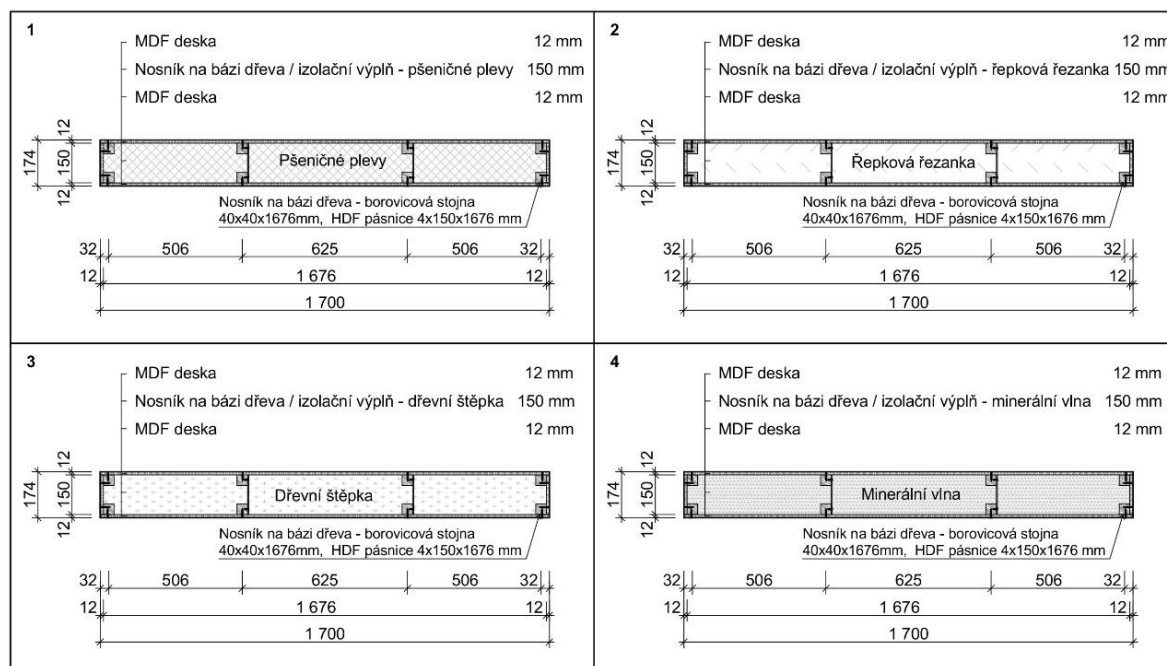
#### 4.1.3 Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky

Pro testování sendvičového panelu s izolační výplní z dřevní štěpky v tloušťce 150 mm byl vyroben plášť (obálka), který byl sestaven z dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF) s vnějšími rozměry 1 700 x 1 700 x 174 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 17**, ozn. 3). Dřevní štěpka byla použita od lokálního dodavatele ze

Středočeského kraje, ČR. Panel byl vyroben na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze. Vnitřní dutina panelu byla naplněna tepelnou izolací z dřevní štěpky, volně sypané a náhodně orientované. Při vyplňování panelu izolací nebylo použito žádné pojivo. Konstrukce panelu je stejná jako u sendvičového panelu s výplní z pšeničných plev (popis 4.1.1). Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 20** ozn. 3. Objemová hmotnost dřevní štěpky v panelu byla určena jako poměr mezi celkovou hmotností dřevní štěpky v dutině panelu a objemem dutiny. Objemová hmotnost byla stanovena  $205 \text{ kg.m}^{-3}$ .

#### 4.1.4 Sendvičový panel s výplní z minerální vlny

Pro testování sendvičového panelu s izolační výplní z minerální vlny v tloušťce 150 mm byl vyroben plášť (obálka), který byl sestaven z dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF) s vnějšími rozměry 1 700 x 1 700 x 174 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 17**, ozn. 4). Minerální vlna Isover Orsik byla použita od výrobce Isover, ČR. Panel byl vyroben na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze. Vnitřní dutina panelu byla naplněna tepelnou izolací z minerální vlny ve formě izolačních desek. Při vyplňování panelu izolací nebylo použito žádné pojivo. Konstrukce panelu je stejná jako u sendvičového panelu s výplní z pšeničných plev (popis 4.1.1). Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 20** ozn. 4. Objemová hmotnost desek z minerální vlny v panelu je  $30 \text{ kg.m}^{-3}$ .



**Obrázek 20:** Skladby panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů: (1) sendvičový panel s výplní z pšeničných plev; (2) sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky; (3) sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky; (4) sendvičový panel s výplní z minerální vlny.

#### **4.1.5 Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů**

Panel roubené stěny s vnějšími rozměry 1 700 x 1700 x 200 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 18**, ozn. 5) byl vyroben z lepených smrkových profilů typu BSH 200x180 mm vodorovně kladených na sebe. Každý profil je slepený ze tří lamel velikosti 80 x 180 mm a 40 x 180 mm. Mezi jednotlivými profily byla umístěna minerální vlna o tloušťce 20 mm. Spára mezi profily byla zalepena vzduchotěsnou páskou. Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 21**, ozn. 5. U tohoto panelu je vykreslen i řez panelu kvůli znázornění minerální vlny mezi jednotlivými profily (**obrázek 21**, ozn. 5b).

#### **4.1.6 Panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT)**

Panel z křížem lepeného lamelového dřeva s vnějšími rozměry 1 700 x 1700 x 84 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 18**, ozn. 6) byl vyroben z křížem lepených smrkových lamel. Tento typ panelu byl dodán od firmy Novatop jako nejpoužívanější stěnový panel. Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 21**, ozn. 6.

#### **4.1.7 Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů**

Panel zateplené roubené stěny s vnějšími rozměry 1 700 x 1700 x 344 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 18**, ozn. 7) byl vyroben ze smrkových profilů 80 x 180 mm vodorovně kladených na sebe. Z vnější strany jsou umístěny KVH hranoly 50 x 140 mm mezi kterými je vrstva tepelné izolace z minerální vlny. Tato vrstva je doplněna fasádní tepelnou izolací z dřevovláknitých desek spojených na pero a drážku. Na dřevovláknitou izolaci byla instalována paropropustná (difúzní) fólie. Její funkce je zajištění prostupu vodní páry z vnitřní strany panelu a zároveň zabránění protékání případné vody. Panel uzavírá z vnější strany fasáda z vodorovně kladených dřevěných prken typu Rhombus 24 x 95 mm na dřevěných svislých latích 40 x 60 mm. Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 21**, ozn. 7.

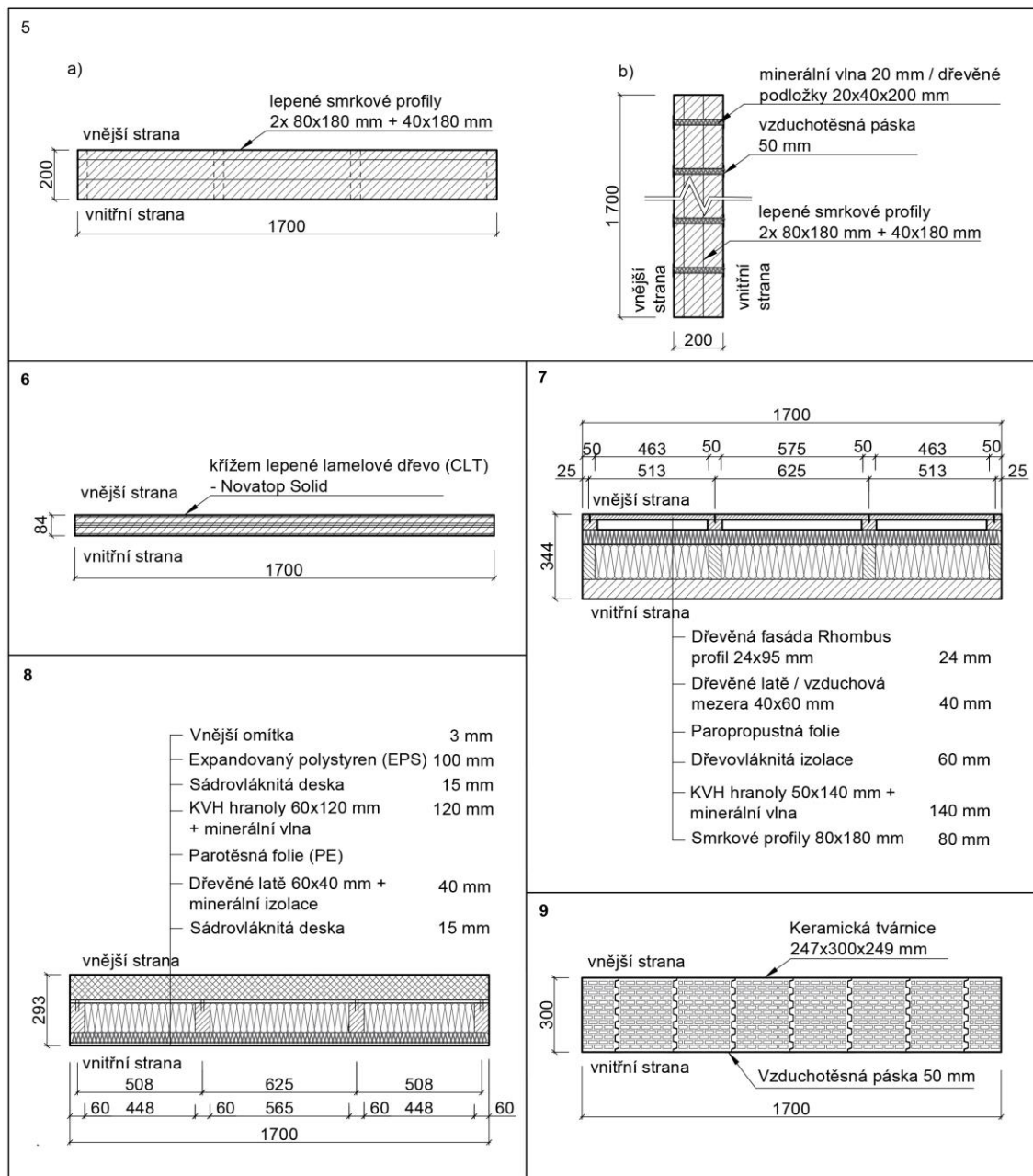
#### **4.1.8 Panel rámové dřevostavby s izolační výplní**

Panel rámové dřevostavby s vnějšími rozměry 1 700 x 1700 x 287 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 18**, ozn. 8) byl vyroben ze KVH hranolů 60 x 120 mm mezi kterými je tepelná izolace z minerální vlny tloušťky 120 mm. Na hranolech je z vnitřní strany instalována parotěsná fólie, proti zabránění vniku vodní páry do konstrukce panelu. Na této vrstvě je připevněn rošt z dřevěných latí 60 x 40 mm, mezi kterým je tepelná izolace z minerální vlny tloušťky 40 mm. Na povrchu vnitřní strany panelu je sádrovláknitá deska tloušťky 15 mm. Sádrovláknitá deska stejné tloušťky je také umístěna z vnější strany KVH hranolů. Panel uzavírá kontaktní zateplovací systém z expandovaného polystyrenu (EPS) tloušťky 100 mm s vnější omítkou. Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 21**, ozn. 8.

#### **4.1.9 Panel z keramických tvárnic Porotherm**

Tento panel s vnějšími rozměry 1 700 x 1700 x 300 mm - délka x výška x tloušťka (**obrázek 18**, ozn. 9) byl vyroben z keramických tvárnic Porotherm Profi Dryfix 247 x 300 x 249 mm kladených v několika řadách na sebe. Jednotlivé tvárnice byly spojovány na sucho bez použití pojiva, jak je tomu u běžného použití. Bylo to z důvodu zjištění testovaných parametrů pouze u samotných tvárnic, tzn. bez pojiva.

Spoje mezi tvárnici byly z vnitřní a vnější strany přelepeny vzduchotěsnou páskou. Detailní konstrukční výkres je umístěn na **obrázku 21**, ozn. 9.



**Obrázek 21:** Skladby panelů (na bázi dřeva) dodaných od výrobců: (5) panel roubené stěny z lepených smrkových profilů – (a) půdorys, (b) řez; (6) panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT); (7) panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů; (8) panel rámové dřevostavby s izolační výplní; (9) panel z keramických tvárnic Porotherm.

## 4.2 Příprava testovaných panelů

Příprava testovaných panelů zahrnuje stanovení obsahu vlhkosti materiálů obsažených v panelech a u panelů na bázi dřeva s výplní ze zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu i stanovení frakce sypané směsi pomocí rozboru síťovou analýzou. Dále jsou zde popsány podmínky kondicionování jednotlivých panelů.



#### 4.2.1 Stanovení vlhkosti

U panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů (ozn. 1-4) bylo za účelem stanovení obsahu vlhkosti izolační výplně vybráno deset 100 g vzorků pšeničných plev, řepkové řezanky, dřevní štěpky a minerální vlny. Vzorky byly umístěny do hliníkových misek a sušeny v klimatizační komoře po dobu 6 hodin při teplotě  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Poté byl stanoven procentuální obsah vlhkosti ( $u$ ) jako hmotnostní rozdíl mezi vlhkým ( $m_w$ ) a suchým ( $m_0$ ) vzorkem dle vztahu:

$$u (\%) = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (19)$$

Obsah vlhkosti pšeničných plev byl stanoven  $3,5\% \pm 0,1 \%$ , u řepkové řezanky byl  $8,1 \pm 0,9 \%$ , u dřevní štěpky byl  $6,9 \pm 0,5 \%$  a u minerální vlny byl  $3,0 \pm 0,2 \%$ . Obsah vlhkosti dřevěných komponentů a pláště z MDF desek byl maximálně 12%.

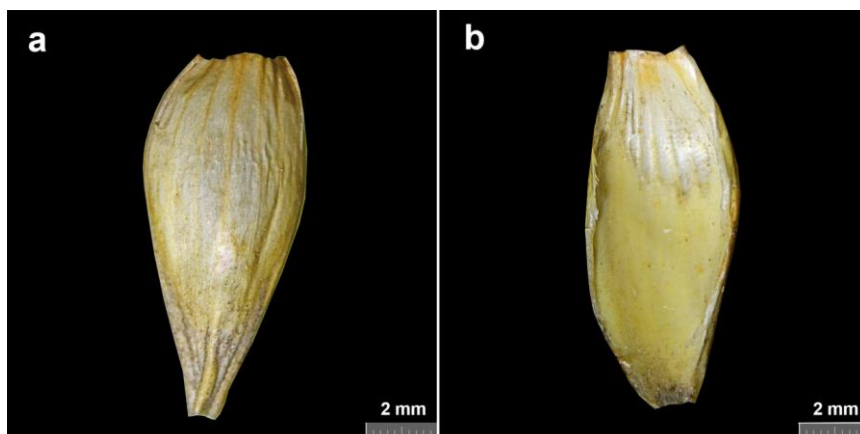
U panelů na bázi dřeva dodaných od výrobců (ozn. 5-9) byly použity dřevěné prvky a materiály na bázi dřeva s maximálním obsahem vlhkosti 12%.

Všechny testované panely byly kondicionovány za stejných podmínek (viz. podkapitola 4.2.5) z důvodu dosažení stejného obsahu vlhkosti.

#### 4.2.2 Stanovení frakce

Sítová analýza byla provedena u panelů na bázi dřeva s výplní ze zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu za účelem stanovení testované frakce pšeničných plev, řepkové řezanky a dřevní štěpky. Byly odebrány 3 náhodné vzorky po 100 g od každého materiálu a jejich frakce byla ověřena na základě prosévacího rozboru (sítové analýzy) pomocí prosévacího přístroje se sadou sít z kovové tkaniny podle normy ISO 3310-1 (2016).

Testovaný materiál - pšeničné plevy pro sítovou analýzu je vidět na **obrázku 17**, ozn. 1). Při optické mikroskopii na binokulární lupě je patrný celkový oválný tvar (**obrázek 22a, b**) vybíhající do špičky a pruhovaný vzhled plevy. Pleva je od základu ke špičce pokryta jemnými chloupky.



**Obrázek 22:** Snímek pšeničné plevy z optického mikroskopu (a) vnější povrch, (b) vnitřní povrch, tzn. blízko povrchu zrna.

**Tabulka 20** uvádí distribuci pšeničných plev získaných ze sítové analýzy. Jako jádrová vrstva testovaného izolačního panelu byla použita frakce 0-8 mm (**obrázek 17**, ozn. 1).

**Tabulka 20:** Zastoupení jednotlivých frakcí pšeničných plev získané sítovou analýzou

Frakce (mm)	<0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-1,6	1,6-2	2-3,15	3,15-8
Zastoupení (%)	1,4	0,9	1,8	10,0	18,7	48,4	18,8

Maximální průměrná délka plevy byla  $9,51 \pm 0,76$  mm a šířka byla  $3,77 \pm 0,42$  mm, oba rozměry byly měřeny na 100 náhodně vybraných kusech pomocí digitálního posuvného měřítka. V **tabulce 20** je uvedeno zastoupení jednotlivých frakcí pšeničných plev získané sítovou analýzou. Kvůli mletí pšenice a oddělení zrna od plev mohou být plevy poškozené, tj. rozštěpené nebo rozbité. Sítovou analýzou byla proto zjištěna šířka pšeničných plev. Porovnáním rozměrů zjištěných měření digitálního posuvného měřítka na nepoškozených vzorcích se sítovou analýzou lze usoudit, že pouze asi pětina plev zůstala po mletí pšenice a manipulaci kompaktní. Přesto dokonce i poškozené části udržují vzdušnou buněčnou morfologii, která je zodpovědná za tepelně izolační vlastnosti plev. Frakce < 0,25 mohou být považovány za prášek, který na rozdíl od neporušených pšeničných plev může mít spíše izotropní termofyzikální vlastnosti.

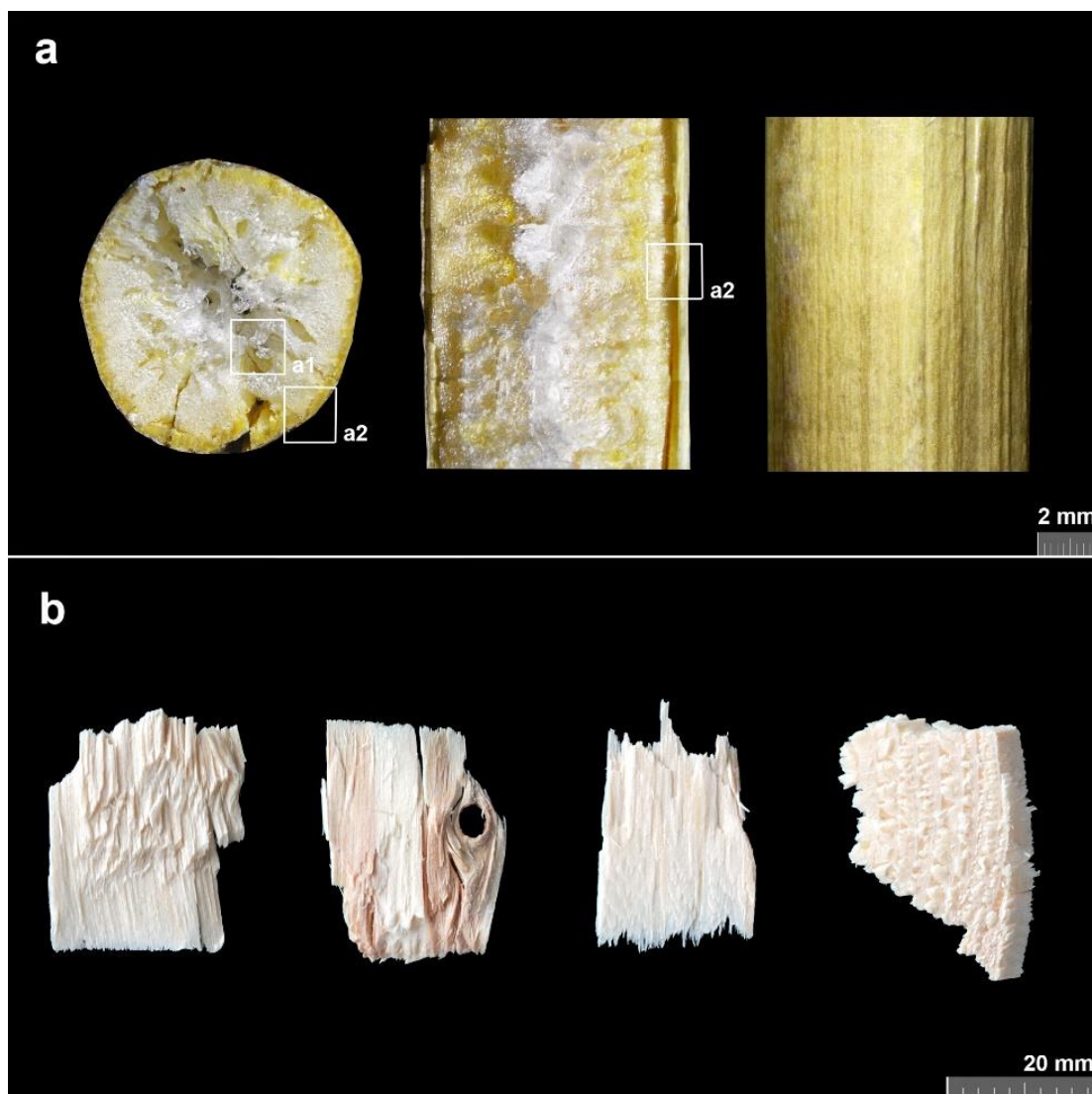
Další testovaný materiál - řepková řezanka a dřevní štěpka z měkkého dřeva menší frakce pro sítovou analýzu je vidět na **obrázku 17**, ozn. 2 a 3). Jako vstupní materiál byly použity stonky řepky olejky (*Brassica napus*) (**obrázek 23a**) a štěpky z měkkého dřeva (**obrázek 23b**), které byly rozdrceny v kladívkovém šrotovníku na výstupní testovaný materiál - řepkovou řezanku a dřevní štěpku menší frakce. **Tabulka**

21 uvádí distribuci řepkové řezanky získaných ze síťové analýzy. Jako jádrová vrstva testovaného izolačního panelu byla použita frakce 0-8 mm.

**Tabulka 21:** Zastoupení jednotlivých frakcí řepkové řezanky získané síťovou analýzou

Frakce (mm)	<0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-1,6	1,6-2	2-3,15	3,15-8
Zastoupení (%)	1,2	2,8	4,8	39,4	20,1	23,1	8,6

Síťovou analýzou byla zjištěna zejména šířka jednotlivých řezů. Řezanka si i přes její výrobu drcením (šrotováním) udržuje vzdušnou buněčnou morfologii, která je zodpovědná za tepelně izolační vlastnosti. Frakce < 0,25 mohou být považovány za prášek.



**Obrázek 23:** Snímek vstupního materiálu z optického mikroskopu: (a) stonky řepky olejky (*Brassica napus*) (b) variabilita tvarů dřevní štěrpy z měkkého dřeva.

V tabulce 22 je zastoupení jednotlivých frakcí dřevní štěrpy získané síťovou analýzou. Nejzastoupenější frakce je 0,8-1,6 mm.

**Tabulka 22:** Zastoupení jednotlivých frakcí dřevní štěpky získané síťovou analýzou

Frakce (mm)	<0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-1,6	1,6-2	2-3,15	3,15-8
Zastoupení (%)	4,5	7,7	10,3	91,9	7,0	1,1	0

Pro mikrostrukturální charakteristiku vstupního materiálu - stonků řepky olejky (*Brassica napus*) a štěpky z jehličnatých stromů (měkkého dřeva, kůra byla vyselektována) od místního dodavatele (Středočeský kraj, ČR) byla provedena optická mikroskopie pomocí binokulární lupy. Na **obrázku 23a** je zobrazena struktura příčného a podélného řezu a povrchu stonku řepky. V příčném řezu je vidět specifický oválný tvar surového řepkového stonku. Detail a1 je zaměřen na dřev uvnitř stonku, detail a2 ukazuje rozhraní mezi dřevem a kůrou. Variabilita tvarů dřevní štěpky z měkkého dřeva je znázorněna na **obrázku 23b**.

### 4.2.3 Podmínky kondicionování

Všechny panely byly kondicionovány ve svislé poloze (**obrázek 24**) v laboratoři s řízenou teplotou a vlhkostí vzduchu. Podmínky v laboratoři byly nastaveny na teplotu 24 °C s relativní vlhkostí vzduchu 50 % po dobu alespoň 14 dnů před testováním.

Další kondicionování probíhalo před samotným testováním v experimentálním zařízení teplé skříně. Panel byl umístěn jako přepážka mezi chladnou a teplou komorou. Přičemž teplota vzduchu v chladné komoře teplé skříně byla nastavena na + 6 °C a teplota vzduchu v teplé komoře byla nastavena na + 24 °C po dobu 24 h.



**Obrázek 24:** Kondicionování panelů v laboratoři s řízenou teplotou a vlhkostí vzduchu

## 5 Metodika

Dosažení cílů práce je založeno na analýze naměřených tepelných vlastností u obvodových konstrukcí ve formě panelů na bázi dřeva. Na rozdíl od současného stavu měření při ustálených okrajových podmínkách (ČSN EN ISO 8990, 1998) jsou navržené konstrukce podrobeny i testování při neustálených okrajových podmínkách. Vytvoření nové metody testování při neustálených okrajových podmínkách je jedním z cílů této práce. Pro experimentální testování panelů na bázi dřeva bylo navrženo, postaveno a vyvíjeno zkušební zařízení teplé skříně pro testování stěnových panelů reálné velikosti. Pro zlepšení principu měření bylo zařízení modifikováno, jak je podrobně popsáno v podkapitole 5.1.1.

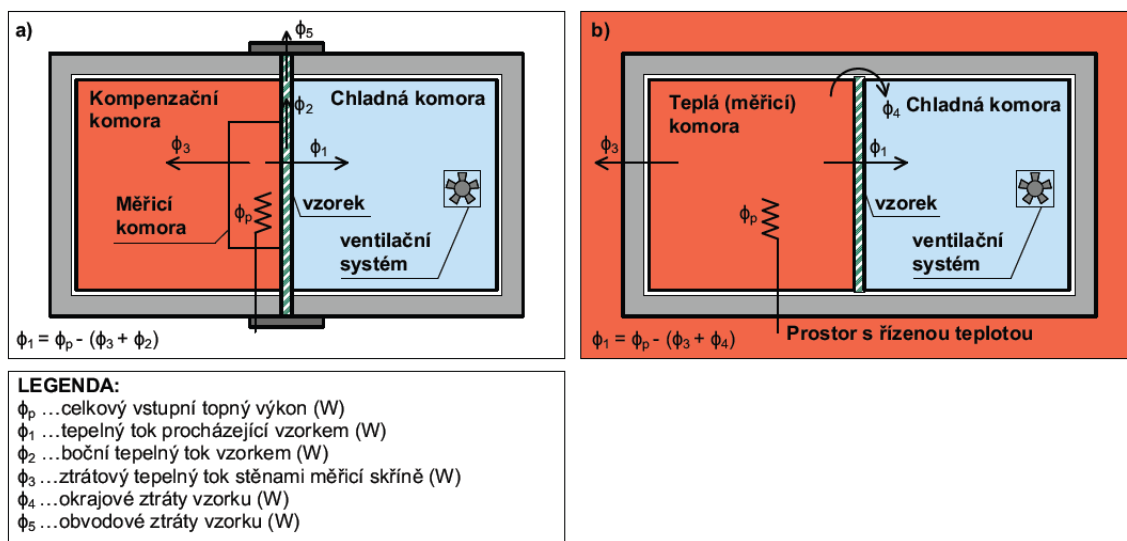
### 5.1 Metoda teplé skříně

#### 5.1.1 Princip modifikované teplé skříně

Tepelné vlastnosti testovaných stěnových panelů byly stanoveny při ustálených a neustálených okrajových podmínkách. Pro testování panelů byla použita modifikovaná metoda chráněné teplé skříně podle normy ČSN EN ISO 8990 (1998). Úprava chráněné teplé skříně byla provedena z důvodu eliminace tepelných ztrát skrze stěny teplé skříně. Teplá skříň se skládá ze dvou komor, tj. z chladné komory simulující vnější prostředí obvodové konstrukce a teplé komory simulující vnitřní prostředí. K chladné komoře je připojen chladicí systém pro udržení nízké (chladné) teploty a v teplé komoře je umístěn topný systém pro udržení vysoké (teplé) teploty. Mezi chladnou a teplou komorou je umístěn testovaný panel. Na **obrázku 25** je znázorněn rozdíl mezi chráněnou teplou skříní podle normy ČSN EN ISO 8990 (1998) a navrženou modifikovanou chráněnou teplou skříní používanou v experimentech.

Teplá skříň je umístěna v laboratoři s řízenou teplotou a vlhkostí vzduchu (HVAC) (přesnost  $\pm 0,2$  °C). Teplota v teplé (měřicí) komoře byla vždy nastavena tak, aby byla stejná jako teplota vzduchu v laboratoři (24 °C). Toto nastavení vedlo k eliminaci celkových tepelných ztrát stěnami teplé skříně - tepelný tok  $\varphi_3$  (viz. **obrázek 25b**). Z důvodu eliminace tepelného toku stěnami teplé skříně -  $\varphi_3$  není nutná kalibrace systémů. Druhou významnou výhodou navrženého řešení je minimalizace trojrozměrného šíření tepla vzorkem v ohraničující oblasti měřicí komory - tepelný tok

$\phi_2$  (viz. **obrázek 25a**), jak je tomu v případě standardizované metody chráněné teplé skříně.



**Obrázek 25:** Schéma rozdílu mezi (a) chráněnou teplou skříní (podle normy ČSN EN ISO 8990) a (b) modifikovanou chráněnou teplou skříní použitou v experimentech.

Navrhované řešení modifikované teplé skříně eliminuje tepelné ztráty přes stěnu teplé komory, a proto lze předpokládat, že tepelný tok prochází pouze vzorkem. Tepelný tok přes testovaný panel ( $\phi_1$ ) byl stanoven na základě teplotního rozdílu mezi oběma komorami. Mezera mezi testovaným panelem a teplou skříní byla vyplněna přídavnou tepelnou izolací z minerální vlny a celý obvod testovaného panelu byl opatřen vzduchotěsnou páskou a dodatečným izolačním rámečkem z expandovaného polystyrenu. Okrajové tepelné ztráty okolo vzorku ( $\phi_4$ ) byly z tohoto důvodu zanedbatelné. Kvalita utěsnění mezery byla ověřena pomocí termokamery po 12 hodinách kondicionování vzorku (**obrázek 27**). Tento postup byl proveden s každým testovaným panelem před spuštěním samotného experimentu.

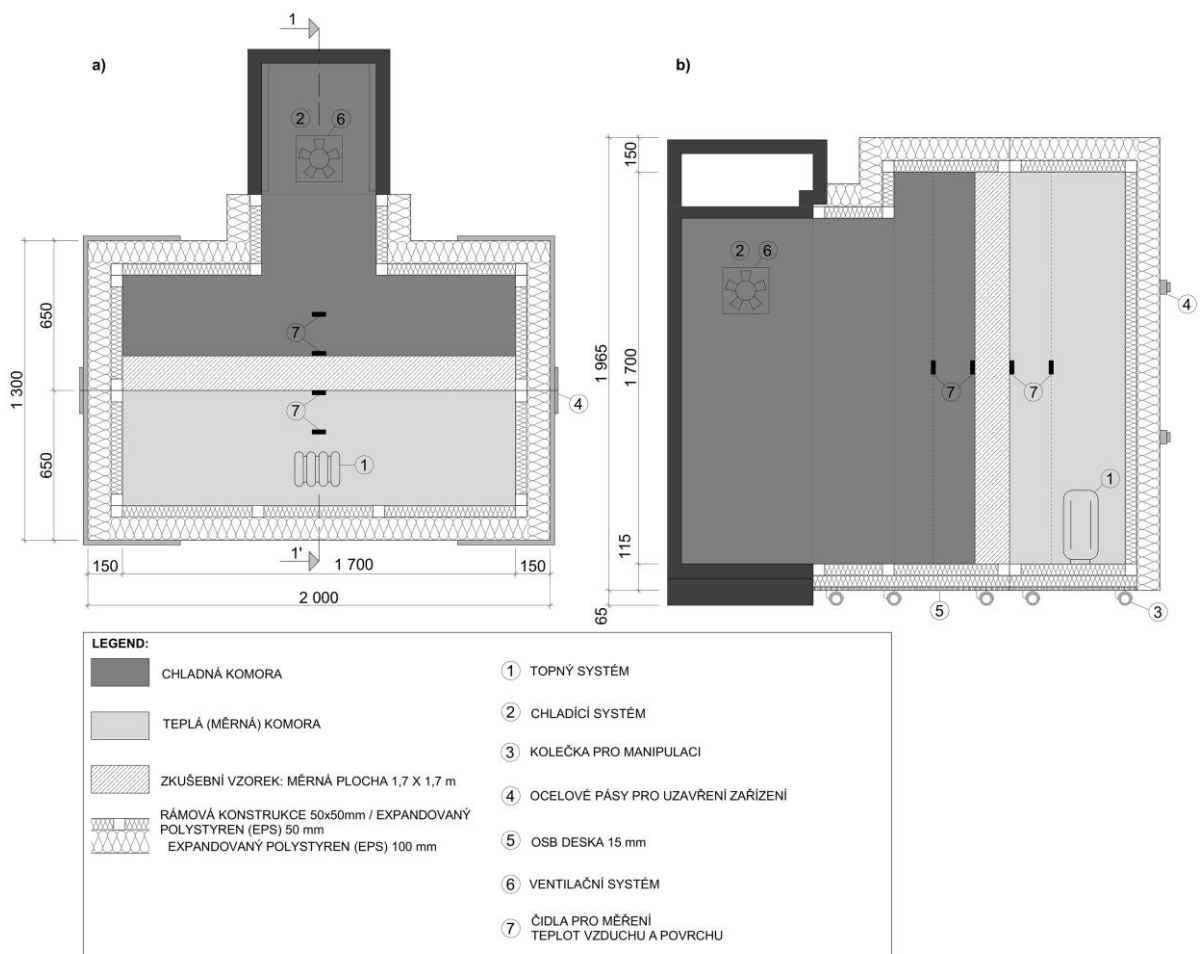
### 5.1.2 Konstrukce modifikované teplé skříně

Konstrukce a jednotlivé skladby modifikované teplé skříně společně s umístěním testovaného panelu jsou znázorněny na **obrázku 26**. Detailní výrobní výkres experimentálního zařízení je umístěn v přílohách práce. Obě komory teplé skříně byly navrženy s vnějšími rozměry  $0,65 \times 2,00 \times 1,97$  m a s přídavnou částí v chladné komoře pro připojení chladicího systému (**obrázek 26a**). Rychlost proudění vzduchu byla zajištěna pomocí ventilátoru. Digitálním anemometrem byla naměřena rychlost proudění v rozsahu  $0,3-0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na teplé straně je umístěn elektrický topný systém (o max.

výkonu 500 W) pro nastavení vysoké teploty, který je regulován panelovým PID regulátorem s přidavným termočlánkem v teplé komoře.

Konstrukce celé skříně (spodní, stropní a boční stěny) byly vyrobeny z 50 × 50 mm dřevěných hranolů vyplněných tepelnou izolací z expandovaného polystyrenu v tloušťce 50 mm. K této vrstvě byla přidána další vrstva expandovaného polystyrenu v tloušťce 100 mm pro dosažení vyšších tepelně-izolačních vlastností. Celková tloušťka tepelné izolace obvodových stěn obou komor byla 150 mm. Všechny konstrukční spoje byly vyplněny nízkoexpanzní pěnou a přelepeny vzduchotěsnou páskou. Z vnější strany je teplá skříň opatřena ochrannou folií proti mechanickému poškození.

Pro snadnější manipulaci byly obě komory vybaveny kolečky. Spoj mezi oběma komorami je opatřen těsněním. Pro uzavření celého zařízení slouží ocelové pásky. Před začátkem experimentu byla teplá skříň otevřena a testovaný panel byl umístěn mezi obě komory jako "přepážka". Měrná plocha vzorku byla 1,7 x 1,7 m.



**Obrázek 26:** Konstrukce modifikované chráněné teplé skříně a rozmístění teplotních čidel u panelu ozn. 1: (a) půdorys/horizontální řez; (b) vertikální řez 1-1'.

### 5.1.3 Měřené veličiny v modifikované teplé skříni

Během experimentálních testů byly v modifikované teplé skříni měřeny následující údaje: teploty vzduchu  $T_{ae}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a  $T_{ai}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), teploty na povrchu vzorku  $T_{se}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a  $T_{si}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), a tepelný tok  $\phi$  (W) v intervalech 1 minuty. Tepelný tok byl při neustálých okrajových podmínkách zaznamenáván jako množství tepla procházející panelem za jednotku času  $Q$  (Wh) (**tabulka 23**). Z těchto naměřených veličin bylo možné vypočítat součinitel prostupu tepla  $U$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a tepelný odpor  $R$  ( $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ) celé konstrukce.

Teplota vzduchu v teplé komoře  $T_{ai}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) byla průběžně monitorována (zaznamenávána každou minutu) jako indikace reakce vzorku na tepelný impuls.

**Tabulka 23:** Měřené veličiny v chladné a teplé komoře teplé skříně

Část teplé skříně	Měřené veličiny		Vypočtené veličiny	
<b>Chladná komora</b>	Průměrná teplota vzduchu $T_{ae}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )		Součinitel prostupu tepla $U$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )	
	Průměrná teplota na povrchu vzorku $T_{se}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
<b>Teplá komora</b>	Průměrná teplota vzduchu $T_{ai}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	Průměrná teplota na povrchu vzorku $T_{si}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	Tepelný tok $\phi$ (W)	Hustota tepelného toku $q$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )		Tepelný odpor $R$ ( $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ )
	Množství tepla za jednotku času $Q$ (Wh)	Měrné množství tepla za jednotku času $Q$ ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ )		
	Měrná plocha vzorku $A$ ( $\text{m}^2$ )			

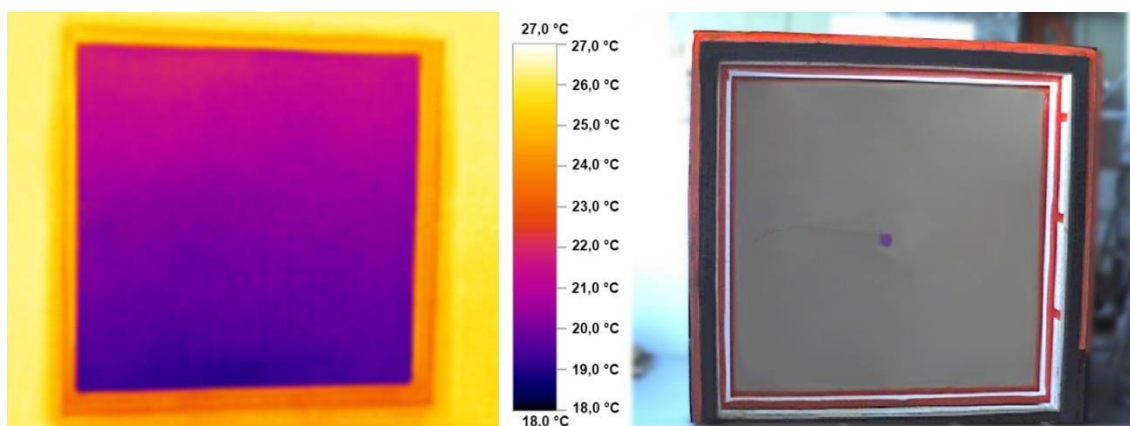
Tepelný tok byl měřen jako elektrická energie přicházející směrem k elektrickému topnému systému umístěnému uvnitř teplé komory. Tato veličina byla měřena pomocí analyzátoru výkonu Rohde & Schwarz HMC 8015 s přesností 0,05% a kontrolního analyzátoru výkonu DVH5261- M od firmy Acean Neris s přesností 0,5%.

Teploty vzduchu a teploty na povrchu vzorku byly měřeny pomocí rádiových sond Testo Saveris s čidly teploty (s přesností  $\pm 0.2$   $^{\circ}\text{C}$ ) a vlhkosti. Měřené údaje byly monitorovány pomocí báze Testo Saveris s grafickým displejem a ukládány do počítače.

Na každé straně měřeného panelu byla na povrchu umístěna teplotní čidla pro měření povrchové teploty (**obrázek 26a**). Teplota a vlhkost vzduchu byly měřeny na chladné a teplé straně 200 mm od povrchu vzorku (**obrázek 26b**).

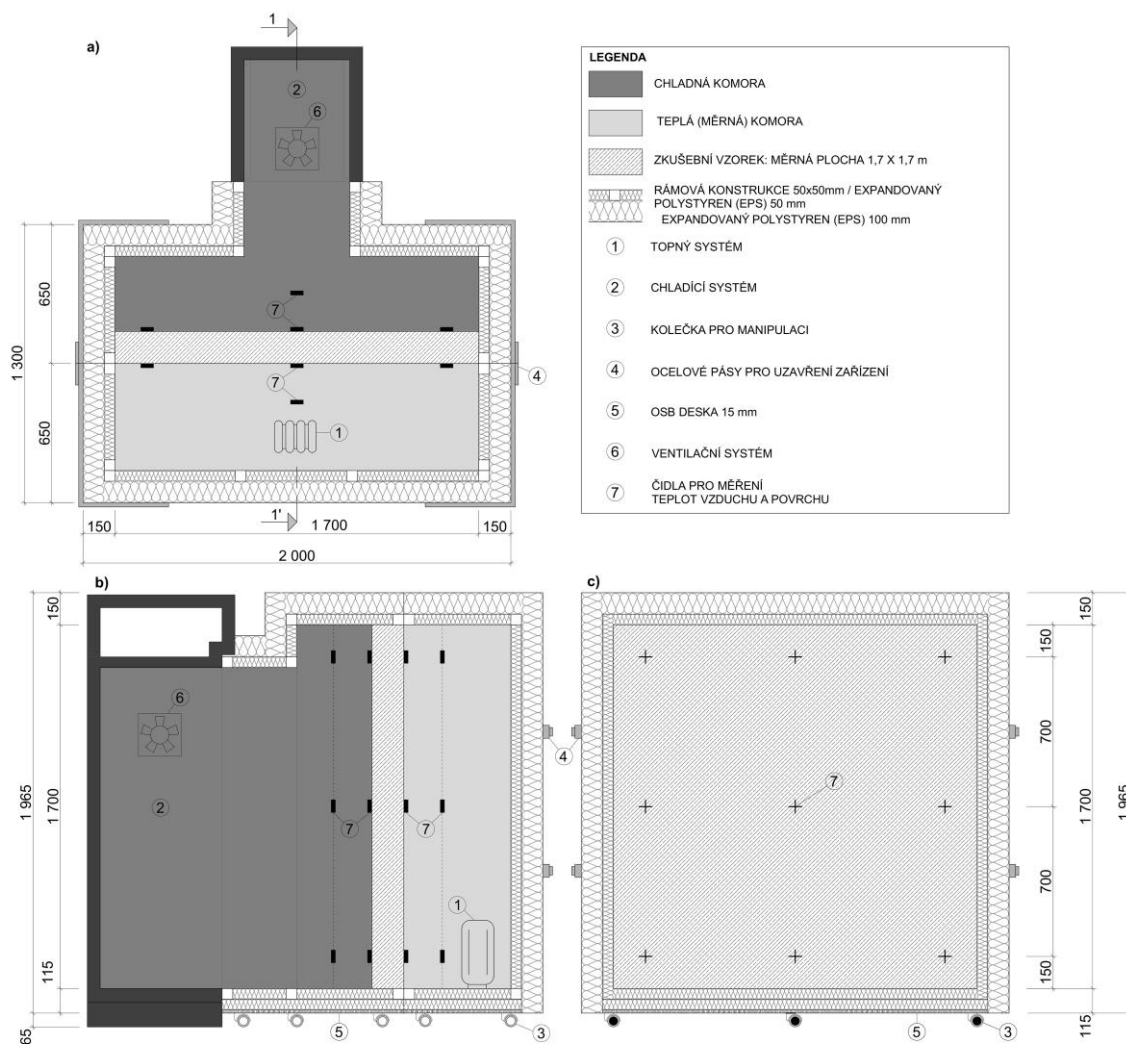


Z počátku práce bylo k dispozici omezené množství teplotních čidel, než předepisuje norma ČSN EN ISO 8990 (1998). Snížené množství teplotních čidel od Testo Saveris podporuje termografický snímek rovnoměrného rozložení teplot na povrchu testovaného panelu ozn. 1 (**obrázek 27**). Aby se dále podpořila myšlenka použití sníženého množství teplotních čidel, bylo vytvořeno teplotní pole okolo nosníku na bázi dřeva pomocí softwaru Area 2017.



**Obrázek 27:** Termografický snímek rovnoměrného rozložení teplot na povrchu testovaného panelu ozn. 1 v teplé komoře.

Dalším vývojem experimentálního zařízení modifikované chráněné teplé skříně bylo využití většího počtu teplotních čidel podle požadavků ČSN EN ISO 8990 (1998). Byla použita sběrnice inteligentních teplotních a vlhkostních čidel typu THT2 s přesností od  $\pm 0.2$  °C do  $\pm 0.4$  °C od firmy Papouch s přímým připojením k počítačové síti. Rozmístění teplotních čidel na povrchu panelu je znázorněno na **obrázku 28**.



**Obrázek 28:** Konstrukce modifikované chráněné teplé skříně a rozmístění teplotních čidel u panelů ozn. 2-9: (a) půdorys/horizontální řez; (b) vertikální řez 1-1'; (c) pohled na povrch panelu z teplé/chladné komory

## 5.2 Okrajové podmínky

### 5.2.1 Ustálené okrajové podmínky

Zkušební okrajové podmínky byly nastaveny podle požadavků normy ČSN EN ISO 8990 (1998), aby rozdíl teplot prostředí (mezi teplou a chladnou stranou panelu) byl alespoň 20 °C. Každý typ stěnového panelu byl testován za stejných podmínek při teplotě v teplé komoře  $T_{ai}$  (°C) 24 °C a teplotě v chladné komoře  $T_{ac}$  (°C) -13 °C. Rozdíl teplot mezi teplou a chladnou stranou byl 37 °C. Teplota v chladné komoře byla zvolena tak, aby její hodnota byla shodná s návrhovou teplotou venkovního vzduchu v zimním období (ČSN 73 0540-3, 2005) používanou při výpočtech součinitele prostupu tepla. Teplota v laboratoři 24 °C byla udržována stabilní vysokovýkonnou klimatizační jednotkou (přesnost ± 0,2 °C).

Měření probíhalo při ustálené teplotě vzduchu, povrchových teplotách a celkovém vstupním tepelném výkonu v měřicí skříni. Při měření byly podle ČSN EN ISO 8990 (1998) dodrženy tyto podmínky: výsledky měření tepelného odporu a součinitele prostupu tepla, tepelného toku a teplot ze dvou úspěšných po sobě jdoucích měření provedených v intervalu alespoň 3 hodiny po dosažení téměř stabilních podmínek, se nesmí lišit o více než 1% a nesmí se měnit jedním směrem. Pro zkvalitnění přesnosti měření byl zvolen 4 - hodinový interval měření ve třech po sobě jdoucích testech.

## 5.2.2 Neustálené okrajové podmínky

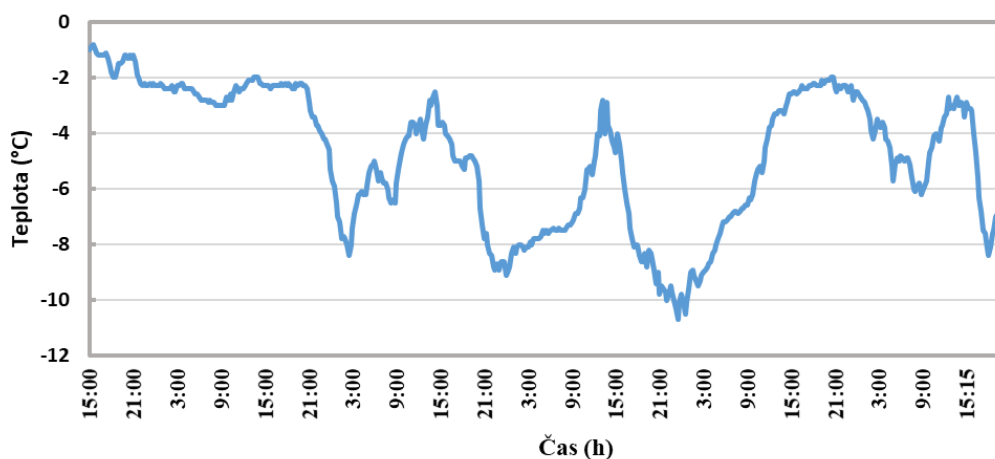
Testování při neustálených okrajových podmínkách bylo provedeno změnou teploty vnějšího vzduchu  $T_{ae}$  (°C) v chladné komoře po určitém čase. Pro testování byl zvolen sedmidenní teplotní cyklus s nastavením teploty dle **tabulky 24**.

**Tabulka 24:** Nastavení teplotních změn v chladné komoře teplé skříně během testu při neustálených okrajových podmínkách

Den	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1
Čas	16:00	16:00	9:00	9:00	9:00	9:00	16:00	9:00	16:00	začátek
Teplota (°C)	+ 6	- 13	+ 6	- 13	+ 6	- 13	- 6	- 13	+ 6	začátek
Počet hodin	24	17	24	24	24	7	17	31	24	začátek

Každý panel byl testován za stejných podmínek při teplotě v teplé komoře  $T_{ai}$  (°C) 24 °C. Teplota v laboratoři 24 °C byla udržována stabilní vysokovýkonnou klimatizační jednotkou (přesnost  $\pm 0,2$  °C). Teplota v chladné komoře  $T_{ae}$  (°C) byla řízena elektronickým regulátorem s předem nastaveným teplotním programem a pohybovala se mezi +6 °C a -13 °C v průběhu 7 dní.

Přednastavený teplotní program vycházel z průměrných reálných klimatických podmínek (**graf 2**) zaznamenaných v místní meteorologické stanici Praha-Suchdol v České republice během ledna 2017.



**Graf 2:** Průběh venkovních teplot v Praze-Suchdol (5-denní cyklus), leden 2017

Před zahájením testu byl každý testovaný panel kondicionován za předem nastavených podmínek po dobu 24 hodin, přičemž teplota vzduchu v chladné komoře teplé skříně byla udržována na 6 °C, a teplota vzduchu v teplé komoře byla udržována na 24 °C. V tabulce 24 je kondicionování označeno jako den 0.

### 5.3 Vyhodnocení tepelných vlastností

#### 5.3.1 Metoda modifikované teplé skříně

##### 5.3.1.1 Ustálené okrajové podmínky

Celkový součinitel prostupu tepla  $U_t$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) testovaného panelu je vypočten jako podíl tepelného toku  $\varphi_1$  (W) procházející skrze plochu panelu  $A$  ( $\text{m}^2$ ) kolmou na tepelný tok a rozdílu teplot vzduchu mezi teplou a chladnou stranou panelu  $T_{ai} - T_{ae}$  (K):

$$U_t = \frac{\varphi_1}{A (T_{ai} - T_{ae})} \quad (20)$$

Celkový tepelný odpor  $R_t$  ( $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ) testovaného panelu je vypočten jako obrácená hodnota součinitele prostupu tepla.

S odkazem na **obrázek 25** byl tepelný tok panelem  $\varphi_1$  (W) určen jako vstupní výkon  $\varphi_p$  (W). Tepelné toky  $\varphi_3$  a  $\varphi_4$  (W) byly ve výpočtu zanedbány. Vstupní tepelný tok v teplé komoře byl vypočítán z výkonu elektrického topného systému, který je napájen a regulován pomocí PID regulátoru (složený z proporcionální, integrační a derivační části) s přídavnou teplotní sondou v teplé komoře. Elektrická energie vystupující z PID regulátoru byla měřena pomocí analyzátoru výkonu Rohde & Schwarz HMC 8015.

Výpočet tepelné vodivosti izolační výplně sendvičových panelů (ozn. 1-4) byl založen na výpočtu tepelného odporu  $R$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ):

$$R_t = (R_{si} + \underbrace{\frac{d_{MDF}}{\lambda_{MDF}} + \frac{d_{izolační\ výplň}}{\lambda_{izolační\ výplň}} + \frac{d_{MDF}}{\lambda_{MDF}}}_R + R_{se}) \quad (21)$$

Kde  $d$  (m) je tloušťka materiálu,  $R_{si}$  je tepelný odpor při přestupu tepla na teplé straně skříně ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ),  $R_{se}$  je tepelný odpor při přestupu tepla na chladné straně skříně ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ),  $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je tepelná vodivost izolační výplně (pšeničné plevy, řepková řezanka, dřevní štěpka, minerální vlna), tepelná vodivost izolační vrstvy sendvičového panelu se vypočítá:

$$\lambda_{izolační\ výplň} = \frac{d_{izolační\ výplň}}{\left( \frac{(T_{si} - T_{se}) A}{\varphi_1} \right) - \frac{2d_{MDF}}{\lambda_{MDF}}} \quad (22)$$

Kde  $T_{si} - T_{se}$  je rozdíl povrchových teplot mezi teplou a chladnou stranou panelu (K),  $A$  je plocha panelu ( $\text{m}^2$ ),  $\varphi_1$  tepelný tok skrze panel (W), a tepelná vodivost MDF desek  $\lambda_{MDF}$  je dána výrobcem  $0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Výpočet tepelné vodivosti dřeva je založen na následujícím vztahu:

$$\lambda_{dřevo} = \frac{d_{dřevo}}{\left( \frac{(T_{si} - T_{se}) A}{\varphi_1} \right) - \frac{2d_{MDF}}{\lambda_{MDF}}} \quad (23)$$

### 5.3.1.2 Neustálené okrajové podmínky

Tepelný tok byl při neustálených okrajových podmínkách zaznamenáván jako množství tepla procházející panelem za jednotku času  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh). Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle následující rovnice:

$$Q_{\text{hledaná}} = U_{\text{hledaná}} \cdot A \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \cdot t \quad (24)$$

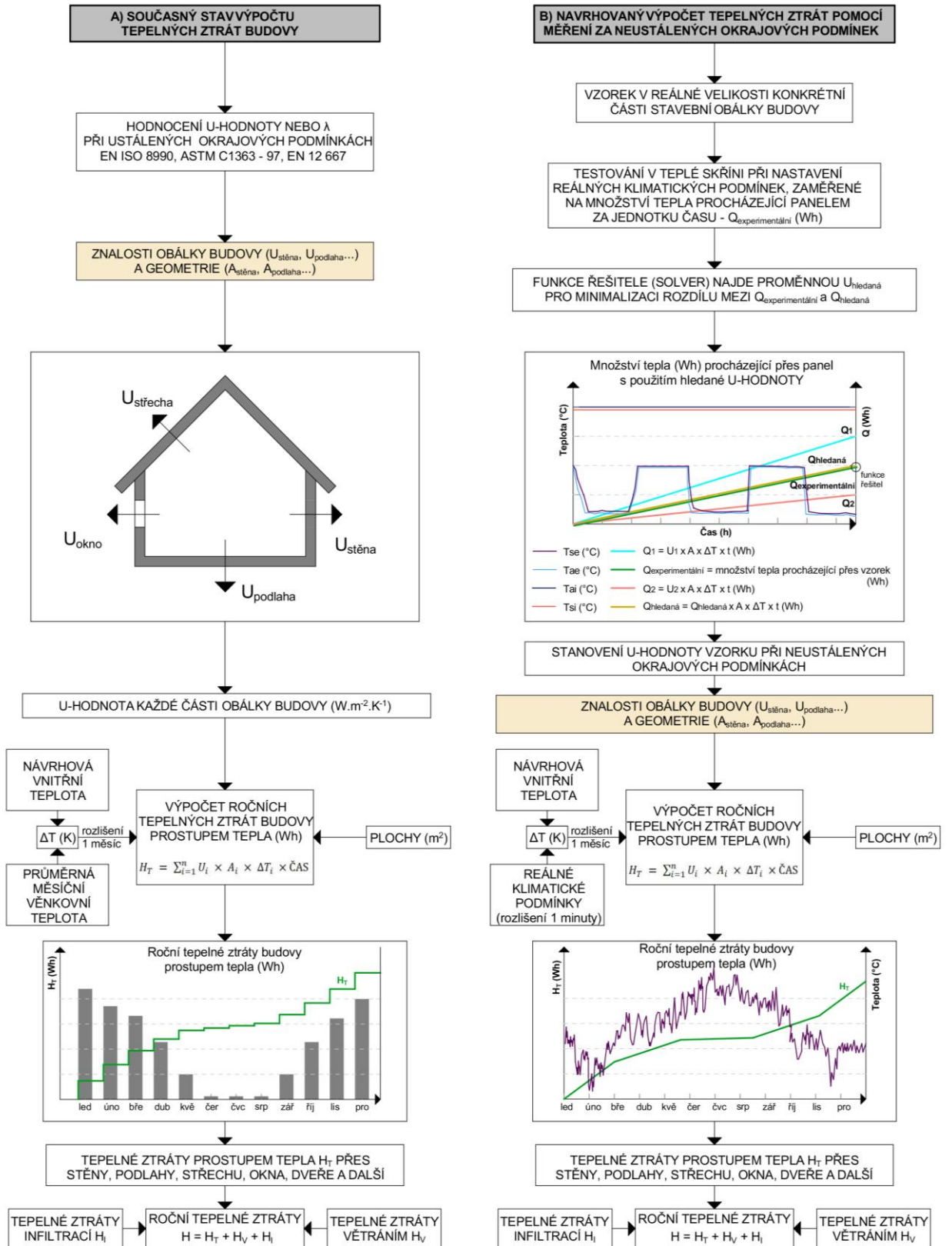
Kde  $U_{\text{hledaná}}$  je součinitel prostupu tepla ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) daný výpočtem pomocí funkce řešitel (solver),  $A$  je plocha panelu,  $T_{ai} - T_{ae}$  je rozdíl teplot vzduchu mezi teplou a chladnou stranou vzorku (K) a  $t$  je čas (h).

$$solver = \sum_{j=1}^n (Q_{hledaná,j} - Q_{experimentální,j})^2 \quad (25)$$

U panelů na bázi dřeva a panelů z keramických tvárnic standardně používaných v tuzemsku (ozn. 5-9) jsou porovnány naměřené parametry při neustálených okrajových podmínkách s parametry získanými z matematického modelu vycházejícího z ČSN EN ISO 6946 (2018) a deklarovaných hodnot součinitele tepelné vodivosti z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Získané hodnoty součinitele prostupu tepla jsou doplněny do vztahu 20 jako  $U_{deklarovaná}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ). Pomocí této hodnoty jsme schopni vypočítat množství tepla procházející panelem za jednotku času jako  $Q_{deklarovaná}$  (Wh).

$$Q_{deklarovaná} = U_{deklarovaná} \cdot A \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \cdot t \quad (26)$$

Obě metody měření při ustálených a neustálených okrajových podmínkách byly porovnány v aplikaci pro výpočet tepelných ztrát obvodové konstrukce budovy. Navrhovaný přístup výpočtu podle **obrázku 29B** přináší možnost měřit množství tepla procházející panelem za jednotku času (Wh), a najít vhodnou hodnotu součinitele prostupu tepla (ozn. U-hodnota) za použití neustálených okrajových podmínek. Tato zkušební metoda zahrnuje ve srovnání se standardizovanou metodou při ustálených okrajových podmínkách (**obrázek 29A**) skutečné klimatické podmínky měnící se v čase, měrnou tepelnou kapacitu, dobu odezvy a vliv vlhkosti.



**Obrázek 29:** (A) Současný stav standardizovaného výpočtu tepelných ztrát budovy pomocí měření za ustálených okrajových podmínek; (B) navrhovaný výpočet tepelných ztrát budovy pomocí měření za neustálených okrajových podmínek.

### 5.3.2 DSC metoda

#### Měrná tepelná kapacita

Měření měrné tepelné kapacity bylo provedeno na diferenčním skenovacím kalorimetru Mettler-Toledo Star 1 (DSC) při rychlosti ohřevu 5° C/min. Byly provedeny tři cykly, jedna s prázdnými referenčními a prázdnými miskami pro korekci asymetrie DSC, druhá s prázdnou referenční miskou a miskou naplněnou indiem pro kalibraci a jedna s prázdnou miskou a miskou naplněnou vzorkem. Po dosažení rovnovážného stavu byla tepelná kapacita stanovena z rozdílu tepelného toku z následující rovnice (ISO 11 357-4, 2014; ASTM E1269-05, 2005):

$$c_p^{sp} = c_p^{cal} \cdot \frac{m^{cal}(\varphi_{sp-r} - \varphi_{b-r})}{m^{sp}(\varphi_{c-r} - \varphi_{b-r})} \quad (27)$$

kde  $\varphi = dQ / dt$  je tepelný tok (W);  $c_p$  je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku v  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $m$  je hmotnost v kg; indexy sp-r, c-r a b-r jsou průměrný vzorek, kalibrační a prázdný chod; a horní index sp a cal jsou průměrný vzorek a kalibrační s indiem. Vzorky do 10 mg byly použity a utěsněny v 20  $\mu\text{L}$  hliníkových miskách a během testu byl udržován průtok dusíku 25 mL / min. Před měřením byla pec DSC vypálena po dobu 10 minut při 600 °C / při proudění vzduchu, aby se odstranily těkavé nečistoty. Měření byla prováděna při teplotním rozsahu 5 až 40 °C a tepelná kapacita byla stanovena jako funkce teploty. Údaje o tepelné kapacitě byly získány z druhého ohřevu po kontrolovaném chlazení. Vzorky byly použity ve formě prášku či kompaktní anatomické struktury.

#### Doba odezvy/časová konstanta

Před zahájením testování na teplé skříni byla vypočítaná doba odezvy  $\tau_s$  (h) pro odhad délky testu při neustálených teplotních podmínkách. Byla použita zjednodušená výpočetní metoda podle ASTM C1363-97 (1997):

$$\tau_s = R_t \cdot C \quad (28)$$

kde  $C$  je tepelná kapacita panelu na jednotku příčné oblasti ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) a  $R_t$  je celkový tepelný odpor panelu ( $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ). Tepelná kapacita na jednotku příčné plochy byla vypočtena z měrné tepelné kapacity získané z měření DSC a hodnota tepelného



odporu byla použita z měření při ustálených okrajových podmínkách v teplé skříni. Ve výpočtu byla zahrnuta hustota a morfologie materiálu, jejich orientace a objemová frakce v panelu. Doba odezvy  $\tau_s$  tepelného impulzu panelu byla použita pro odhad délky testu při neustálených okrajových podmínkách a pro zajištění rovnoměrného průtoku tepla přes testovaný panel pro stanovení součinitele prostupu tepla. Tepelná kapacita panelu na jednotku příčné plochy byla vypočtena podle následujícího vztahu:

$$C = c \cdot \rho \cdot d \quad (29)$$

kde  $c$  je měrná tepelná kapacita ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $\rho$  je objemová hmotnost ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a  $d$  je tloušťka panelu (m).

## 6 Výsledky

V následujícím textu jsou uvedeny výsledky získané měření metodou teplé skříně, metodou DSC a modelovým výpočtem. Jednotlivé varianty panelů jsou navzájem porovnány a navržen je obecný model popisující materiálovou skladbu a odvozené tepelně-technické vlastnosti.

Sendvičové panely (ozn. 1-4) s výplní ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) jsou porovnány se sendvičovým panelem s průmyslově vyráběnou izolační výplní z minerální vlny při ustálených a neustálených okrajových podmínkách.

V druhém okruhu byly panely dodané přímo výrobcem či zkonstruované podle návrhu výrobce (ozn. 5-9). U těchto panelů na bázi dřeva a panelu z keramických tvárníc standardně používaných v tuzemsku jsou porovnány naměřené parametry při neustálených okrajových podmínkách s parametry získanými z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540-3 (2005).

### 6.1 Experimentální měření

#### 6.1.1 Metoda teplé skříně

##### 6.1.1.1 Ustálené okrajové podmínky

Teplota vzduchu v chladné komoře  $T_{ae}$  byla nastavena na  $-13\text{ °C}$  a teplota vzduchu v teplé komoře  $T_{ai}$  byla nastavena na  $24\text{ °C}$ . Během testování při ustálených okrajových podmínkách byly zaznamenány následující údaje: povrchové teploty  $T_{se}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a  $T_{si}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), teploty vzduchu  $T_{ae}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a  $T_{ai}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a tepelný tok  $\varphi_1$  (W) v intervalech 1 minuty.

##### 1) Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev

Povrchové teploty byly během třech čtyřhodinových testů (A1-A3) konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,02\text{ °C}$  na teplé straně a  $0,20\text{ °C}$  na chladné straně. Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,02\text{ °C}$  a  $0,20\text{ °C}$  v chladné komoře (**graf 3, panel 1**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5\text{ °C}$ . Ze všech tří provedených testů byl z průměrných teplot vzduchu a tepelného toku vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Na základě těchto veličin byl

odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (pšeničných plev). Průměrný součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu byl vypočten  $0,307 \pm 0,004 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $3,263 \pm 0,040 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ . Průměrný součinitel tepelné vodivosti pšeničných plev ze všech tří měření byl vypočten  $0,048 \pm 0,001 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Podrobné údaje ze tří měření sendvičového panelu s izolační výplní z pšeničných plev jsou shrnuty v **tabulce 25**.

**Tabulka 25:** Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z pšeničných plev - měření při ustálených okrajových podmínkách

Test	Čas (h)	d (m)	A (m <sup>2</sup> )	φ <sub>1</sub> (W)	q (W.m <sup>-2</sup> )	T <sub>ae</sub> (°C)	T <sub>se</sub> (°C)	T <sub>si</sub> (°C)	T <sub>ai</sub> (°C)	R <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	U <sub>t</sub> (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	λ <sub>plevy</sub> (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
A1	4 h	0,174	2,89	29,38	10,17	-9,49	-8,01	22,47	23,79	3,274	0,305	0,048
A2	4 h	0,174	2,89	29,02	10,04	-8,42	-6,99	22,54	23,81	3,210	0,312	0,049
A3	4 h	0,174	2,89	28,16	9,74	-8,42	-7,08	22,52	23,78	3,305	0,303	0,048

## 2) Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky

Povrchové teploty byly konstantní během tří testů (B1-B3) se směrodatnou odchylkou 0,05 °C na teplé straně a 0,15 °C na chladné straně. Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla 0,02 °C a 0,20 °C v chladné komoře (**graf 3, panel 2**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5 \text{ °C}$ . Ze všech tří provedených testů byl z průměrných teplot a tepelného toku vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Na základě těchto veličin byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (řepkové řezanky). Průměrný součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu s izolační výplní z řepkové řezanky byl vypočten  $0,308 \pm 0,019 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $3,255 \pm 0,217 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ . Průměrný součinitel tepelné vodivosti řepkové řezanky ze všech tří měření byl vypočten  $0,048 \pm 0,003 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Všechny sledované údaje ze tří měření, včetně součinitele prostupu tepla a tepelného odporu sendvičového panelu s izolační výplní z řepkové řezanky jsou shrnuty v **tabulce 26**.

**Tabulka 26:** Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z řepkové řezanky - měření při ustálených okrajových podmínkách

Test	Čas (h)	d (m)	A (m <sup>2</sup> )	φ <sub>1</sub> (W)	q (W.m <sup>-2</sup> )	T <sub>ae</sub> (°C)	T <sub>se</sub> (°C)	T <sub>si</sub> (°C)	T <sub>ai</sub> (°C)	R <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	U <sub>t</sub> (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	λ <sub>řezanka</sub> (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
B1	4 h	0,174	2,89	27,81	9,62	-11,64	-8,21	21,03	22,64	3,562	0,280	0,044
B2	4 h	0,174	2,89	31,23	10,81	-10,84	-8,23	20,77	22,58	3,093	0,323	0,051
B3	4 h	0,174	2,89	30,46	10,54	-11,05	-8,26	20,07	21,74	3,111	0,321	0,049

### 3) Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky

Povrchové teploty byly konstantní během tří testů (C1-C3) se směrodatnou odchylkou 0,02 °C na teplé straně a 0,10 °C na chladné straně. Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla 0,01 °C a 0,20 °C v chladné komoře (**graf 3, panel 3**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5$  °C. Ze všech tří provedených testů byl z průměrných teplot a tepelného toku vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Na základě těchto veličin byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (dřevní štěpky). Průměrný součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu s výplní z dřevní štěpky byl vypočten  $0,403 \pm 0,010 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $2,484 \pm 0,060 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ . Průměrný součinitel tepelné vodivosti dřevní štěpky ze všech tří měření byl vypočten  $0,065 \pm 0,002 \text{ Wm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Podrobné parametry ze tří experimentálních měření jsou uvedeny v **tabulce 27**.

**Tabulka 27:** Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z dřevní štěpky - měření při ustálených okrajových podmínkách

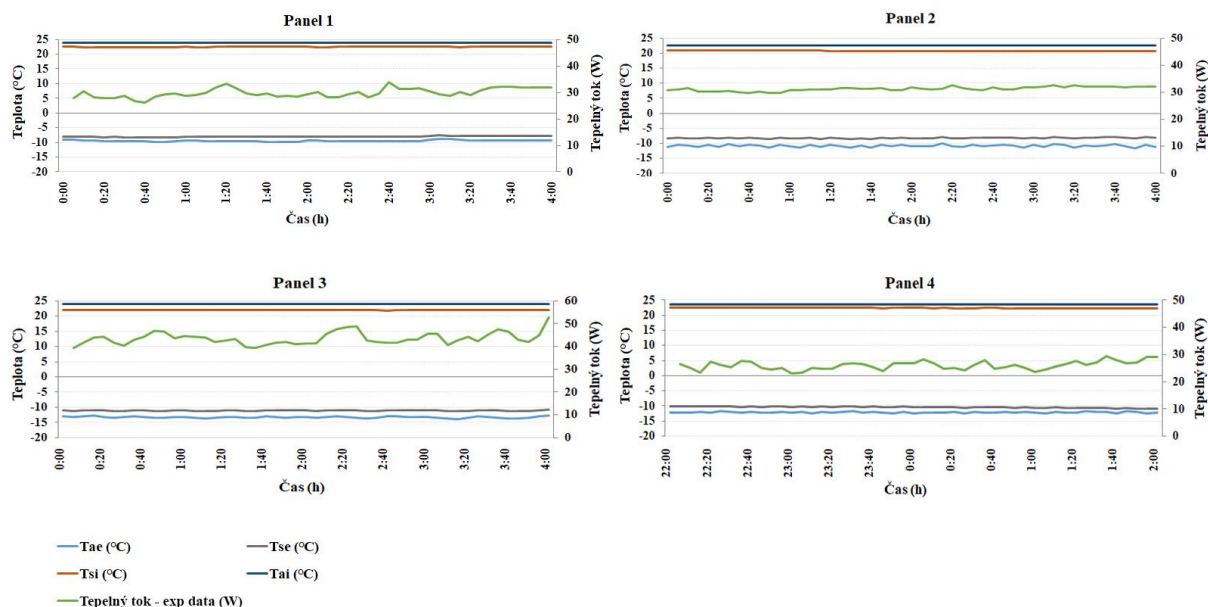
Test	Čas (h)	d (m)	A (m <sup>2</sup> )	φ <sub>1</sub> (W)	q (W.m <sup>-2</sup> )	T <sub>ae</sub> (°C)	T <sub>se</sub> (°C)	T <sub>si</sub> (°C)	T <sub>ai</sub> (°C)	R <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	U <sub>t</sub> (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	λ <sub>štěpka</sub> (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
C1	4 h	0,174	2,89	42,10	14,57	-13,41	-11,11	21,94	23,89	2,561	0,391	0,063
C2	4 h	0,174	2,89	43,44	15,03	-13,31	-11,11	21,92	23,89	2,475	0,404	0,065
C3	4 h	0,174	2,89	44,61	15,44	-13,39	-11,02	21,88	23,89	2,415	0,414	0,067

### 4) Sendvičový panel s výplní z minerální vlny

Pro porovnání výsledků izolačních panelů ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) byl testován panel stejné konstrukce s výplní z minerální vlny. Povrchové teploty byly konstantní během tří testů (D1-D3) se směrodatnou odchylkou 0,04 °C na teplé straně a 0,20 °C na chladné straně. Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla 0,02 °C a 0,20 °C v chladné komoře (**graf 3, panel 4**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5$  °C. Ze všech tří provedených testů byl z průměrných teplot a tepelného toku vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Na základě těchto veličin byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (minerální vlny). Výsledky panelu s izolační výplní z minerální vlny jsou shrnuty v **tabulce 28**. Průměrný součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu byl vypočten  $0,255 \pm 0,016 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $3,930 \pm 0,250 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ . Průměrný součinitel tepelné vodivosti minerální vlny ze všech tří měření byl vypočten  $0,040 \pm 0,003 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

**Tabulka 28:** Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla a tepelného odporu panelu s izolační výplní z minerální vlny - měření při ustálených okrajových podmínkách

Test	Čas (h)	d (m)	A (m <sup>2</sup> )	φ <sub>1</sub> (W)	q (W.m <sup>-2</sup> )	T <sub>ae</sub> (°C)	T <sub>se</sub> (°C)	T <sub>si</sub> (°C)	T <sub>ai</sub> (°C)	R <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	U <sub>t</sub> (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	λ <sub>vlna</sub> (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
D1	4 h	0,174	2,89	25,85	8,94	-12,10	-10,40	22,37	23,53	3,983	0,251	0,039
D2	4 h	0,174	2,89	24,40	8,44	-11,92	-10,99	22,38	23,60	4,207	0,238	0,037
D3	4 h	0,174	2,89	28,58	9,89	-12,12	-11,58	22,28	23,49	3,601	0,278	0,044

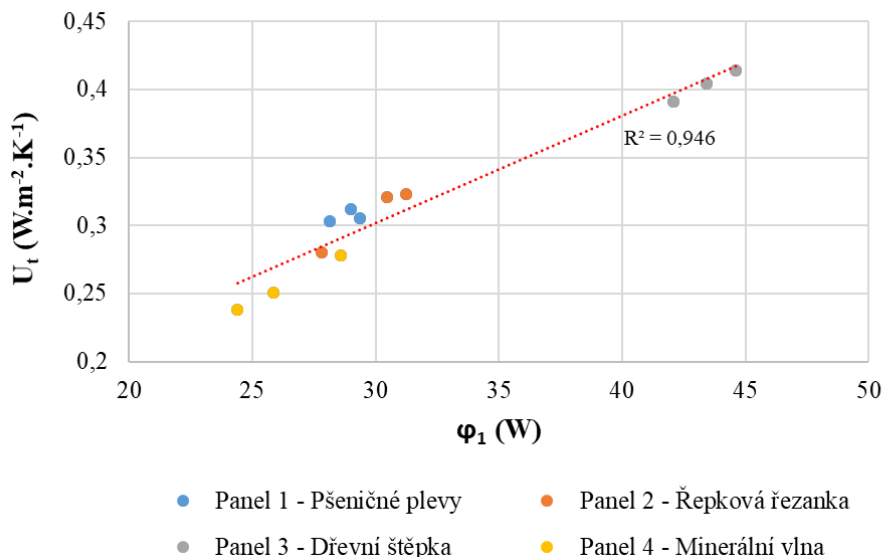


**Graf 3:** Průběh tepelného toku a teploty při ustálených okrajových podmínkách u panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů (ozn. 1-4): (1) pšeničné plevy (test A1 v tabulce 25), (2) řepková řezanka (test B2 v tabulce 26), (3) dřevní štěpka (test C2 v tabulce 27), (4) minerální vlna (test D1 v tabulce 28), T<sub>ae</sub> = teplota vzduchu v chladné komoře, T<sub>ai</sub> = teplota vzduchu v teplé komoře, T<sub>se</sub> = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře a T<sub>si</sub> = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře.

Výsledky čtyř nezávislých měření porovnávající tepelné vlastnosti stěnových panelů s izolační výplní z pšeničných plev (ozn. 1), řepkové řezanky (ozn. 2), dřevní štěpky (ozn. 3) a minerální vlny (ozn. 4) při ustálených okrajových podmínkách jsou znázorněny v **grafu 3**. V **grafu 3** jsou znázorněny následující údaje: povrchové teploty T<sub>se</sub> (°C) a T<sub>si</sub> (°C), teploty vzduchu T<sub>ae</sub> (°C) a T<sub>ai</sub> (°C) a tepelný tok φ<sub>1</sub> (W) v intervalech 1 minuty. Výsledkem je (a) srovnání tepelných vlastností panelů navzájem, (b) závislost součinitele prostupu tepla na naměřeném tepelném toku a (c) závislost součinitele tepelné vodivosti na materiálových vlastnostech (tj. objemová hmotnost izolační výplně).

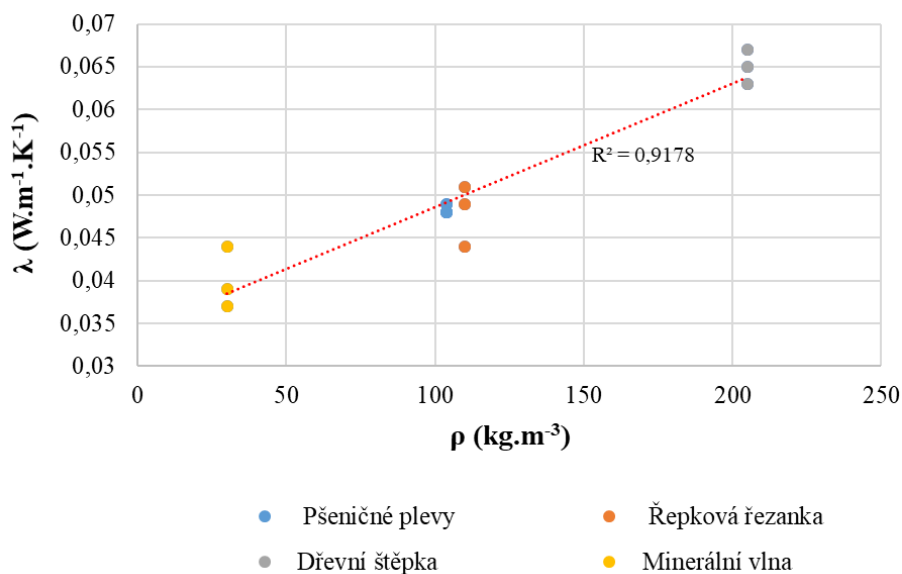
Výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla u sendvičových panelů (ozn. 1-4) při ustálených okrajových podmínkách jsou velmi rozdílné (**graf 3**). Experimentální měření ukázalo nejnižší hodnotu součinitele prostupu tepla (0,255 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) pro sendvičový panel s výplní z minerální vlny (ozn. 4). Srovnatelné výsledky byly zaznamenány u sendvičových panelů s výplní z pšeničných plev (ozn. 1) (0,307 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) a řepkové

řezanky (ozn. 2) ( $0,308 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). U sendvičového panelu s výplní z dřevní štěpky (ozn. 3) byla z naměřených dat vypočtena nejvyšší hodnota ( $0,403 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) ze všech čtyř panelů. Srovnání jednotlivých panelů je znázorněno v **grafu 4**, jako závislost celkového součinitele prostupu tepla na tepelném toku.



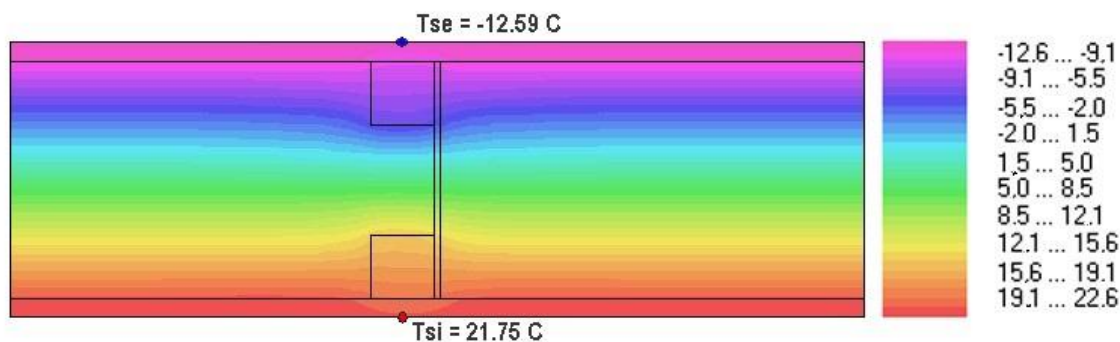
**Graf 4:** Závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku u panelů ozn. 1-4 při ustálených okrajových podmínkách

Z **grafu 4** vyplývá, že závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku je lineární (koeficient determinace  $R^2 = 0,946$ ). Z výsledných hodnot součinitele prostupu tepla u sendvičových panelů (ozn. 1-4) při ustálených okrajových podmínkách byl vypočten součinitel tepelné vodivosti izolační výplně. Experimentální měření ukázalo nejnižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti ( $0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro izolační výplň z minerální vlny. Srovnatelné výsledky byly zaznamenány u izolačních výplní z pšeničných plev ( $0,048 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a řepkové řezanky ( $0,048 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). U izolační výplně z dřevní štěpky byla z naměřených dat vypočtena nejvyšší hodnota ( $0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) ze všech čtyřech materiálů. Rozdílné výsledky jsou dány rozdílnými objemovými hmotnostmi a anatomickou strukturou (tzn. u sypaných materiálů frakcí) izolačních výplní. Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti izolační výplně je znázorněna v **grafu 5**.



**Graf 5:** Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti izolační výplně u panelů ozn. 1-4 při ustálených okrajových podmínkách

Z grafu 5 vyplývá, že závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti není zcela lineární (koeficient determinace  $R^2 = 0,9178$ ). Do výsledných hodnot součinitele prostupu tepla, tepelného odporu a součinitele tepelné vodivosti byla zahrnuta hodnota lineárního činitele prostupu tepla  $\psi$  přes nosník na bázi dřeva. **Obrázek 30** detailně ukazuje dvourozměrné teplotní pole napříč stěnou panelu v blízkosti vnitřního vyztužovacího prvku (nosník na bázi dřeva). Lineární činitel prostupu tepla  $\psi$  přes nosník na bázi dřeva byl vypočten pomocí softwaru Area podle ČSN EN ISO 10 211 (2018) (typická přesnost  $\pm 5\%$ ). Lineární činitel prostupu tepla byl stanoven jako  $\psi = 0,003 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Takto nízká hodnota byla příčinou rovnoměrného rozložení teploty na vnějším povrchu panelu v teplé komoře, jak je patrné z **obrázku 27**. Nicméně tato hodnota byla zahrnuta do výsledných hodnot součinitele prostupu tepla, tepelného odporu a tepelné vodivosti.



**Obrázek 30:** Teplotní pole 2D okolo ztužujícího nosníku na bázi dřeva

### 6.1.1.2 Neustálené okrajové podmínky

Testování při neustálených okrajových podmínkách bylo provedeno změnou teploty vzduchu  $T_{ae}$  (°C) v chladné komoře po určitém čase v průběhu sedmi dní. Teplota vzduchu v chladné komoře se pohybovala mezi +6 °C a -13 °C, jak je patrné z **tabulky 24**. Teplota vzduchu v teplé komoře  $T_{ai}$  (°C) byla nastavena na 24 °C. Během testování při neustálených okrajových podmínkách byly zaznamenány následující údaje: povrchové teploty  $T_{se}$  (°C) a  $T_{si}$  (°C), teploty vzduchu  $T_{ae}$  (°C) a  $T_{ai}$  (°C) a množství tepla procházející panelem za jednotku času  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) v intervalech 1 minuty.

#### 1) Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou 0,34 °C. Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla 0,09 °C (**graf 6, panel 1**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5$  °C. Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření 3 721,4 Wh. Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota 23,2 W. Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) byla vypočtena pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Z tepelného odporu byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (pšeničných plev). Celkový součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu vyplněného izolací z pšeničných plev byl vypočten  $0,298 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a celkový tepelný odpor byl  $3,356 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Hodnota součinitele tepelné vodivosti pšeničných plev byla vypočtena  $0,047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

#### 2) Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou 0,29 °C. Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla 0,33 °C (**graf 6, panel 2**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5$  °C. Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření 3 330,2 Wh. Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota 20,7 W. Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24).



Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) byla vypočtena pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Z tepelného odporu byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (řepkové řezanky). Celkový součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu vyplněného izolací z řepkové řezanky byl vypočten  $0,271 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a celkový tepelný odpor byl  $3,690 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Hodnota součinitele tepelné vodivosti řepkové řezanky byla vypočtena  $0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

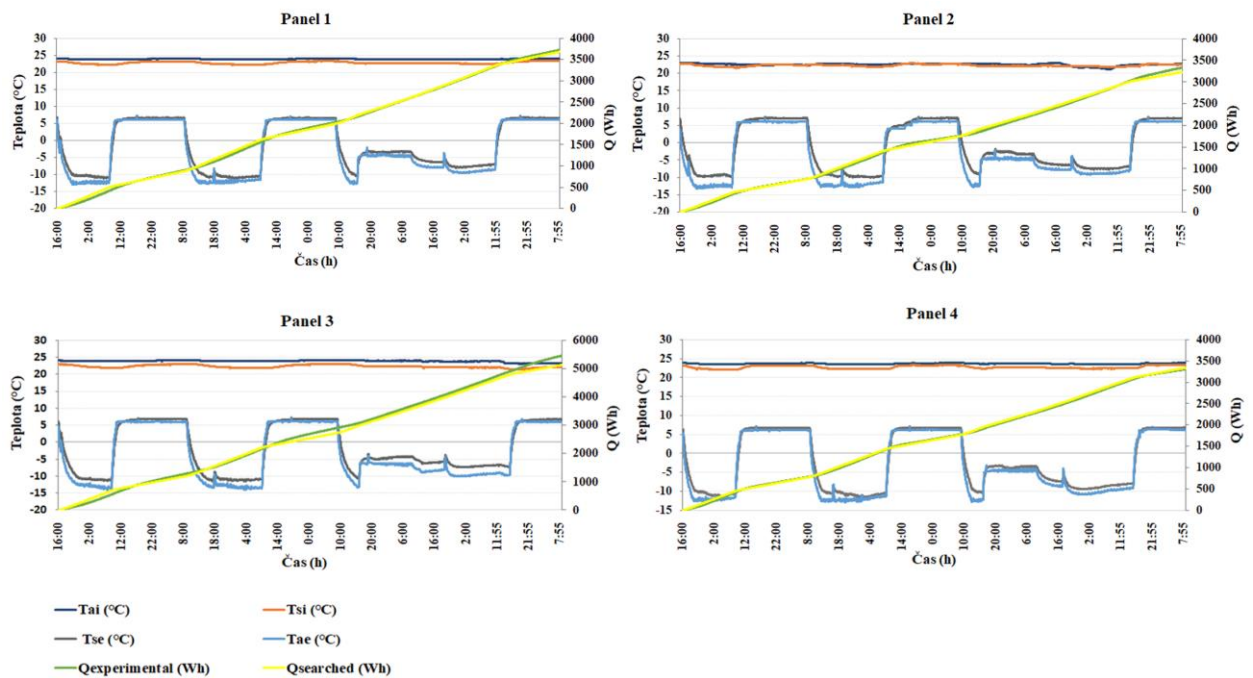
### 3) Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,42 \text{ }^\circ\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,27 \text{ }^\circ\text{C}$  (**graf 6, panel 3**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $5\,454,9 \text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $33,96 \text{ W}$ . Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Z tepelného odporu byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (dřevní štěpky). Celkový součinitel prostupu tepla sendvičového panelu vyplněného izolací z dřevní štěpky byl vypočten  $0,404 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a tepelný odpor byl  $2,475 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Hodnota součinitele tepelné vodivosti dřevní štěpky byla vypočtena  $0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

### 4) Sendvičový panel s výplní z minerální vlny

Pro porovnání výsledků izolačních panelů ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) byl testován panel stejné konstrukce s výplní z minerální vlny. Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,38 \text{ }^\circ\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,13 \text{ }^\circ\text{C}$  (**graf 6, panel 4**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $3\,303,4 \text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $20,6 \text{ W}$ . Množství tepla procházející

panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Z tepelného odporu byl odvozen součinitel tepelné vodivosti izolační výplně panelu (minerální vlny). Celkový součinitel prostupu tepla celého sendvičového panelu vyplněného izolací z minerální vlny byl  $0,267 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a tepelný odpor byl  $3,745 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ . Hodnota součinitele tepelné vodivosti minerální vlny byla vypočtena  $0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

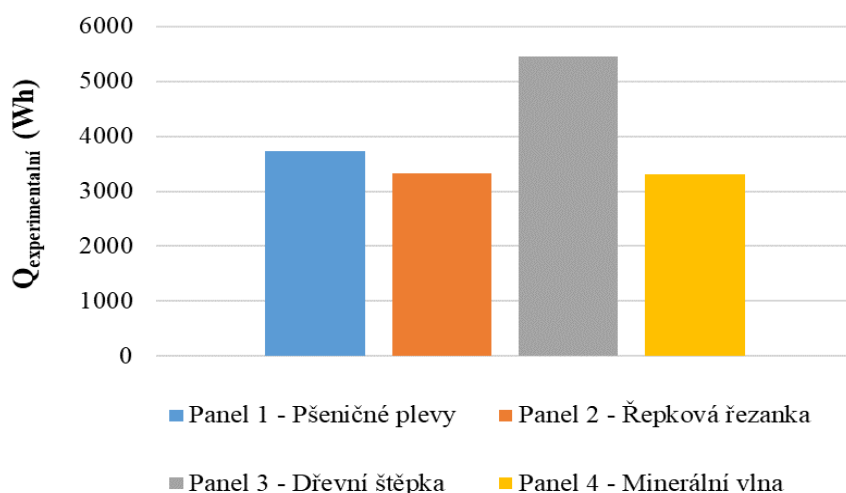


**Graf 6:** Průběh množství tepla procházející panelem s použitím hledané  $U$ -hodnoty a teplot při neustálených okrajových podmínkách u panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů (ozn. 1-4);  $T_{ae}$  = teplota vzduchu v chladné komoře,  $T_{ai}$  = teplota vzduchu v teplé komoře,  $T_{se}$  = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře,  $T_{si}$  = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře,  $Q_{\text{experimentální}}$  = množství tepla procházející panelem za jednotku času (Wh),  $Q_{\text{hledaná}}$  = vypočtené množství tepla procházející panelem pomocí hledané  $U$ -hodnoty danou funkcí solver (Wh).

Výsledky čtyř nezávislých měření porovnávající tepelné vlastnosti stěnových panelů s izolační výplní z pšeničných plev (ozn. 1), řepkové řezanky (ozn. 2), dřevní štěpky (ozn. 3) a minerální vlny (ozn. 4) při neustálených okrajových podmínkách jsou znázorněny v **grafu 6**. V **grafu 6** jsou znázorněny následující údaje: povrchové teploty  $T_{se}$  (°C) a  $T_{si}$  (°C), teploty vzduchu  $T_{ae}$  (°C) a  $T_{ai}$  (°C) a množství tepla procházející panelem za jednotku času  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) v intervalech 1 minuty. Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané podle rovnice 24 a vyneseno do **grafu 6** jako  $Q_{\text{hledaná}}$ .

Výsledkem je (a) srovnání tepelných vlastností panelů navzájem, (b) závislost součinitele prostupu tepla na naměřeném množství tepla procházející panelem a (c) závislost součinitele tepelné vodivosti na materiálových vlastnostech (tj. objemová hmotnost izolační výplně).

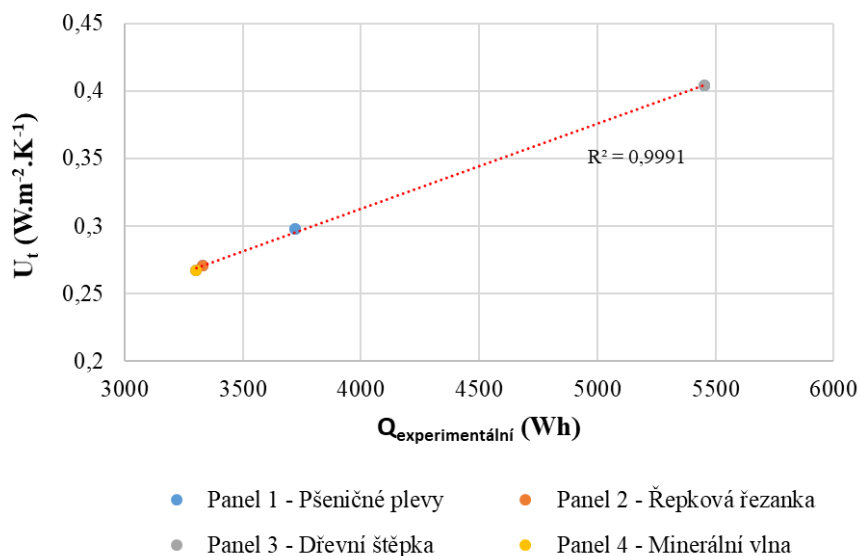
Teplota vzduchu v teplé komoře  $T_{ai}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) byla průběžně monitorována (zaznamenávána každou minutu) jako indikace reakce vzorku na tepelný impuls. Hlavní výsledky těchto testů při neustálených okrajových podmínkách jsou křivky popisující množství tepla procházející testovaným panelem za jednotku času. V **grafu 6** je také znázorněn cyklus automatického rozmrazování chladicího systému přibližně po 12 hodinách. Srovnání množství tepla procházející panelem u panelů ozn. 1-4 je znázorněno v **grafu 7**.



**Graf 7:** Srovnání měřeného množství tepla procházejícího panelem  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) u panelů ozn. 1-4 při neustálených okrajových podmínkách

Při měření za neustálených okrajových podmínek byly naměřené hodnoty srovnatelné u sendvičových panelů s výplní ze zemědělského odpadu (**graf 6**) tj. pšeničných plev ( $0,298 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ), řepkové řezanky ( $0,271 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a průmyslově vyrobené tepelné izolaci z minerální vlny ( $0,267 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Sendvičový panel s výplní z dřevní štěrky vykazoval ve srovnání s těmito panely vyšší hodnotu součinitele prostupu tepla ( $0,404 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). To může být způsobeno dvojnásobnou sypnou objemovou hmotností dřevní štěrky ( $205 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) v panelu oproti pšeničným plevám ( $104 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a řepkové řezance ( $110 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Proto by bylo vhodné testovat panely se stejnou objemovou hmotností a frakcí materiálu, popř. od každého panelu testovat různé objemové hmotnosti a jejich závislost na tepelných vlastnostech. Srovnání jednotlivých panelů je znázorněno

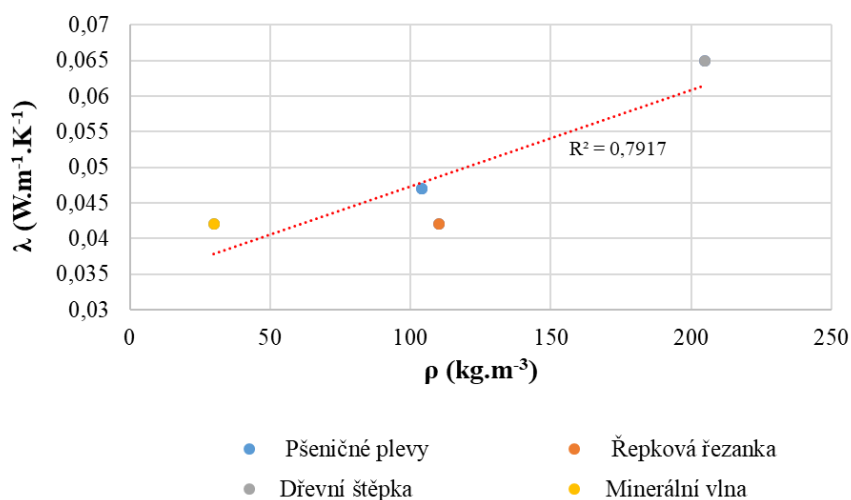
v **grafu 8**, jako závislost celkového součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem.



**Graf 8:** Závislost součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem u panelů ozn. 1-4 při neustálených okrajových podmínkách

Z **grafu 8** vyplývá, že závislost součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem je lineární (koeficient determinace  $R^2 = 0,9991$ ). Z výsledných hodnot součinitele prostupu tepla u sendvičových panelů (ozn. 1-4) při neustálených okrajových podmínkách byl vypočten součinitel tepelné vodivosti izolační výplně. Experimentální měření ukázalo srovnatelné hodnoty u izolační výplně z pšeničných plev ( $0,047 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ), řepkové řezanky ( $0,042 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ) a průmyslově vyrobené tepelné izolace z minerální vlny ( $0,042 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ). Izolační výplň z dřevní štěpky vykazovala ve srovnání s těmito materiály vyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti ( $0,065 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ). To může být způsobeno dvojnásobnou sypanou objemovou hmotností dřevní štěpky ( $205 \text{ kg.m}^{-3}$ ) v panelu oproti pšeničným plevám ( $104 \text{ kg.m}^{-3}$ ) a řepkové řezance ( $110 \text{ kg.m}^{-3}$ ).

Rozdílné výsledky jsou dány rozdílnými objemovými hmotnostmi a anatomickou strukturou (tzn. u sypaných materiálů frakcí) izolačních výplní. Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti izolační výplně je znázorněna v **grafu 9**.



**Graf 9:** Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti izolační výplně u panelů ozn. 1-4 při neustálených okrajových podmínkách

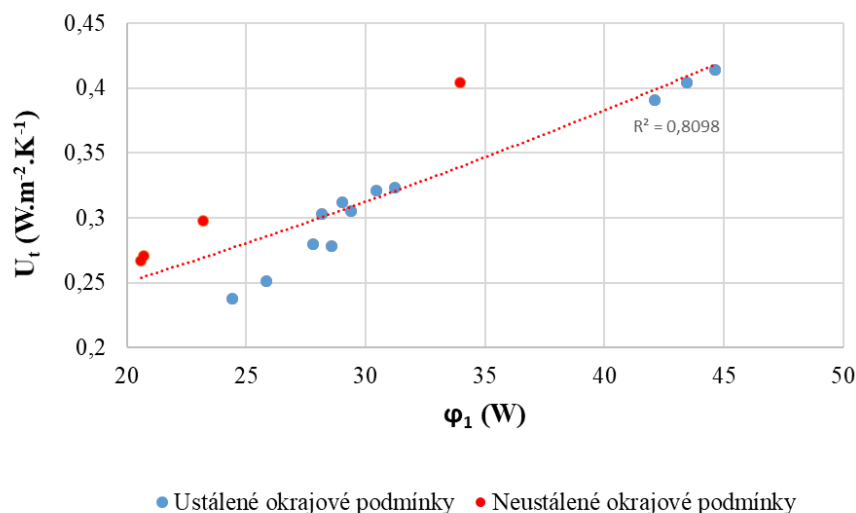
Z grafu 9 vyplývá, že závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti není zcela lineární (koeficient determinace  $R^2 = 0,7917$ ). To může být dáno různými frakcemi izolačního materiálu v panelu a různými formami sdílení tepla v panelu. U všech testovaných panelů byly naměřené hodnoty součinitele prostupu tepla při ustálených a neustálených okrajových podmínkách rozdílné (**tabulka 29**).

**Tabulka 29:** Srovnání hodnot součinitele prostupu tepla stěnových panelů ozn. 1-4 naměřených při ustálených a neustálených okrajových podmínkách

Okruh stěnových panelů	Typ stěnového panelu	Tloušťka panelu d (m)	Součinitel prostupu tepla $U_t$ (W.m <sup>2</sup> .K <sup>-1</sup> )	
			Ustálené okrajové podmínky	Neustálené okrajové podmínky
<b>I. Panely na bázi dřeva dle vlastních návrhů</b>	1) Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev	174	0,307	0,298
	2) Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky	174	0,308	0,271
	3) Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky	174	0,403	0,404
	4) Sendvičový panel s výplní z minerální vlny	174	0,255	0,267

Součinitel prostupu tepla u panelu s výplní z minerální vlny byl po týdenním měření při neustálených okrajových podmínkách o 5 % vyšší ve srovnání s měřením při ustálených okrajových podmínkách, zatímco u panelu s výplní z pšeničných plev vykazoval o 3 % nižší hodnotu a u panelu s výplní s řepkovou řezankou vykazoval o 12 % nižší hodnotu. Součinitel prostupu tepla panelu s výplní s dřevní štěpkou vykazoval o

0,3 % vyšší hodnotu. V **grafu 10** je znázorněno porovnání součinitele prostupu tepla naměřeného při ustálených a neustálených okrajových podmínkách.



**Graf 10:** Srovnání naměřených hodnot součinitele prostupu tepla u panelů ozn. 1-4 při ustálených a neustálených okrajových podmínkách u panelu

Z **grafu 10** vyplývá, že závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku není lineární (koeficient determinace  $R^2 = 0,8083$ ). To může být dáno vlivem přestupu tepla z okolí do panelu a různými formami sdílení tepla v panelu. Dále to může být vlivem rozdílné objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity izolačních materiálů, které souvisí s dobou odezvy (akumulací tepla) panelu při neustálených okrajových podmínkách. Pro spojnici trendu byla v **grafu 10** použita polynomičká funkce.

### 5) Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,65 \text{ }^\circ\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,23 \text{ }^\circ\text{C}$  (**graf 11, panel 5**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $4\,920,1 \text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $25,7 \text{ W}$ . Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Z tepelného odporu byl odvozen součinitel tepelné vodivosti rostlého dřeva. Celkový součinitel prostupu tepla panelu byl vypočten  $0,339 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  a

průměrný tepelný odpor byl  $2,950 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Hodnota součinitele tepelné vodivosti dřeva byla vypočtena  $0,068 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

### 6) Panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT)

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,64 \text{ }^\circ\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,12 \text{ }^\circ\text{C}$  (**graf 11, panel 6**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $11\,131,1 \text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $58,1 \text{ W}$ . Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Z tepelného odporu byl odvozen součinitel tepelné vodivosti rostlého dřeva. Celkový součinitel prostupu tepla panelu byl vypočten  $0,807 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $1,239 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Hodnota součinitele tepelné vodivosti dřeva byla vypočtena  $0,068 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

### 7) Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,10 \text{ }^\circ\text{C}$  (**graf 11, panel 7**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $2\,867,6 \text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $14,96 \text{ W}$ . Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Celkový součinitel prostupu tepla panelu byl vypočten  $0,204 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a celkový tepelný odpor byl  $4,902 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ .

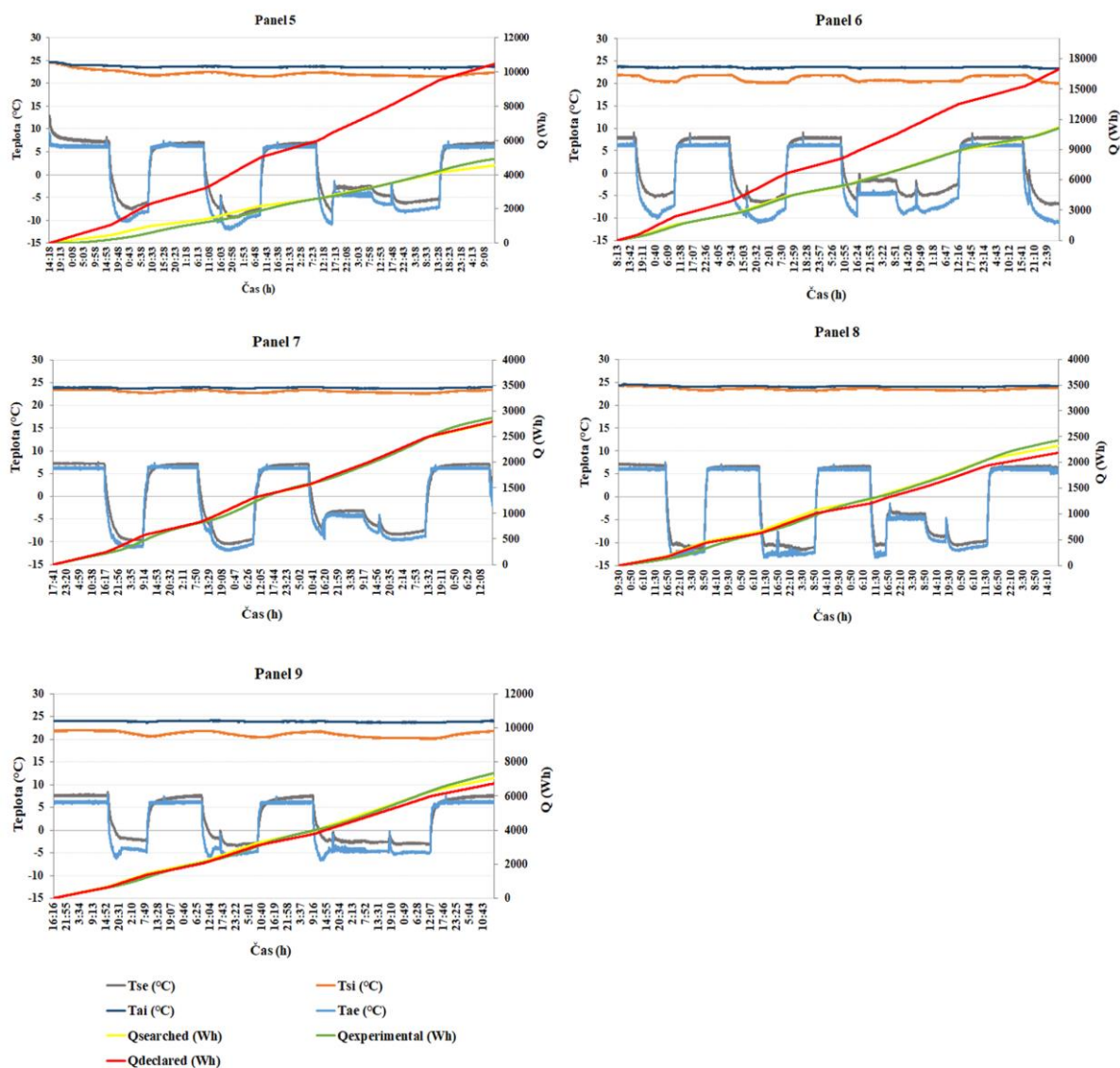
### 8) Panel rámové dřevostavby s izolační výplní

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (**graf 11, panel 8**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $2\,429,3\text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $12,7\text{ W}$ . Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Celkový součinitel prostupu tepla panelu byl vypočten  $0,162\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $6,173\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ .

### 9) Panel z keramických tvárnic Porotherm

Povrchové teploty na teplé straně byly během týdenního testování v teplé skříni konstantní se směrodatnou odchylkou  $0,59\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Směrodatná odchylka od průměrné teploty vzduchu v teplé komoře byla  $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (**graf 11, panel 9**). Laboratorní pokojová teplota byla udržována kontinuálně při  $24 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Celkové množství tepla  $Q_{\text{experimentální}}$  bylo po týdenním měření  $7\,349,6\text{ Wh}$ . Po přepočtu na aktuální tepelný tok je hodnota  $38,4\text{ W}$ . Množství tepla procházející panelem za jednotku času bylo také vypočítané jako  $Q_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) pro každou minutu podle rovnice (24). Hodnota součinitele prostupu tepla  $U_{\text{hledaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) byla dána výpočtem pomocí funkce řešitel (solver). Na základě těchto veličin byl vypočten součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Celkový součinitel prostupu tepla panelu byl vypočten  $0,560\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a průměrný tepelný odpor byl  $1,786\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ .





**Graf 11:** Průběh množství tepla procházející panelem s použitím hledané U-hodnoty a teplot při neustálených okrajových podmínkách u panelů na bázi dřeva dodaných od výrobců (ozn. 5-9);  $T_{ae}$  = teplota vzduchu v chladné komoře,  $T_{ai}$  = teplota vzduchu v teplé komoře,  $T_{se}$  = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře,  $T_{si}$  = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře,  $Q_{\text{experimentální}}$  = množství tepla procházející panelem za jednotku času (Wh),  $Q_{\text{hledaná}}$  = vypočtené množství tepla procházející panelem pomocí hledané U-hodnoty danou funkcí solver a  $Q_{\text{deklarovaná}}$  = vypočtené množství tepla s použitím deklarované U-hodnoty.

Výsledky pěti nezávislých měření porovnávající tepelné vlastnosti stěnových panelů: roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5), z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6), zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7), rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8) a z keramických tvárníc Porotherm (ozn. 9) při neustálených okrajových podmínkách jsou znázorněny v **grafu 11**.

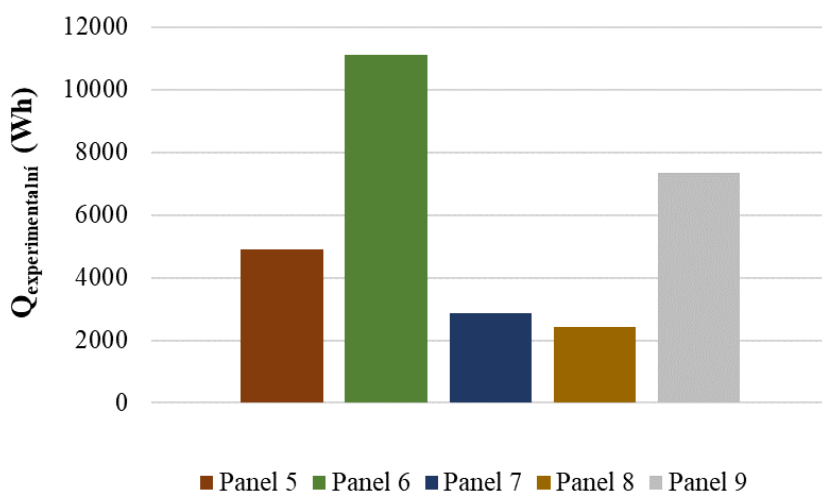
V **grafu 11** jsou znázorněny následující údaje: povrchové teploty  $T_{se}$  (°C) a  $T_{si}$  (°C), teploty vzduchu  $T_{ae}$  (°C) a  $T_{ai}$  (°C) a množství tepla procházející panelem za jednotku času  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) v intervalech 1 minuty. Množství tepla procházející

panelem za jednotku času bylo také vypočítané podle rovnice 24 a vyneseno do **grafu 11** jako  $Q_{\text{hledaná}}$ .

Výsledkem je (a) srovnání tepelných vlastností panelů navzájem, (b) závislost součinitele prostupu tepla na naměřeném množství tepla procházející panelem a (c) stanovení součinitele tepelné vodivosti dřeva.

Teplota vzduchu  $T_{\text{ai}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) v teplé komoře byla průběžně monitorována (zaznamenávána každou minutu) jako indikace reakce vzorku na tepelný impuls. Hlavní výsledky těchto testů při neustálených okrajových podmínkách jsou křivky popisující množství tepla procházející testovaným panelem za jednotku času. V **grafu 11** je také znázorněn cyklus automatického rozmrazování chladicího systému přibližně po 12 hodinách.

Z prezentovaných grafů je patrné mnoho překvapivých výsledků. Nejvíce význačný výsledek je dán měřením celkového množství tepla procházející přes panely v **grafu 11**. Srovnání množství tepla procházející panelem u panelů ozn. 5 - 9 je znázorněno v **grafu 12**.



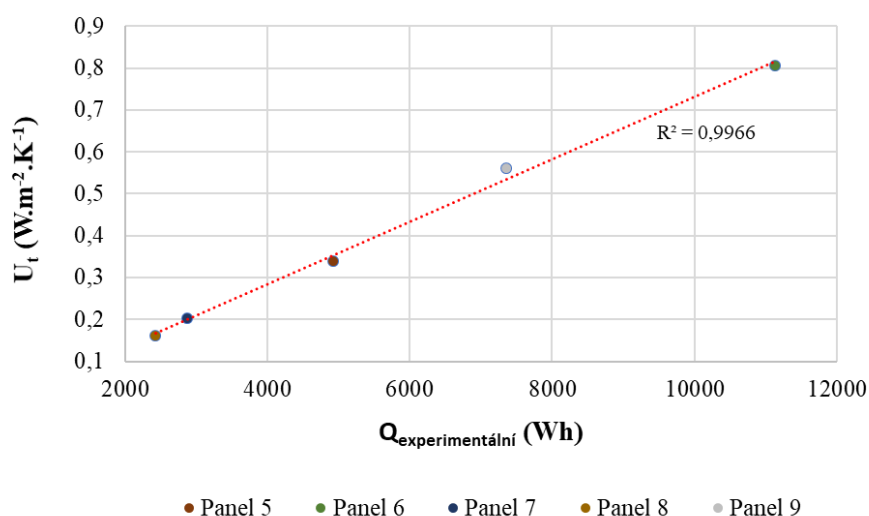
**Graf 12:** Srovnání měřeného množství tepla procházejícího panelem  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) u panelů ozn. 5 - 9

Měření celkového množství tepla procházející testovaným panelem od počátku testu  $Q_{\text{experimentální}}$  (Wh) ve srovnání s vypočítanými hodnotami podle modelu  $Q_{\text{deklarovaná}}$  (Wh) vycházejícího z ČSN EN ISO 6946 (s deklarovanými hodnotami součinitele tepelné vodivosti z ČSN 73 0540-3) a hledanou hodnotou  $E_{\text{hledaná}}$  (Wh) pomocí proměnné  $U$ -hodnoty poskytuje velmi podobné křivky.

Doba odezvy (h) na změnu teploty nemá příliš velký vliv na celkové množství tepla procházející panelem (Wh), které je téměř lineární na rozdíl od tepelného toku (W)

v reálném čase. Toto chování nabízí jednoduchou metodu měření součinitele prostupu tepla panelu při neustálených okrajových podmínkách. Cílová hodnota  $U_{\text{hledaná}}$  byla zjištěna pomocí funkce solver (MS Excel), která umožňuje minimalizovat rozdíl mezi hledanou a naměřenou hodnotou celkového množství tepla ( $Q_{\text{experimentální}}$  a  $Q_{\text{hledaná}}$ ).

Při měření za neustálených okrajových podmínek byly naměřené hodnoty nejvíce srovnatelné u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7) ( $0,204 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8) ( $0,162 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Ostatní panely vykazovaly ve srovnání s těmito panely vyšší hodnotu součinitele prostupu tepla. To je způsobeno zejména rozdílnou tloušťkou panelů a druhem použitého izolačního materiálu. U panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5) byla hodnota součinitele prostupu tepla  $0,339 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6) byla hodnota vyšší, tj.  $0,807 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tloušťka dřeva u panelu ozn. 5 byla 200 mm oproti panelu ozn. 6, kde byla tloušťka 84 mm. U panelu z keramických tvárnic Porotherm s tloušťkou 300 mm byla výsledná hodnota  $0,56 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Srovnání jednotlivých panelů je znázorněno v **grafu 13**, jako závislost celkového součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem.



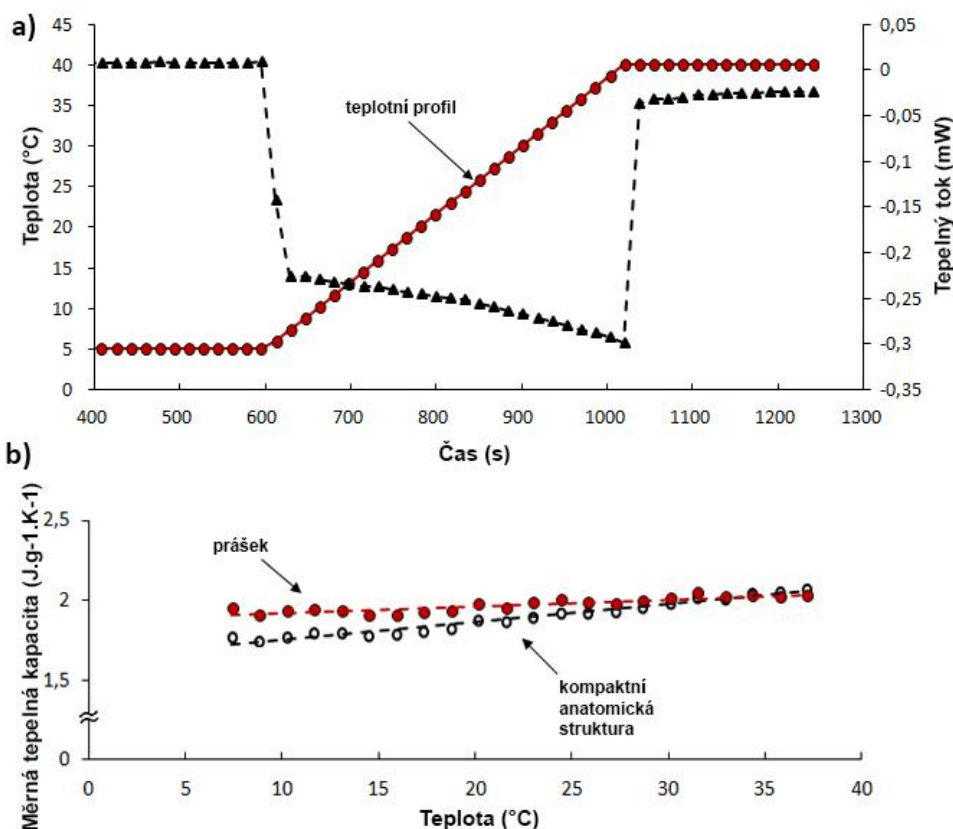
**Graf 13:** Závislost součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem u panelů ozn. 5-9 při neustálených okrajových podmínkách

Z **grafu 13** vyplývá, že závislost součinitele prostupu tepla na množství tepla procházející panelem je lineární (koeficient determinace  $R^2 = 0,9966$ ). Z výsledných hodnot součinitele prostupu tepla u panelů (ozn. 5-6) při neustálených okrajových podmínkách byl vypočten součinitel tepelné vodivosti dřeva. Experimentální měření ukázalo srovnatelné hodnoty u obou panelů z masivního dřeva ( $0,068 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) i přesto,

že se jedná o různé konstrukční typy: panel 5 charakterizuje roubenou stěnu z lepených smrkových profilů s tloušťkou 200 mm a panel 6 charakterizuje stěnu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) s tloušťkou 84 mm.

### 6.1.2 DSC metoda

Teplotní program DSC měření a odpovídající tepelný tok skrze vzorek pro stanovení hodnot měrné tepelné kapacity je znázorněn v **grafu 14a**. Měření bylo provedeno na pšeničných plevách ve formě prášku, aby se odstranil účinek anizotropní anatomické struktury. Dále bylo provedeno měření na kompaktní anatomické struktuře kolmo na tepelný tok. V **grafu 14b** jsou zobrazeny výsledky v teplotním rozmezí 5-40 °C. Ze stejného obrázku je patrné, že měrná tepelná kapacita je rostoucí se vzrůstající teplotou jak pro formu prášku, tak pro kompaktní anatomickou strukturu.



**Graf 14:** (a) Teplotní profil metody aplikované na pšeničné plevy pro stanovení měrné tepelné kapacity; (b) měrná tepelná kapacita jako funkce teploty pro pšeničné plevy ve formě prášku a ve formě kompaktní anatomické struktury

Průměrné hodnoty měrné tepelné kapacity kompaktní anatomické struktury plev jsou nižší než hodnoty u prášku, přibližně až do teploty přibližně 30 °C. Od teploty 30 °C

je výsledek opačný. Průměrná měrná tepelná kapacita při 25 °C byla 1,8 kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pro kompaktní anatomickou strukturu a 1,9 kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pro prášek. Testované vzorky byly předem vysušeny k vyloučení vlivu obsahu vlhkosti na stanovení měrné tepelné kapacity. Pro stanovení tepelné kapacity na jednotku příčné plochy  $C = 54,6 \text{ kJ.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$  a přibližného celkového tepelného odporu  $R_t = 3,3 \text{ m}^2\text{.K.W}^{-1}$  byla použita měrná tepelná kapacita, hustota a tloušťka panelu. Doba odezvy panelu s izolační výplní z pšeničných plev byla vypočtena  $\tau_s = 49,5$  hodiny. V každém případě doba odezvy v heterogenních stěnách závisí nejen na celkovém tepelném odporu a tepelné kapacitě, ale také na uspořádání různých materiálů s odlišnými tepelnými vlastnostmi ve skladbě panelu.

## 6.2 Optimalizace naměřených parametrů

U všech testovaných panelů byla optimalizována hodnota součinitele prostupu tepla naměřená při neustálených okrajových podmínkách. Součinitel prostupu tepla celé konstrukce slouží jako hodnotící kritérium, který určuje tepelně izolační vlastnosti stavební obálky budovy. Byla měněna tloušťka materiálové skladby pro dosažení požadovaných a doporučených návrhových hodnot podle závazných požadavků normy ČSN 73 0540-2 (2011).

Požadavky na jednotlivé energetické standardy jsou uvedeny v kapitole 3.1.1. V této kapitole budou optimalizovány parametry naměřené vlastní metodou modifikované teplé skříně při neustálených okrajových podmínkách z **tabulky 30** s požadavky na součinitel prostupu tepla dle normy ČSN 73 0540-2 (2011) v **tabulce 31**.

**Tabulka 30:** Hodnoty součinitele prostupu tepla stěnových panelů naměřených při neustálených okrajových podmínkách

Okruh stěnových panelů	Typ stěnového panelu	Tloušťka panelu d (m)	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
<b>I.</b> Panely na bázi dřeva dle vlastních návrhů	1) Sendvičový panel s výplní z pšeničných plev	174	0,298
	2) Sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky	174	0,271
	3) Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky	174	0,404
	4) Sendvičový panel s výplní z minerální vlny	174	0,267
<b>II.</b> Panely (na bázi dřeva) dodané od výrobců	5) Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů	200	0,339
	6) Panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT)	84	0,807
	7) Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů	280	0,204
	8) Panel rámové dřevostavby s izolační výplní	293	0,162
	9) Panel z keramických tvárníc Porotherm	300	0,560

Pro standardní budovy je v normě ČSN 73 0540-2 (2011) uvedena požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla pro vnější stěnu. Pro pasivní budovy je zde uvedena doporučená hodnota pro vnější stěnu. U nízkoenergetických budov je hodnotící kritérium průměrný součinitel prostupu tepla celé obálky budovy (zahrnuje vnější stěnu, strop, podlahu, výplně otvorů), tudíž není možné toto kritérium vztahovat na obvodovou konstrukci ve formě vnější stěny.

**Tabulka 31:** Hodnoty součinitele prostupu tepla pro vnější stěnu s převažující návrhovou vnitřní teplotou budovy v intervalu 18 až 22° (ČSN 73 0540-2, 2011)

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla $U$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	
	Požadovaná hodnota pro standardní budovy	Doporučená hodnota pro pasivní budovy
Stěna vnější	0,30	0,18 až 0,12

U panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů (ozn. 1-4) vyhovuje požadované hodnotě součinitel prostupu tepla pro standardní budovy ( $0,3 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) sendvičový panel s izolační výplní z pšeničných plev (ozn. 1), řepkové řezanky (ozn. 2) a minerální vlny (ozn. 4). Sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky (ozn. 3) této hodnotě

nevyhovuje. Možností optimalizace by bylo navýšení tloušťky izolační výplně ze 150 mm na 210 mm. Nutno podotknout, že objemová hmotnost dřevní štěpky v panelu je téměř dvojnásobná ( $205 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) oproti objemové hmotnosti pšeničných plev ( $104 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a řepkové řezanky ( $110 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Pro dosažení požadované hodnoty součinitele prostupu tepla by bylo vhodné použít stejnou objemovou hmotnost a frakci materiálu jako u panelů s výplní ze zemědělského odpadu. Další možností je použití dodatečné izolační vrstvy z vnější strany.

Pro dosažení spodní hranice doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla pro pasivní budovy ( $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) by musela být navýšena tloušťka izolační výplně u všech panelů na bázi dřeva dle vlastních návrhů (ozn. 1-4). U izolační výplně z pšeničných plev na 250 mm, u řepkové řezanky a minerální vlny na 220 mm a u dřevní štěpky na 370 mm. U panelů ozn. 1-3 by bylo dále vhodné testovat různé objemové hmotnosti a frakce izolační výplně v závislosti na tepelných vlastnostech.

U panelů dodaných od výrobců (ozn. 5-9) vyhovuje požadované hodnotě součinitele prostupu tepla pro standardní budovy panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7) a panel rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8). Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5), panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6) a panel z keramických tvárnic Porotherm (ozn. 9) této hodnotě nevyhovuje. Možností optimalizace by bylo navýšení tloušťky dřeva u panelu roubené stěny ze smrkových profilů na 230 mm a u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva na 250 mm. U panelu z keramických tvárnic Porotherm by musela být navýšena tloušťka tvárnic na 580 mm.

U panelů z masivního dřeva (ozn. 5 a 6) by byla také varianta v použití vnějšího zateplovacího systému z dodatečné tepelné izolace. Panel z keramických tvárnic Porotherm Profi Dryfix v tloušťce 300 mm se pro dosažení požadované hodnoty součinitele prostupu tepla standardně používá v kombinaci s vnější tepelnou izolací. Pro vnější stěnu by bylo možné použít jiný typ tvárnice s lepšími tepelnými vlastnostmi. Spodní hranici doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla pro pasivní budovy splňuje pouze panel rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8). U ostatních panelů (ozn. 5, 6, 7, 9) by musela být navýšena tloušťka izolační výplně. U panelu roubené stěny ze smrkových profilů by musela být tloušťka 390 mm, u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva 410 mm a u panelu zateplené roubené stěny by postačilo zvýšit tloušťku vrstvy tepelné izolace z minerální vlny ze 140 mm na 160 mm. U panelu z keramických tvárnic Porotherm by bylo navyšování tloušťky tohoto typu tvárnice

nevýhodné, proto bych doporučoval zvolit jiný typ tvárnice od této firmy nebo panel opatřit dodatečnou vnější vrstvou tepelné izolace.

### **6.3 Matematický model**

Matematický model byl proveden na základě vztahů vycházejících z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) a deklarovaných hodnot tepelně technických vlastností materiálů z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Matematický model byl vytvořen pouze pro stěnové panely ozn. 5-9, u kterých je známá hodnota součinitele tepelné vodivosti, ze které je možné vypočítat tepelný odpor resp. součinitel prostupu tepla celé konstrukce. Pro stěnové panely ozn. 1-3 (4) byly použity nové izolační materiály, jejichž součinitel tepelné vodivosti není uveden v dostupné literatuře ani normě. Grafické znázornění matematického modelu bylo vytvořeno pomocí softwaru Area 2017 (Svoboda software). Výstupem je vizualizace je dvourozměrného stacionárního pole teplot a průběhu izoterm.

#### **6.3.1 Okrajové podmínky**

Okrajové podmínky modelu vychází z normy ČSN 73 0540-3 (2005) a ustáleného teplotního stavu. Tyto okrajové podmínky slouží pro porovnání naměřených dat při neustálených okrajových podmínkách a snaží se kriticky zhodnotit současný stav tepelně-technického hodnocení obvodových konstrukcí při ustálených okrajových podmínkách (v současnosti využívaných u stavební praxe). Pro grafické znázornění modelu byly ustálené okrajové podmínky nastaveny do softwaru Area. Porovnání naměřených dat při neustálených okrajových podmínkách a modelu založeného na ustálených okrajových podmínkách bude umístěno v diskuzi této práce.

Do modelu byly nastaveny okrajové podmínky pro Prahu, která se nachází v teplotní oblasti 1. Návrhová teplota venkovního vzduchu v zimním období je  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Návrhová vnitřní teplota vzduchu v zimním období u obytných, trvale užívaných budov je  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ČSN 73 0540-3, 2005). Teplotní oblasti jsou podrobně rozepsány v kapitole 3.3.2.5. V případě těchto okrajových podmínek udává norma ČSN EN ISO 6946 (2018) tepelné odpory při přestupu tepla. V případě řešených stěnových panelů se jedná o vodorovný směr tepelného toku. Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce  $R_{si}$  je  $0,13\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$  a tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce  $R_{se}$  je  $0,04\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ .



### 6.3.2 Model teplotního pole v konstrukci

#### 5) Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů

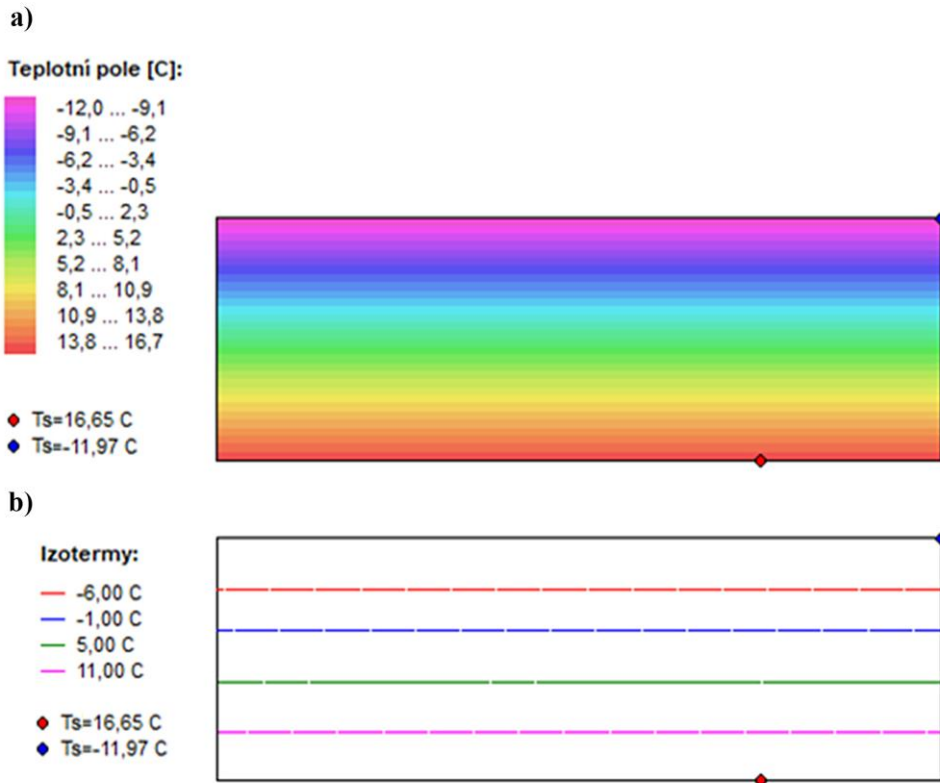
Panel roubené smrkové stěny z lepených smrkových profilů je tvořen lepenými smrkovými profily BSH, které tvoří 200 mm tloušťku stěny. Hodnota součinitele tepelné vodivosti pro měkké (jehličnaté) dřevo s orientací vláken kolmo na tepelný tok je převzata z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Výsledný součinitel prostupu tepla panelu 5 je  $0,781 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (**tabulka 32**).

**Tabulka 32:** Součinitel prostupu tepla u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5)

Skladba panelu	Tloušťka d (m)	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Lepené smrkové profily BSH 200 x 180 mm	0,200	0,18 *	0,781

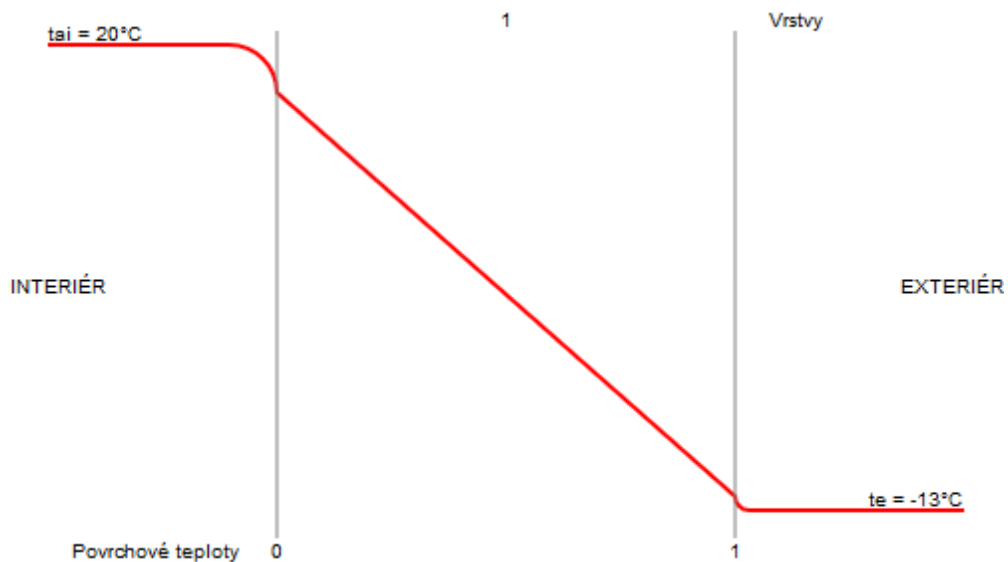
\* do výpočtu byla použita hodnota  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  podle ČSN 73 0540-3 (2005)

Výpočet součinitele prostupu tepla byl proveden podle ČSN EN ISO 6946 (2018), tato hodnota byla ověřena také softwarem Area. Na **obrázku 31** je vykresleno teplotní pole a průběh izoterm u panelu ozn. 5.



**Obrázek 31:** (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5)

Na **obrázku 32** je znázorněn teplotní gradient u panelu ozn. 5 mezi vnější a vnitřní návrhovou teplotou.



**Obrázek 32:** Teplotní gradient u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5)

## 6) Panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT)

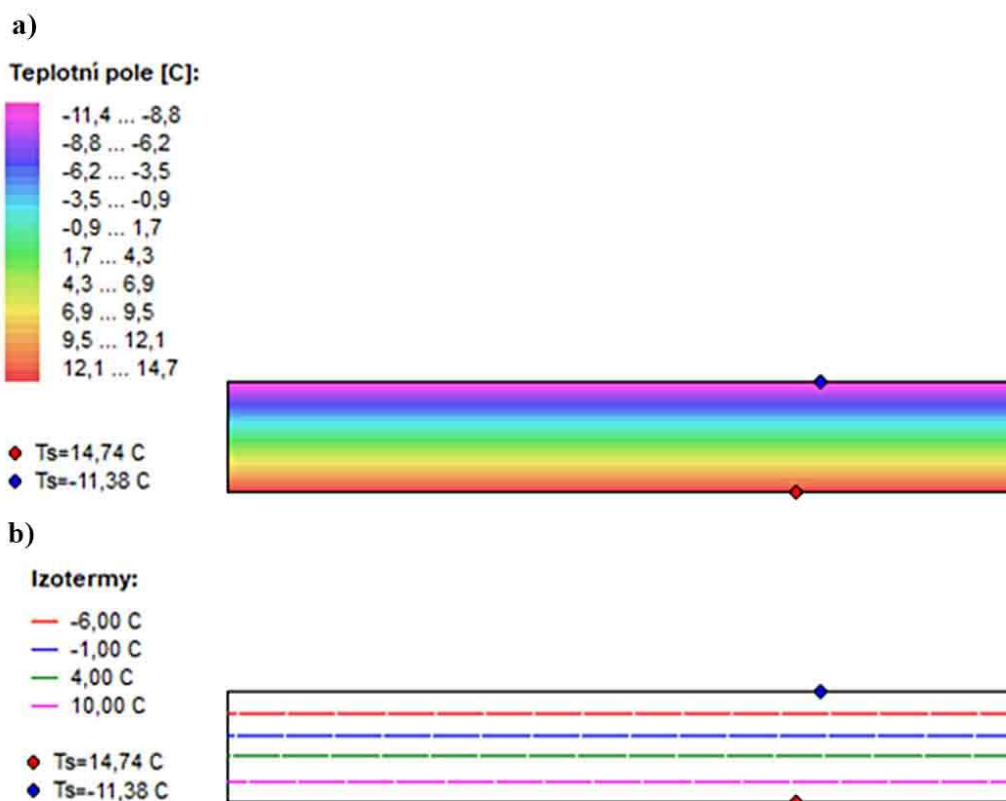
Panel z křížem lepeného lamelového dřeva tvoří 84 mm stěnu. Hodnota součinitele tepelné vodivosti pro měkké (jehličnaté) dřevo s orientací vláken kolmo na tepelný tok je převzata od výrobce Novatop. Výsledný součinitel prostupu tepla panelu 6 je  $1,225 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (tabulka 33).

**Tabulka 33:** Součinitel prostupu tepla u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6)

Skladba panelu	Tloušťka d (m)	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Křížem lepené lamelové dřevo CLT - Novatop Solid	0,084	0,13 *	1,225

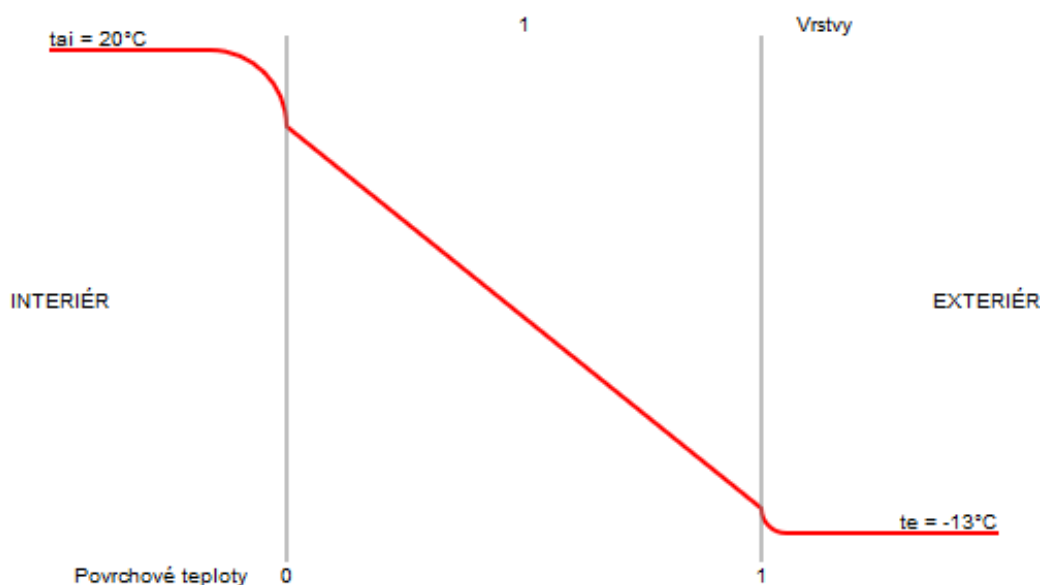
\* do výpočtu byla použita hodnota  $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , tato hodnota je deklarovaná výrobcem Novatop

Výpočet součinitele prostupu tepla byl proveden podle ČSN EN ISO 6946 (2018), tato hodnota byla ověřena také softwarem Area. Na **obrázku 33** je vykresleno teplotní pole a průběh izoterm u panelu ozn. 6.



**Obrázek 33:** (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6)

Na **obrázku 34** je znázorněn teplotní gradient u panelu ozn. 6 mezi vnější a vnitřní návrhovou teplotou.



**Obrázek 34:** Teplotní gradient u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) (ozn. 6)

### 7) Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů

Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů je tvořen předsazeným dřevěným rámem s tepelnou izolací z minerální vlny. Na této vrstvě je ještě dodatečná tepelná izolace z dřevovláknitých desek. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro měkké (jehličnaté) dřevo s orientací vláken kolmo na tepelný tok a tepelných izolací jsou převzaty z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Pro vrstvu 2 tvořenou dřevěným rámem a minerální vlnou byl vypočten průměrný součinitel tepelné vodivosti této vrstvy (ze znalosti ploch a součinitelů tepelných vodivostí obou materiálů). Výsledný součinitel prostupu tepla panelu 7 je  $0,205 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (**tabulka 34**).

**Tabulka 34:** Součinitel prostupu tepla u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7)

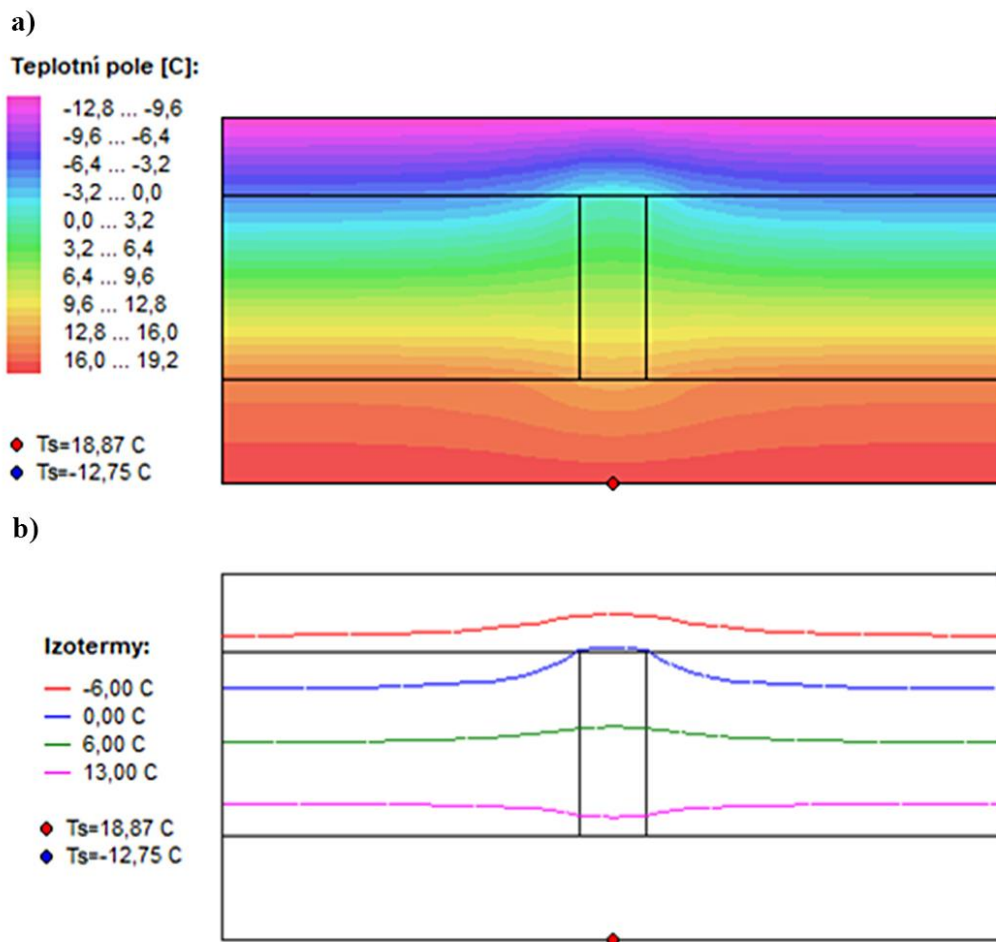
Skladba panelu	Tloušťka d (m)	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
1 - Smrkové profily 80 x 180 mm	0,080	0,18	0,205
2 - KVH hranoly 50 x 140 mm / minerální vlna	0,140	0,049 *	
3 - Dřevovláknitá izolace	0,060	0,043	
Paropropustná folie **	-	-	
Dřevěné latě 40 x 60 mm / vzduchová mezera	0,040	-	
Dřevěná fasáda Rhombus profil 24 x 95 mm	0,024	-	

\* průměrný součinitel tepelné vodivosti vrstvy tvořené KVH hranoly a minerální vlnou

\*\* paropropustná folie není uvažována ve výpočtu (neovlivňuje tepelné vlastnosti)

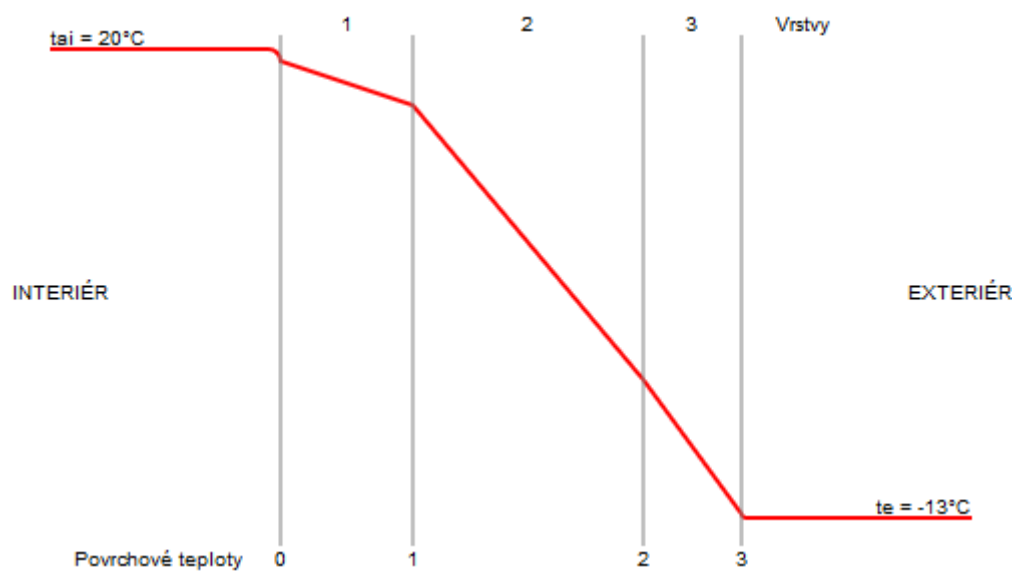
**Pozn.:** Do výpočtu součinitele prostupu tepla byla zahrnuta pouze tepelně - izolační vrstva konstrukce, tzn. od vnitřního líce panelu po vnější líc tepelné izolace.

Výpočet součinitele prostupu tepla byl proveden podle ČSN EN ISO 6946 (2018), tato hodnota byla ověřena také softwarem Area. Na **obrázku 35** je vykresleno teplotní pole a průběh izoterm u panelu ozn. 7.



**Obrázek 35:** (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7)

Na **obrázku 36** je znázorněn teplotní gradient u panelu ozn. 7 mezi vnější a vnitřní návrhovou teplotou.



**Obrázek 36:** Teplotní gradient u panelu zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7)

## 8) Panel rámové dřevostavby s izolační výplní

Panel rámové dřevostavby je tvořen dřevěným rámem s tepelnou izolací z minerální vlny. Na této vrstvě je z vnější strany dodatečná tepelná izolace z expandovaného polystyrenu. Z vnitřní strany je umístěn dřevěný rám (tvoří instalační mezeru) s tepelnou izolací z minerální vlny. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro měkké (jehličnaté) dřevo s orientací vláken kolmo na tepelný tok a tepelných izolací jsou převzaty z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Pro vrstvu 2 a 3 tvořenou dřevěným rámem a minerální vlnou byl vypočten průměrný součinitel tepelné vodivosti této vrstvy (ze znalosti ploch a součinitelů tepelných vodivostí obou materiálů). Výsledný součinitel prostupu tepla panelu 8 je  $0,153 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  (**tabulka 35**).

**Tabulka 35:** Součinitel prostupu tepla u panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8)

Skladba panelu	Tloušťka d (m)	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
1 - Sádroláknitá deska	0,015	0,32	0,153
2 - Dřevěné latě 60 x 40 mm / minerální vlna	0,040	0,05 *	
Parotěsná folie (PE) **	-	-	
3 - KVH hranoly 60 x 120 mm / minerální vlna	0,120	0,05 *	
4 - Sádroláknitá deska	0,015	0,32	
5 - Expandovaný polystyren (EPS)	0,100	0,033	
6 - Vnější omítka	0,003	0,11	

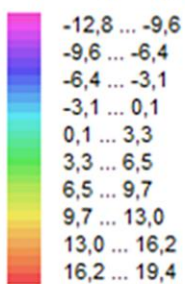
\* průměrný součinitel tepelné vodivosti vrstvy tvořené KVH hranoly a minerální vlnou

\*\* parotěsná folie není uvažována ve výpočtu (neovlivňuje tepelné vlastnosti)

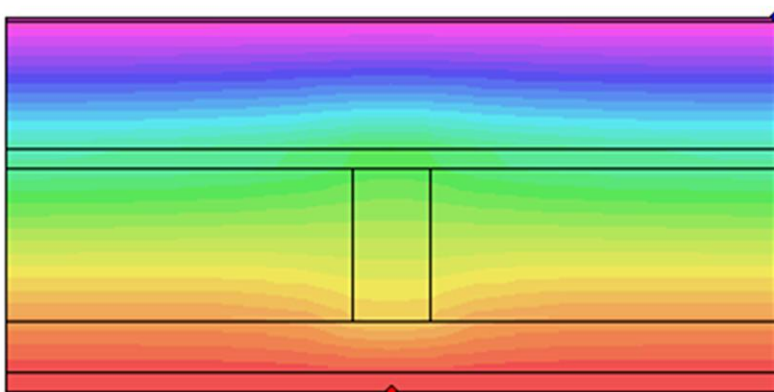
Výpočet součinitele prostupu tepla byl proveden podle ČSN EN ISO 6946 (2018), tato hodnota byla ověřena také softwarem Area. Na **obrázku 37** je vykresleno teplotní pole a průběh izoterm u panelu ozn. 8.

a)

Teplotní pole [C]:



◆  $T_s=19,12\text{ C}$   
◆  $T_s=-12,80\text{ C}$

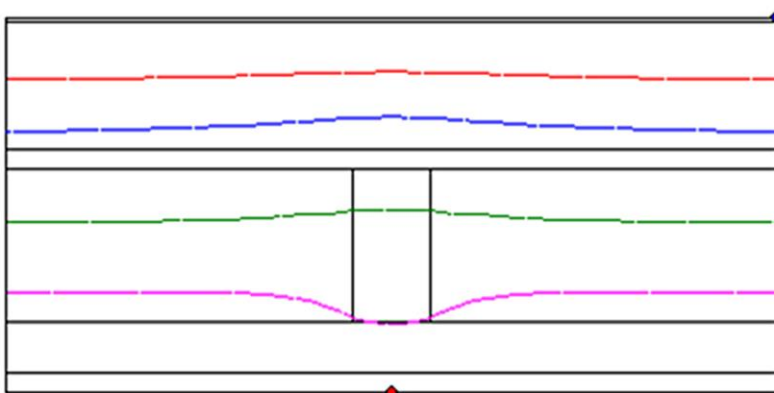


b)

Izotermy:

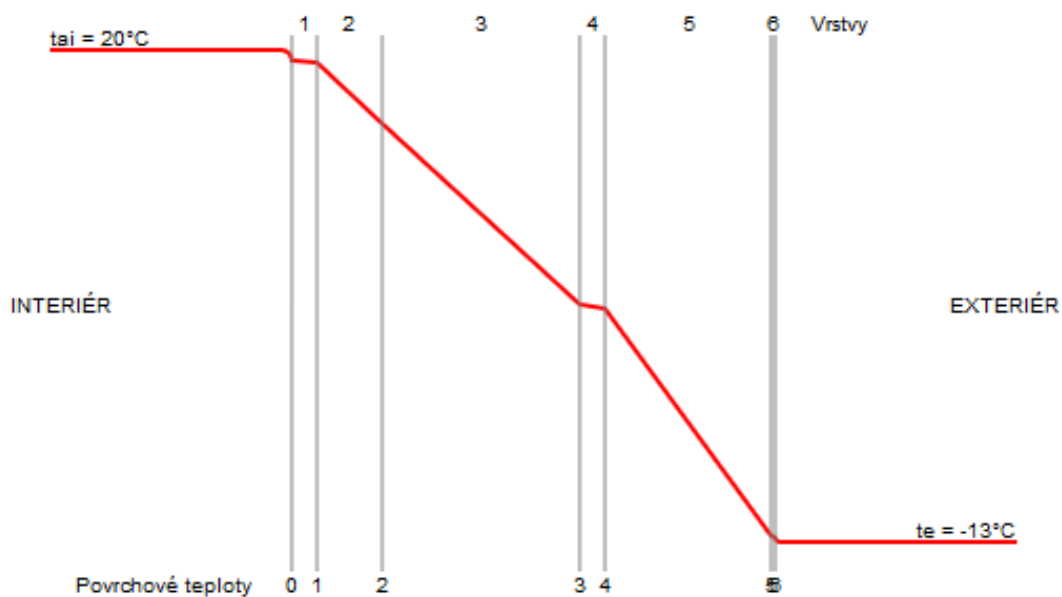
— -6,00 C  
— 0,00 C  
— 7,00 C  
— 13,00 C

◆  $T_{si}=19,12\text{ C}$   
◆  $T_{si}=-12,80\text{ C}$



**Obrázek 37:** (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8)

Na **obrázku 38** je znázorněn teplotní gradient u panelu ozn. 8 mezi vnější a vnitřní návrhovou teplotou.



**Obrázek 38:** Teplotní gradient u panelu rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8)



## 9) Panel z keramických tvárnic Porotherm

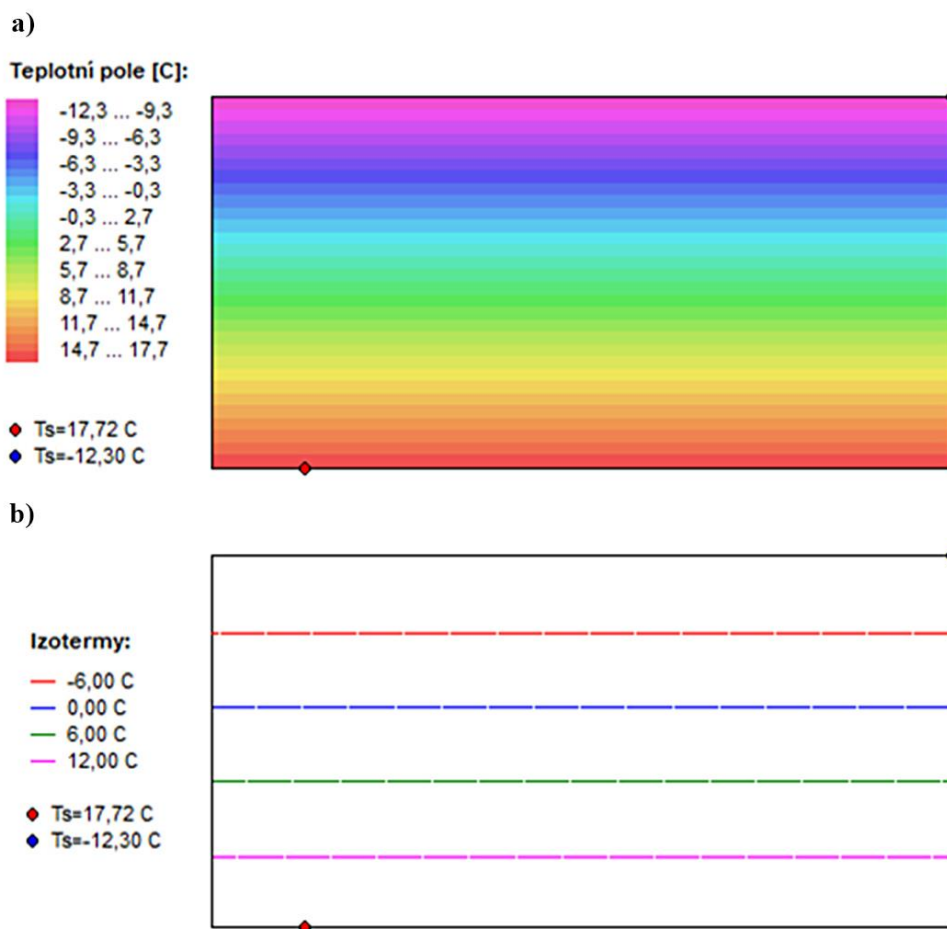
Panel z keramických tvárnic Porotherm tvoří 300 mm tloušťku stěny. Hodnota součinitele tepelné vodivosti pro tvárnice Profi Dryfix je převzata od výrobce tvárnic Porotherm. Výsledný součinitel prostupu tepla panelu 9 je  $0,531 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (**tabulka 36**).

**Tabulka 36:** Součinitel prostupu tepla u panelu z keramických tvárnic Porotherm (ozn. 9)

Skladba panelu	Tloušťka d (m)	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Keramická tvárnice Profi Dryfix 247 x 300 x 249 mm	0,300	0,175 *	0,531

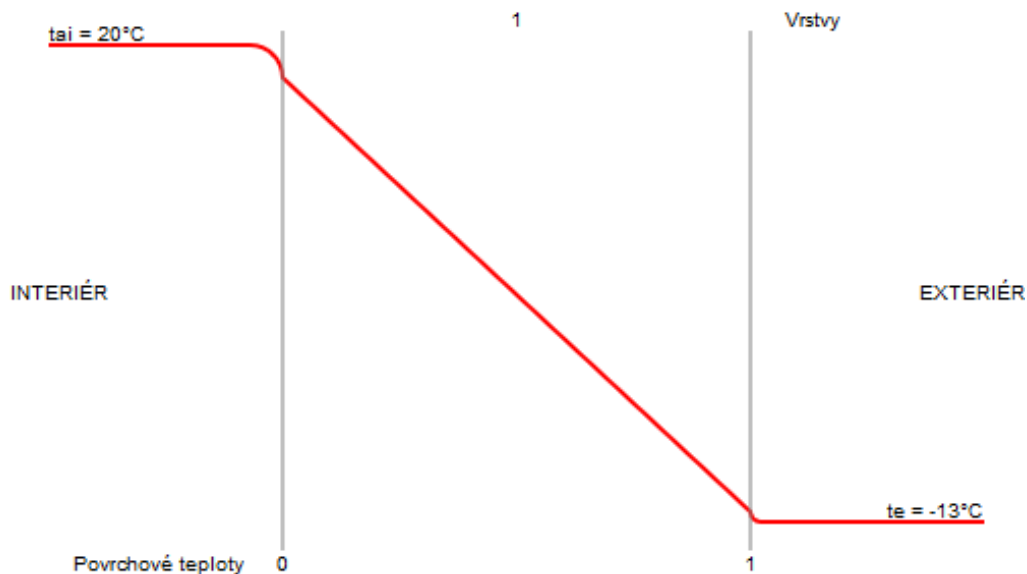
\* do výpočtu byla použita tepelná vodivost  $0,175 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , tato hodnota je deklarovaná výrobcem Porotherm

Výpočet součinitele prostupu tepla byl proveden podle ČSN EN ISO 6946 (2018), tato hodnota byla ověřena také softwarem Area. Na **obrázku 39** je vykresleno teplotní pole a průběh izoterm u panelu ozn. 9.



**Obrázek 39:** (a) dvourozměrné teplotní pole, (b) průběh izoterm u panelu z keramických tvárníc Porotherm (ozn. 9)

Na **obrázku 40** je znázorněn teplotní gradient u panelu ozn. 9 mezi vnější a vnitřní návrhovou teplotou.



**Obrázek 40:** Teplotní gradient u panelu z keramických tvárníc Porotherm (ozn. 9)

Hodnoty součinitele prostupu tepla získané z matematického modelu vycházejícího z ČSN EN ISO 6946 (2018) a deklarovaných hodnot součinitele tepelné vodivosti z normy ČSN 73 0540-3 (2005) jsou doplněny do vztahu 20 jako  $U_{\text{deklarovaná}}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Doplněním této hodnoty do rovnice (26) jsme schopni zaznamenat množství tepla procházející panelem za jednotku času, které je vyneseno do **grafu 11** jako  $Q_{\text{deklarovaná}}$  (Wh).

#### 6.4 Porovnání experimentálních výsledků s matematickým modelem

V této části jsou porovnány experimentální data při neustálených okrajových podmínkách a data z modelu založeného na ustálených okrajových podmínkách vycházejících z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) a deklarovaných hodnot tepelně technických vlastností materiálů z normy ČSN 73 0540-3 (2005).

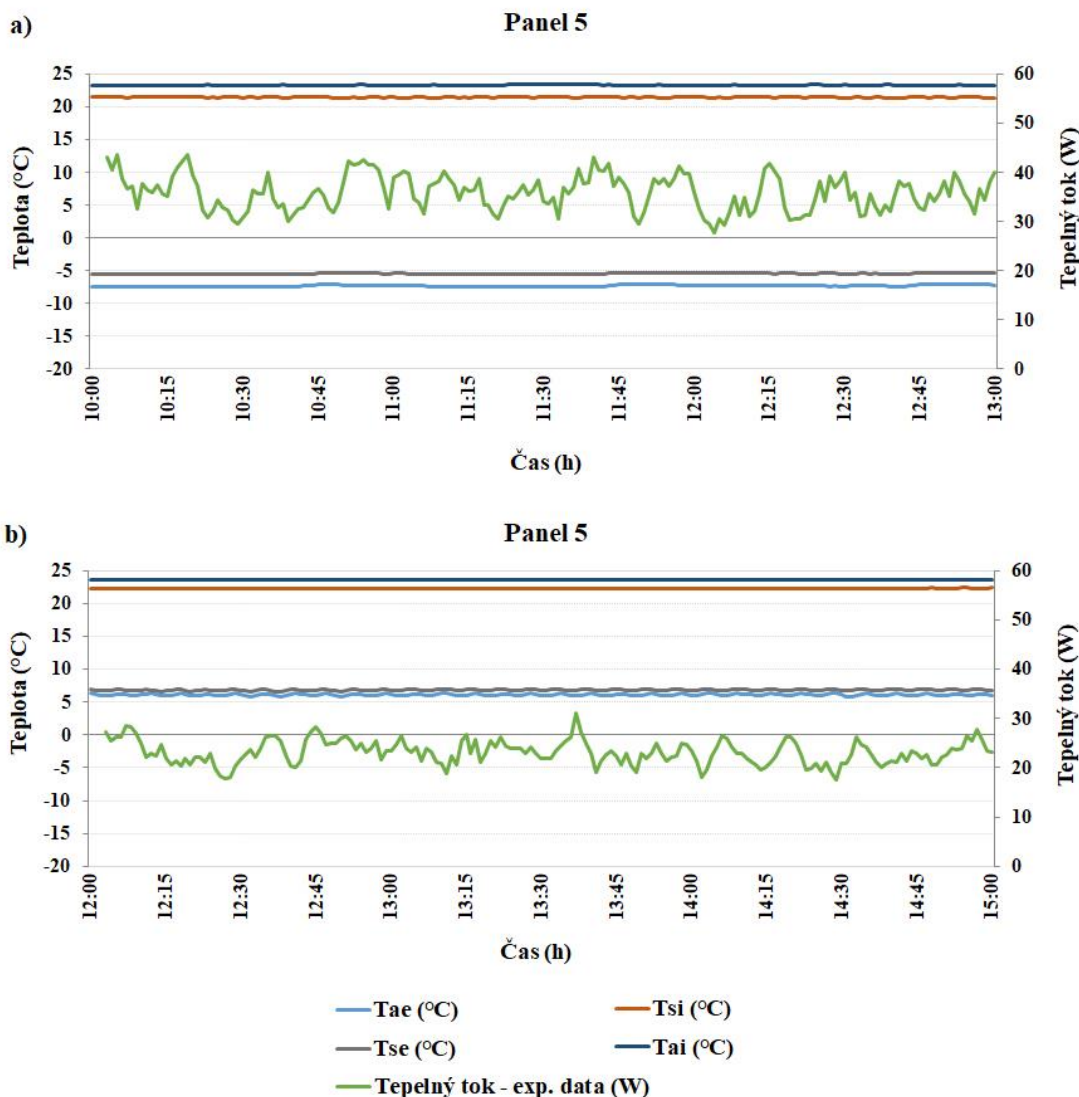
Naměřené hodnoty součinitele prostupu tepla u sendvičových panelů (ozn. 5-9) při neustálených okrajových podmínkách jsou velmi rozdílné (**graf 11**). Výsledky získané z měření 200 mm panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5) ukazují velmi rozdílnou hodnotu součinitele prostupu tepla a hodnotu tepelné vodivosti dřeva v porovnání s matematickým modelem vycházející z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných hodnot součinitele tepelné vodivosti z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Norma ČSN 73 0540-3 poskytuje návrhovou hodnotu součinitele tepelné vodivosti měkkého dřeva kolmo na vlákna  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Experimentální výsledky panelu ozn. 5 s hodnotou součinitele prostupu tepla  $0,339 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  odpovídají hodnotě

součinitele tepelné vodivosti dřeva  $0,068 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Podobně překvapivé výsledky byly získány u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) ozn. 6, uvedené v **tabulce 37**. Experimentální výsledky panelu ozn. 6 s hodnotou součinitele prostupu tepla  $0,807 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  odpovídají hodnotě součinitele tepelné vodivosti dřeva  $0,068 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Součinitel tepelné vodivosti je odvozen z tepelného odporu, resp. součinitele prostupu tepla.

**Tabulka 37:** Porovnání hodnot součinitele prostupu tepla naměřených při neustálených okrajových podmínkách a hodnot získaných z matematického modelu vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 u panelů dodaných od výrobců (ozn. 5-9)

Typ stěnového panelu	Součinitel prostupu tepla $U_t$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )		Rozdíl
	Hodnota vypočtená z matematického modelu podle ČSN EN ISO 6946	Hodnota naměřená při neustálených okrajových podmínkách	
(5) panel roubené stěna z lepených smrkových profilů	0,781	0,339	- 57 %
(6) panel z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT)	1,225	0,807	- 34 %
(7) panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů	0,205	0,204	- 0,5 %
(8) panel rámové dřevostavby s izolační výplní	0,153	0,162	+ 5 %
(9) panel z keramických tvárnic	0,531	0,560	+ 5 %

Rozdílné hodnoty součinitele prostupu tepla jsou také viditelné v kratších časových obdobích, které lze samostatně použít jako měření při ustálených okrajových podmínkách. **Graf 15** zobrazuje dvě tříhodinová měření vzorku ozn. 5 při ustálených okrajových podmínkách na obou stranách teplé skříně. **Graf 15a** ukazuje měření s hraničními podmínkami  $-7 \text{ }^\circ\text{C}$  na chladné straně a  $+24 \text{ }^\circ\text{C}$  na teplé straně s výsledkem součinitele prostupu tepla  $0,405 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . **Graf 15b** zobrazuje měření s hraničními podmínkami  $+6 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $+24 \text{ }^\circ\text{C}$  s výsledkem součinitele prostupu tepla  $0,455 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . Rozdíl mezi těmito dvěma výsledky je 12 %. Hodnota součinitele prostupu tepla  $0,455 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  z měření při ustálených okrajových podmínkách je o 34 % vyšší než hodnota součinitele prostupu tepla  $0,339 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  z měření při neustálených okrajových podmínkách.



**Graf 15:** Měření tepelného toku a teplot při ustálených okrajových podmínkách u panelu roubené stěny z lepených smrkových profilů ozn. 5: **(a)** nastavená teplota v chladné komoře  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , **(b)** nastavená teplota v chladné komoře  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $T_{ae}$  = teplota vzduchu v chladné komoře,  $T_{ai}$  = teplota vzduchu v teplé komoře,  $T_{se}$  = teplota na povrchu vzorku v chladné komoře, a  $T_{si}$  = teplota na povrchu vzorku v teplé komoře.

Výsledky vzorků ozn. 7-9 poskytují velmi podobné hodnoty součinitelů prostupů tepla získaných z matematického modelu podle ČSN EN ISO 6946 ve srovnání s naměřenými daty při neustálených okrajových podmínkách (**tabulka 37**). Maximální rozdíl u panelů ozn. 7-9 je do 5 %. Panely ozn. 7-8 jsou tvořeny z převážné části z materiálů s nižší objemovou hmotností (pěnový polystyren, minerální vlna, dřevovláknitá izolace) a masivní dřevo je použito pouze jako nosný rám. Panel ozn. 9 je tvořen z keramických tvárnic Porotherm, které netvoří kompaktní homogenní materiál, neboť je vyplněn vertikálně orientovanými dutinami.

## 7 Diskuze

Z výsledků práce je možné shrnout, že zkušební okrajové podmínky mohou značně ovlivnit výsledné hodnoty tepelně-technických parametrů testovaných panelů. Výsledky odpovídají očekávání a potvrzují hypotézu č. 1 o vlivu okrajových podmínek na výsledky součinitele prostupu tepla stavebních konstrukcí. Měření při neustálených okrajových podmínkách poskytlo rozdílné výsledky součinitele prostupu tepla stěnových panelů (ozn. 1-4) ve srovnání s výsledky zkoušek při ustálených okrajových podmínkách (**tabulka 29**). Tento rozdíl může být způsoben přestupem tepla z okolí do panelu a různými formami sdílení tepla v panelu. U obou metod byla prokázána lineární závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku (**graf 4 a 8**). Dále to může být vlivem měrné tepelné kapacity a objemové hmotnosti na tepelnou setrvačnost stěnových panelů při změně teploty vzduchu v chladné komoře.

Součinitel prostupu tepla u panelu s výplní z minerální vlny (ozn. 4) byl po týdenním měření při neustálených okrajových podmínkách o 5 % vyšší ve srovnání s měřením při ustálených okrajových podmínkách, zatímco u panelu s výplní z pšeničných plev (ozn. 1) vykazoval o 3 % nižší hodnotu a u panelu s výplní s řepkovou řezankou (ozn. 2) vykazoval o 12 % nižší hodnotu. Součinitel prostupu tepla panelu s výplní s dřevní štěpkou vykazoval o 0,3 % vyšší hodnotu.

Různé procentuální rozdíly můžou být dány vlivem rozdílné objemové hmotnosti, frakcemi izolačního materiálu v panelu a různými formami sdílení tepla v panelu. Z výsledků plyne, že závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti není lineární (**graf 5 a 9**). Pro budoucí testování by bylo vhodné testovat materiály se stejnou frakcí a objemovou hmotností. Frakci materiálu je možné v případě řepkové řezanky a dřevní štěpky ovlivnit ve výrobní fázi, kde materiál vzniká drcením v kladívkovém šrotovníku. V případě pšeničných plev je ideální zachovat kompaktní anatomickou strukturu původního materiálu. Stejná frakce materiálu nám pomůže dosáhnout shodné objemové hmotnosti volně sypané izolace v panelu.

Použití neustálených okrajových podmínek (nastavených podle reálných klimatických podmínek) v experimentálním zařízení teplé skříně je možné použít pro přesné stanovení součinitele prostupu tepla stavebních konstrukcí. Tím byla potvrzena hypotéza č. 2. Tato metoda může být přesnější a reálnější, zejména pokud jde o obnovitelné materiály (z biologického odpadu, masivního dřeva) s relativně vysokou objemovou hmotností a tepelnou kapacitou. Je to dáno zejména vyšší tepelnou

setrvačností stěn s výraznou akumulací schopností. Další výhodou teplé skříně je umístění (poloha) vzorku ve zkušebním zařízení na reálný směr tepelného toku podle budoucí aplikace (stěna, podlaha, plochá/šikmá střecha). Zařízení je vhodné zejména pro složitější sendvičové (vícevrstvé) konstrukce s větší tloušťkou.

Měření při neustálených okrajových podmínkách poskytlo rozdílné výsledky součinitele prostupu tepla stěnových panelů (ozn. 5-9) ve srovnání s matematickým modelem vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných hodnot součinitele tepelné vodivosti z ČSN 73 0540-3 (2005). Tím byla potvrzena hypotéza č. 3. Přičemž uvedené hodnoty v normě ČSN 73 0540-3 jsou odvozeny z testování při ustálených okrajových podmínkách. Výsledné hodnoty z experimentu a matematického modelu byly rozdílné. Největší rozdíl - vyšší než 30 % byl zaznamenán u masivních dřevěných panelů (ozn. 5 a 6). Je to dáno zejména vlivem objemové hmotnosti a tepelné kapacity na součinitel prostupu tepla při změně teploty za neustálených okrajových podmínek. Přičemž u matematického modelu je součinitel prostupu tepla vypočten z celkového tepelného odporu (ČSN EN ISO 6946), který se vypočítá podle vztahu (13) z tepelného odporu vrstvy (konstrukce) a podle vztahů (15) a (16) z odporů při přestupu tepla (ve většině případů ze smluvních hodnot podle směru tepelného toku v **tabulce 9**). Tepelný odpor vrstvy se určí z tloušťky a hodnoty součinitele tepelné vodivosti ČSN 73 0540-3 (2005), která je ve většině případů určena z testování při ustálených okrajových podmínkách.

Sendvičové panely z obnovitelných materiálů ze zemědělského odpadu a odpadu z dřezpracujícího průmyslu pro udržitelnou výstavbu mohou poskytnout srovnatelné tepelné vlastnosti jako sendvičový panel s průmyslově vyráběným izolačním materiálem. Tím byla potvrzena hypotéza č. 4. Panel na bázi dřeva s izolační výplní z pšeničných plev a řepkové řezanky dlouhodobě vykazoval stejné tepelné chování jako panel na bázi dřeva s jádrem z minerální vlny, ve prospěch snížení uhlíkové stopy a nízkého dopadu na životní prostředí.

## **7.1 Okrajové podmínky**

### **7.1.1 Součinitel při přestupu tepla**

Zkušební okrajové podmínky jak při experimentech, tak při matematických výpočtech mohou výrazně ovlivnit výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla (tepelného odporu) testovaných panelů. Experimentální testování pomocí zařízení teplé

skříňně zahrnuje kromě vedení tepla také proudění, které je zahrnuto v součinitelích při přestupu tepla  $h_{si}$  a  $h_{se}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Vzhledem k malé hodnotě tepelného toku (cca méně než  $< 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) je možné složku sálání zanedbat. Dle normy ČSN EN ISO 8990 (1998) je sálání zanedbáno, v případě že teplota vzduchu a střední sálavá teplota vzorkem jsou velmi blízké. To je způsobeno zejména při vysokém tepelném odporu vzorku, který je mnohem vyšší, než jsou odpory při přestupu tepla na površích vzorku. Za těchto okolností může být postačující stanovit součinitel prostupu tepla z teploty vzduchu na obou stranách vzorku, kdy pro předmětné zkušební zařízení a pro zamýšlené zkušební podmínky bylo prokázáno, že vzniknou zanedbatelné chyby.

Horáček (2004) ve své práci popisuje, že pro sdílení tepla v případě sušení dřeva nemá sálání téměř žádný význam s výjimkou ovlivnění součinitele přestupu tepla (ve vztahu 5), který může být díky sálání zvýšen o  $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Přenos tepla sáláním je zapříčiněn elektromagnetickým zářením o určité vlnové délce. Toto sdílení není závislé na teplotě prostředí, je však významně ovlivněn teplotou povrchů těles, mezi kterými ke sdílení dochází (vztah 9). O spojení proudění a sálání do jednoho děje píše Siau (1984). Pro další měření by bylo možné do součinitele přestupu tepla zahrnout i vliv sálání.

Ze součinitelů přestupu tepla  $h_{si}$  a  $h_{se}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) je možné vypočítat tepelné odpory při přestupu tepla  $R_{si}$  a  $R_{se}$  ( $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ). V případě definovaných okrajových podmínek (tepelného toku, teplot vzduchu a teplot na povrchu vzorku) v teplé skříni jsou tepelné odpory při přestupu tepla vypočteny podle vztahů (16) a (17). Důležitý parametr, který ovlivňuje odpor při přestupu tepla na vnější straně  $R_{se}$  je rychlost proudění vzduchu v chladné komoře (simulující vnější prostředí). Pro simulaci přirozených podmínek u stavebních prvků vyhovuje podle ČSN EN ISO 8990 (1998) rozsah rychlosti proudění vzduchu v chladné komoře v rozhraní  $0,1\text{-}10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dovolенý interval rychlosti proudění je příliš velký a zásadně ovlivní součinitel přestupu tepla na vnější straně (tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně) a to cca o 1 řád. Výsledky ze dvou experimentálních zařízení potom nemohou být navzájem porovnatelné. V této práci byla rychlost proudění pro všechny testované panely stejná (viz. metodika práce), aby testované panely byly navzájem porovnatelné.

Technická praxe v současnosti používá výpočty založené na zjednodušených matematických modelech podle ČSN EN ISO 6946 (2018). Tyto modely jsou založeny zejména na předpokladu ustáleného stavu. Pro tepelné odpory při přestupu tepla  $R_{si}$  a  $R_{se}$  se v případě, že se neuvádí specifické údaje o okrajových podmínkách, využívají smluvní hodnoty (konstanty) v závislosti na směru tepelného toku uvedené v **tabulce 9**. V případě



specifických okrajových podmínek uvádí norma ČSN EN ISO 6946 (2018) i výpočet odporu při přestupu tepla  $R_{se}$  podle rychlosti větru od 1-10  $m.s^{-1}$ . Dovolovaný interval je poměrně velký. Okrajové podmínky při výpočtech stanovuje norma ČSN 73 0540-3 (2005) pro venkovní podmínky podle teplotní oblasti (1-4) v souladu s průměrnou nadmořskou výškou (**tabulka 10**). Norma také uvádí návrhové průměrné měsíční teploty venkovního vzduchu (**tabulka 11**) a návrhové teploty venkovního vzduchu podle konkrétní obce (místa). Při neustále se měnících klimatických podmínkách vnějšího prostředí v rámci denních, ale i hodinových (minutových) cyklů nemohou tyto konstantní hodnoty reflektovat reálné klimatické podmínky s přesným stanovením tepelně-technických parametrů (součinitel prostupu tepla, tepelný odpor).

Proto by bylo vhodné sjednotit okrajové podmínky při výpočtech a experimentech podle reálných klimatických dat. Dále by bylo vhodné revidovat normu ČSN EN 8990 (1998), do které by se zahrnul i postup pro testování při neustálených okrajových podmínkách podle nastavení reálných klimatických dat. Nejvhodnější by bylo použít klimatická data z nejchladnějšího a nejteplejšího období v roce, to znamená testování při extrémních podmínkách. Aby konstrukce byla navržena jak na zimní ochlazení, tak na letní přehřívání.

### **7.1.2 Porovnání naměřených hodnot při rozdílných okrajových podmínkách**

Výsledky získané z experimentu při neustálených okrajových podmínkách u panelu 5 a 6 ukazují velmi rozdílnou hodnotu součinitele prostupu tepla a hodnotu tepelné vodivosti dřeva v porovnání s matematickým modelem (při ustálených okrajových podmínkách) vycházející z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných hodnot součinitele tepelné vodivosti z normy ČSN 73 0540-3 (2005). Norma ČSN 73 0540-3 poskytuje návrhovou hodnotu součinitele tepelné vodivosti měkkého dřeva kolmo na vlákna  $0,18 W.m^{-1}.K^{-1}$ . Experimentální výsledky panelu ozn. 5 s hodnotou součinitele prostupu tepla  $0,339 W.m^{-2}.K^{-1}$  odpovídají součiniteli tepelné vodivosti dřeva  $0,068 W.m^{-1}.K^{-1}$ . Podobně překvapivé výsledky byly získány u panelu z křížem lepeného lamelového dřeva (CLT) ozn. 6, uvedené v **tabulce 37**. Experimentální výsledky panelu ozn. 6 s hodnotou součinitele prostupu tepla  $0,807 W.m^{-2}.K^{-1}$  odpovídají hodnotě součinitele tepelné vodivosti dřeva  $0,068 W.m^{-1}.K^{-1}$ . Součinitel tepelné vodivosti je odvozen z tepelného odporu, resp. součinitele prostupu tepla. Hodnoty součinitele prostupu tepla jsou výrazně nižší oproti matematickému modelu. U panelu 6 je to o 34 % a u panelu 5 dokonce o 57 %.

**Tabulka 18** uvádí přehled různých zdrojů s uvedenými hodnotami tepelných vodivostí dřeva kolmo na směr vláken. Existují významné rozdíly v národních normách a vědeckých studiích v závislosti na použité metodě měření a okrajových podmínkách. Rozdílné hodnoty součinitele prostupu tepla jsou také viditelné v kratších časových obdobích, které lze samostatně použít jako měření při ustálených okrajových podmínkách. **Graf 15** zobrazuje dvě tříhodinová měření vzorku ozn. 5 při ustálených okrajových podmínkách na obou stranách teplé skříně. **Graf 15a** ukazuje měření s hraničními podmínkami  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  na chladné straně a  $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$  na teplé straně s výsledkem součinitele prostupu tepla  $0,405\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . **Graf 15b** zobrazuje měření s hraničními podmínkami  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$  s výsledkem součinitele prostupu tepla  $0,455\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Rozdíl mezi těmito dvěma výsledky je 12 %. Hodnota součinitele prostupu tepla  $0,455\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  z měření při ustálených okrajových podmínkách je o 34 % vyšší než hodnota součinitele prostupu tepla  $0,339\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  z měření při neustálených okrajových podmínkách.

Výsledky vzorků ozn. 7-9 poskytují velmi podobné hodnoty součinitelů prostupu tepla získaných z matematického modelu (při ustálených okrajových podmínkách) podle ČSN EN ISO 6946 ve srovnání s naměřenými daty při neustálených okrajových podmínkách (**tabulka 37**). Maximální rozdíl u panelů ozn. 7-9 je do 5 %. Panely ozn. 7-8 jsou tvořeny z převážné části z materiálů s nižší objemovou hmotností (pěnový polystyren, minerální vlna, dřevovláknitá izolace) a masivní dřevo je použito pouze jako nosný rám. Panel ozn. 9 je tvořen z keramických tvárnic Porothem, které tvoří kompaktní homogenní materiál, neboť je vyplněn vertikálně orientovanými dutinami.

Martín *et al.* (2010) a Sala *et al.* (2008) používali neustálené okrajové podmínky při testování v modifikované teplé skříně k zjištění doby odezvy. Naměřené hodnoty z experimentu byly porovnány s matematickým modelem. Významné rozdíly byly zaznamenány u stěn s vyšší tepelnou setrvačností. Nik (2017) řešil aplikaci standardních a extrémních klimatických dat na teplotně - vlhkostní simulaci stěny rámové dřevostavby. Výsledky zdůraznily důležitost uvažování extrémních klimatických podmínek ve výpočtech. Autoři ve studiích Audenaert *et al.* (2011) a Bjørneboe *et al.* (2017) potvrzují rozdílnou skutečnou spotřebu energie ve srovnání s výpočty podle EN standardů. Pro vytvoření matematických modelů, které mohou simulovat a vypočítat roční spotřebu energie, existuje mnoho parametrů. Ve studiích Aste *et al.* (2009) byl stanoven vliv tepelné setrvačnosti na tepelné chování vnějších stěn s ohledem na úsporu energie. Rozdíl potřeby energie na vytápění u stěny s nízkou tepelnou setrvačností ve srovnání se stěnou

s vysokou tepelnou setrvačností může dosáhnout 10 %. Rozdíl potřeby energie na chlazení může být až 20 %.

Výsledky této práce ukazují nový způsob využití relativně jednoduché experimentální metody pro testování tepelných vlastností reálných stěnových, stropních a podlahových systémů při neustálených okrajových podmínkách metodou teplé skříně. Teplotní, případně i vlhkostní křivky lze nastavit podle předpokládaných reálných klimatických podmínek, a délka měření může být dlouhá dle potřeby konkrétních materiálů. Lepší a přesnější výsledky lze očekávat u materiálů na bázi dřeva a jiných obnovitelných materiálech, které mohou ve velmi blízké budoucnosti poskytovat dobré podmínky pro udržitelný stavební průmysl, jak je popsáno v Asdrubali *et al.* (2017).

## 7.2 Porovnání tepelně-technických parametrů s jinými autory

Testované stěnové panely ozn. 1-9 není možné porovnat z hlediska součinitele prostupu tepla s jinými autory, neboť použité materiálové skladby v panelech jsou specifické pro tuto práci. Pro porovnání výsledků s jinými autory je možné porovnat součinitele tepelné vodivosti izolačních materiálů u panelů dle vlastních návrhů (ozn. 1-4) a masivního dřeva u panelů dodaných od výrobců (ozn. 5-6), odvozené z tepelného odporu resp. součinitele prostupu tepla.

Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti u obnovitelných materiálů z pšeničných plev, řepkové řezanky a dřevní štěpky jsou srovnatelné s nejpoužívanějšími tepelně-izolačními materiály (minerální vlna, pěnové sklo, celulóza, dřevovláknité desky - měkké) v současnosti dle **tabulky 14**. Také jsou srovnatelné s nedávno zkoumanými nekonvenčními materiály na přírodní bázi v přehledu Asdrubali *et al.*, (2015). Tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) rákosu (0,045-0,056) bagasy (0,046-0,055) a kenafu (0,034-0,043). Dále nutno dodat, že splňují požadavek dle normy ČSN 73 0540-1 (2005) pro tepelně-izolační materiál, tj. součinitel tepelné vodivosti  $< 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pro porovnání obnovitelných tepelných izolací byla testována průmyslově vyrobená tepelná izolace z minerální vlny. Naměřená hodnota odpovídá uvedené hodnotě v **tabulce 14** dle autorů (Cihlár & Hazucha, 2013; Šípková *et al.*, 2014)

Testované obnovitelné materiály je možné porovnat se slámou ve formě balíků, která je v současnosti jedním z nekonvenčních udržitelných materiálů využívaný na tepelnou izolaci. Oproti balíkům, kde je hodnota tepelné vodivosti závislá na orientaci

stébel ke směru tepelném toku, jsou volně sypané izolace s vlákny náhodně orientovanými. To znamená, že tepelná vodivost je stejná ve všech směrech.

Z hlediska naměřených hodnot v této práci se součinitele tepelné vodivosti volně sypaných tepelných izolací ze zemědělského odpadu - pšeničné plevy ( $0,047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při  $\rho = 104 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $u = 3,5 \%$ ) a řepková řezanka ( $0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při  $\rho = 110 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $u = 8,1 \%$ ) vyrovnají tepelné izolaci ve formě slaměných balíků při orientaci vláken kolmo na tepelný tok. Volně sypaná izolace z dřevní štěpky ( $0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při  $\rho = 205 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $u = 6,9 \%$ ) je blíže hodnotám slaměných balíků při orientaci vláken rovnoběžně s tepelným tokem. Nutno zmínit, že objemová hmotnost dřevní štěpky v panelu je přibližně dvojnásobná oproti pšeničným plevám a řepkové řezance.

Porovnání aktuálních měření na slaměných balících provedl Costes *et al.* (2017) v závislosti na orientaci slámových vláken vzhledem k tepelnému toku a objemové hmotnosti. Ve směru vláken kolmo na tepelný tok byla tepelná vodivost  $0,045\text{-}0,056 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a ve směru vláken rovnoběžně s tepelným tokem  $0,056\text{-}0,080 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Objemová hmotnost balíků byla v rozsahu  $75\text{-}125 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hodnoty součinitele tepelné vodivosti v podobném rozsahu tj.  $0,040\text{-}0,056 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pro směr vláken kolmo na tepelný tok a  $0,057\text{-}0,082 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (s objemovou hmotností  $70\text{-}150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) byly naměřeny i u dalších autorů, kteří jsou uvedeny v **tabulce 16**. U všech autorů byl obsah vlhkosti slaměných balíků menší než  $15 \%$ .

Na rozdíl od lisovaných balíků slámy byl výplňový materiál v této práci použit ve volně sypané formě (bez lisování), aby v izolačním materiálu byly vytvořeny vzduchové články jako izolační struktura s nízkou tepelnou vodivostí. Další výhodou tohoto řešení je minimalizace tepelných mostů, které se často vyskytují ve spojích slaměných balíků. Tepelné vlastnosti izolační stěny proto zůstávají rovnoměrnější v celém průřezu. Tento typ izolace může být snadno aplikovaný i do složitějších konstrukčních tvarů (prvků), což dává projektantům a architektům větší volnost při navrhování stavebních obálek udržitelných budov.

Pro porovnání s dalšími měřeními na materiálech ze zemědělského odpadu, je k dispozici měření na rýžových plevách, které provedl Yarbrough *et al.*, (2005). Rýžové plevy byly vysušeny a měřeny ve formě izolačních desek o objemové hmotnosti  $150\text{-}170 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  metodou měřidel tepelného toku. Součinitel tepelné vodivosti byl při teplotách  $7\text{-}40 \text{ }^\circ\text{C}$  v rozsahu  $0,044\text{-}0,057 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Data můžeme dále porovnat s dalšími materiály ze zemědělského odpadu z **tabulky 15**, jako například kokosová vlákna, bagasa,

kukuřičné klasy či durian, které mají součinitel tepelné vodivosti v rozmezí 0,046 - 0,098  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

V této práci bylo prokázáno, že lignocelulózový materiál z biologického odpadu, jako jsou pšeničné plevy či řepková řezanka, může být využíván jako životaschopná alternativa k tepelné izolaci k průmyslově vyráběné tepelné izolaci z minerální vlny. Pro porovnání izolačních panelů se stejnou hodnotou součinitele prostupu tepla (tepelného odporu), je potřeba pouze o 1,5 % silnější vrstvy u řepkové řezanky a o 10 % silnější vrstvy u pšeničných plev oproti minerální vlně. U dřevní štěpky by bylo potřeba pro dosažení podobných tepelných vlastností výrazně snížit objemovou hmotnost.

Pokud by se snížily biotické a abiotické faktory vedoucí ke zhoršení vlastností, tak se pšeničné plevy a řepková řezanka jeví jako slibný tepelně izolační materiál pro udržitelnou výstavbu budov.

Z naměřených výsledků je možné shrnout, že zkušební okrajové podmínky mohou silně ovlivnit výsledné hodnoty součinitele prostupu tepla testovaných panelů, což může vést k častému odmítnutí izolace z biologického odpadu ve prospěch průmyslově vyrobené tepelné izolace. Panely na bázi dřeva s izolačním jádrem z biologického odpadu (ozn. 1-3) dlouhodobě vykazovaly stejné tepelné chování jako panel na bázi dřeva s jádrem z minerální vlny (ozn. 4), ve prospěch snížení uhlíkové stopy a nízkého dopadu na životní prostředí.

Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity pšeničných plev ( $1,8 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  při  $25^\circ\text{C}$  byla) metodou DSC jsou vyšší ve srovnání s jinými lignocelulózovými materiály, jako jsou dřevěné pelety, bambus nebo vláknité desky s nízkou objemovou hmotností (Huang *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2013; Czajkowski *et al.*, 2016). To je pravděpodobně dáno různými chemickým složením a morfologií. Nicméně závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vykazovala podobný trend. Z **grafu 14b** je patrné, že měrná tepelná kapacita je rostoucí se vzrůstající teplotou jak pro formu prášku, tak pro kompaktní anatomickou strukturu.

Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti dřeva u panelů z masivního dřeva ozn. 5 a 6 je možné porovnávat s hodnotami uvedenými v **tabulce 17**. Tepelná vodivost dřeva je podobně popsána ve studiích TenWolde *et al.* (1988), Suleiman *et al.* (1999) a Ragland *et al.* (1991). Významnými faktory, které ovlivňují tepelnou vodivost, jsou druh dřeva, objemová hmotnost, vlhkost, teplota a směr tepelného toku na směr vláken. V této práci byl u testovaných panelů směr dřevních vláken kolmo na tepelný tok. Panel 5 byl sestaven z lepených smrkových profilů typu BSH a panel 6 z křížem lepeného lamelového (smrkového) dřeva (CLT). Na výrobu bylo použito měkké (jehličnaté) dřevo

s maximálním obsahem vlhkosti do 12 %. Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti u obou panelů byly  $0,068 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , což je výrazně méně než udávají autoři Pralat (2016), Limam *et al.* (2016), Jochym (2016), Řihák & Školník (2016). Nejbližší k těmto hodnotám je Vololonirina *et al.* (2014), která měřila tepelnou vodivost smrkového dřeva menších vzorků metodou topné desky. Byly použity vysušené vzorky dřeva s různými hustotami s úzkými a širokými letokruhy pro teploty 10, 25 a 40 °C. V rozsahu použitých teplot se tepelná vodivost měřila lineárně s teplotou. Byly zaznamenány nízké hodnoty tepelné vodivosti okolo  $0,080 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  v radiálním směru při teplotě 25 °C.

Vzhledem k naměřeným hodnotám součinitele tepelné vodivosti v této práci  $0,068 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , by se masivní dřevo (ve směru vláken kolmo na tepelný tok) mohlo definovat jako tepelně-izolační materiál ( $< 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , ČSN 73 0540-1, 2005). Pokud by se tato hodnota použila do výpočtu tepelného odporu, resp. součinitele prostupu tepla (dle ČSN EN ISO 6946, 2018), pro splnění požadované hodnoty dané normou ČSN 73 0540-2 (2011) by stačila tloušťka obvodové konstrukce 280 mm. To je ve srovnání se současnou normovou hodnotou rostlého dřeva kolmo na vlákna  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (ČSN 73 0540-3, 2005) s požadovanou tloušťkou 550 mm, výrazný rozdíl. Je nutné podotknout, že normová hodnota tepelné vodivosti je převzata z testování při ustálených okrajových podmínkách. Tento způsob testování je vhodný především pro posouzení lehkých stěn (s nízkou hodnotou měrné tepelné kapacity a objemové hmotnosti). Pro posouzení tepelných vlastností těžkých stěn, jako jsou stěny z masivního dřeva, se může tento způsob testování ukázat jako nevhodný. Pro simulaci reálnějšího chování je vhodné testování při neustálených okrajových podmínkách.

### 7.3 Navrhované změny experimentu do budoucna

Předložená práce potvrzuje spolehlivost srovnávací metody testování tepelných vlastností reálných vzorků stěn s použitím neustálených okrajových podmínek metodou teplé skříně. Rozdíl mezi oběma metodami může být vyšší než 30 %. Celkové množství tepla procházející panelem (Wh) se jeví jako nejdůležitější a srovnatelný parametr pro stanovení součinitele prostupu tepla při použití neustálených okrajových podmínek metodou teplé skříně. Kombinace ustáleného stavu na teplé straně a neustáleného stavu na chladné straně teplé skříně se jeví jako slibná metoda pro přesné stanovení energetické náročnosti obvodové konstrukce. Tato metoda může simulovat skutečné klimatické

podmínky a zahrnovat nedokonalosti dané nehomogenními materiály s vyšší tepelnou kapacitou a objemovou hmotností.

Další výzkum by měl být proveden za účelem zjištění vlivu relativní vlhkosti vzduchu a obsahu vlhkosti stěn na tepelné vlastnosti při neustálených okrajových podmínkách. Zároveň by bylo vhodné určit vliv tloušťky dřeva na součinitele prostupu tepla masivní dřevěné stěny. U sypaných izolací (pšeničné plevy, řepková řezanka, dřevní štěpka) by bylo vhodné testovat sedání izolační vrstvy, zejména ve svislých stěnách v závislosti na frakci materiálu a objemové hmotnosti. Provedení citlivostní analýzy v závislosti objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity na testované materiály (panely) by přispělo k přesnějšímu stanovení vlivu těchto veličin.

Jako další vývoj experimentu bych navrhoval testování při více teplotních cyklech. Nejvhodnější by bylo použít klimatická data z nejméně chladnějšího a nejteplejšího období v roce, to znamená testování vzorků při extrémních podmínkách. Aby tepelné vlastnosti obvodové konstrukce byly stanoveny jak pro zimní ochlazení, tak pro letní přehřívání.

#### **7.4 Použití výsledků v praxi**

Přínosem v oblasti experimentálního měření tepelných parametrů je porovnání v současnosti používané metody při ustálených okrajových podmínkách a navržené vlastní metody při neustálených okrajových podmínkách na demonstračních obvodových konstrukcích v reálné velikosti pomocí metody teplé skříně. Metodika měření při neustálených okrajových podmínkách by mohla posloužit ke zlepšení přesnosti stanovení součinitele prostupu tepla u obvodových konstrukcí, zejména pak u obnovitelných materiálů (materiály z biologického odpadu, dřevo a materiály na bázi dřeva) s vyšší objemovou hmotností a tepelnou kapacitou.

Zkušební zařízení teplé skříně podle ČSN EN ISO 8990 (1998) byla pro účel této práce modifikována za účelem snížení tepelných ztrát skrze stěny skříně. Konstrukční návrh s podrobnými výkresy slouží jako návod pro zhotovení zkušebního zařízení předepsaných parametrů.

Přínosem práce v oblasti stavebnictví je zhodnocení potenciálního využití obnovitelných materiálů ze zemědělského odpadu (řepková řezanka, pšeničné plevy) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka) na udržitelné stavební izolace. U těchto materiálů jsou definovány hodnoty součinitele tepelné vodivosti při ustálených a

neustálených okrajových podmínkách využitelné pro návrh obvodových konstrukcí energeticky efektivních a udržitelných budov. Dále jsou to hodnoty součinitele tepelné vodivosti dřeva (ve směru tepelného toku kolmo na vlákna), které by mohly posloužit k většímu uplatnění masivního dřeva ve stavbách. A docílit toho, aby se stavby z masivního dřeva (zejména roubené a srubové stavby bez dodatečného zateplení), po splnění závazných požadavků normy na tepelnou ochranu budov ČSN 73 0540-2 (2011), mohly využívat jako stavby pro trvalé bydlení. Oproti dnešnímu využití zejména na rekreační objekty.

Výsledky mohou sloužit pro další navazující výzkumy věnující se problematice testování stavebních systémů při reálných klimatických podmínkách.



## 8 Závěr

V práci je provedena analýza stavebních obvodových konstrukcí ve formě stěnových panelů z hlediska tepelných vlastností. Stěnové panely na bázi dřeva jsou rozděleny do dvou okruhů podle způsobu porovnání naměřených parametrů. V prvním okruhu jsou panely zvoleny dle vlastních návrhů (ozn. 1-4). Jedná se o panely na bázi dřeva s využitím zemědělského odpadu a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu jako obnovitelné sypané tepelné izolace. Konkrétně je to sendvičový panel s výplní z pšeničných plev, sendvičový panel s výplní z řepkové řezanky a sendvičový panel s výplní z dřevní štěpky. Pro porovnání k těmto panelům je testován sendvičový panel s výplní z minerální vlny, která je v současné době nejvíce používanou průmyslově vyráběnou tepelnou izolací. V druhém okruhu jsou stěnové panely dodány od výrobců jako jejich nejvíce používané typy v tuzemsku (ozn. 5-9). Jedná se panely z masivního dřeva, panel rámové dřevostavby a panel z keramických bloků.

Dosažené výsledky mohou být shrnuty do následujících bodů:

1. Byl vytvořen návrh konstrukce experimentálního zařízení teplé skříně, které bylo pro účel této práce postaveno ve fakultní dílně. Na zařízení byly provedeny modifikace za účelem eliminace celkových tepelných ztrát stěnami teplé skříně.
2. Pro zkušební zařízení byla použita experimentální metoda teplé skříně při ustálených okrajových podmínkách dle současné normy ČSN EN ISO 8990 (1998) a navržená vlastní metoda měření při neustálených okrajových podmínkách (s nastavením reálných klimatických podmínek).
3. Obě metody jsou porovnány na základě naměřených tepelně-technických parametrů. Byl prokázán vliv okrajových podmínek na naměřené hodnoty (součinitel prostupu tepla, tepelný odpor). Tento vliv může být způsoben přestupem tepla z okolí do panelu a různými formami sdílení tepla v panelu. U obou metod byla prokázána lineární závislost součinitele prostupu tepla na tepelném toku.
4. U stěnových panelů ozn. 1-4 jsou porovnány naměřené parametry při ustálených a neustálených okrajových podmínkách. Výsledné hodnoty jsou rozdílné. Součinitel prostupu tepla u panelu s výplní z minerální vlny byl po týdenním měření při neustálených okrajových podmínkách o 5 % vyšší ve srovnání s měřením při

ustálených okrajových podmínkách, zatímco u panelu s výplní z pšeničných plev vykazoval o 3 % nižší hodnotu a u panelu s výplní s řepkovou řezankou vykazoval o 12 % nižší hodnotu. Součinitel prostupu tepla panelu s výplní s dřevní štěpkou vykazoval o 0,3 % vyšší hodnotu.

5. Sendvičové panely s výplní ze zemědělského odpadu (pšeničné plevy - ozn.1, řepková řezanka - ozn. 2) a odpadu z dřevozpracujícího průmyslu (dřevní štěpka - ozn. 3) jsou porovnány se sendvičovým panelem s průmyslově vyráběnou izolační výplní z minerální vlny (ozn. 4) při ustálených a neustálených okrajových podmínkách. Sendvičové panely s výplní ze zemědělského odpadu (ozn. 1 a 2) jsou z hlediska hodnoty součinitele prostupu tepla srovnatelné se sendvičovým panelem s průmyslově vyráběnou tepelnou izolací z minerální vlny.
6. Na základě zjištěné hodnoty součinitele tepelné vodivosti bylo prokázáno, že lignocelulózový materiál z biologického odpadu (pšeničné plevy, řepková řezanka), může být využíván jako konkurence-schopná alternativa ke konvenční tepelné izolaci z minerální vlny. U dřevní štěpky by bylo potřeba snížit objemovou hmotnost. Z výsledků plyne že, závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti není lineární. To může být dáno různými frakcemi izolačního materiálu v panelu a různými formami sdílení tepla v panelu.
7. U stěnových panelů ozn. 5-9 jsou porovnány naměřené parametry při neustálených okrajových podmínkách s parametry získanými z matematického modelu (založeném na ustálených okrajových podmínkách) vycházejícího z normy ČSN EN ISO 6946 (2018) na základě deklarovaných parametrů z ČSN 73 0540-3 (2005). Výsledné hodnoty z experimentu a matematického modelu byly rozdílné. Největší rozdíl - vyšší než 30 % byl zaznamenán u masivních dřevěných panelů (ozn. 5 a 6).
8. Součinitel prostupu tepla z experimentálních dat při neustálených okrajových podmínkách byl optimalizován za účelem získání stěnových panelů požadovaných vlastností dle současné závazné normy ČSN 73 0540-2 (2011).
9. Použití neustálených okrajových podmínek (nastavených podle reálných klimatických podmínek) v experimentálním zařízení teplé skříně je možné použít

pro přesné stanovení součinitele prostupu tepla stavebních konstrukcí. Tato metoda může být přesnější a reálnější, zejména pokud jde o obnovitelné materiály (z biologického odpadu, masivního dřeva) s relativně vysokou objemovou hmotností a tepelnou kapacitou. Je to dáno zejména testováním vzorků reálné velikosti při simulování reálných klimatických podmínek. Další výhodou teplé skříně je umístění (poloha) vzorku ve zkušebním zařízení na reálný směr tepelného toku podle budoucí aplikace (stěna, podlaha, plochá/šikmá střecha). Zařízení je vhodné pro složitější sendvičové (vícevrstvé) konstrukce s větší tloušťkou.

10. Celkové množství tepla procházející panelem ( $Wh$ ) se jeví jako nejdůležitější a srovnatelný parametr pro stanovení součinitele prostupu tepla při použití neustálených okrajových podmínek metodou teplé skříně. Kombinace ustáleného stavu na teplé straně a neustáleného stavu na chladné straně teplé skříně umožňuje přesné stanovení energetické náročnosti obvodových konstrukcí. Tato metoda může simulovat skutečné klimatické podmínky a zahrnovat nedokonalosti dané nehomogenními materiály s vyšší tepelnou kapacitou a objemovou hmotností.

## **Spolupráce a návaznosti:**

V rámci doktorského studia proběhlo zapojení studenta do těchto projektů probíhajících na Fakultě lesnické a dřevařské ČZU s návazností na disertační práci.

Projekt IGA 2016-A20/16 (2016-2017): Návrh panelu na bázi dřeva pro obvodové opláštění budov včetně tepelně-technických vlastností a způsobu jeho aplikace. Individuální projekt: Pavelek.

Projekt IGA 2017-B04/17 (2017-2018): Pokročilé metody úpravy fyzikálních a mechanických vlastností třískových desek. Skupinový projekt: Böhm, Hodoušek, Hýsek, Pavelek, Podlena.

Projekt IGA 2018-B01/18 (2018-2019): Testování kolíkových spojů a zjišťování faktorů ovlivňující smykovou pevnost lepeného spoje. Skupinový projekt: Trgala, Hýsek, Pavelek, Podlena.

Projekt OP PPR (Operační program Praha - pól růstu ČR) (2017-2018) - Vývoj konstrukčního řešení předsazené stěny na bázi obnovitelných surovin pro stavby s téměř nulovou spotřebou energie. Pozice: odborný vědecký pracovník („proof-of-concept“, Aktivita KZ6). CZ.07.1.02/0.0/0.0/16\_023/0000111.

Projekt OP PPR (Operační program Praha - pól růstu ČR) (2017-2018) - Vývoj fasádního prkna se zvýšenou životností a barevnou stálostí. Pozice: odborný vědecký pracovník („proof-of-concept“, Aktivita KZ4). CZ.07.1.02/0.0/0.0/16\_023/0000111.

Projekt TAČR (Technologická agentura České republiky) (2017-2019) - Vývoj metodiky stanovení tepelně - optimalizovaných parametrů obytných dřevěných stavebních konstrukcí z pohledu kvality vnitřního prostředí, snížení energetické náročnosti a environmentálních faktorů budov v návaznosti na snížení skleníkových plynů. Pozice: odborný vědecký laborant. TH02020792.

## Seznam publikovaných článků k disertační práci

TRGALA, Kamil; **PAVELEK, Miloš**; WIMMER, Rupert. Energy performance of five different building envelope structures using a modified Guarded Hot Box apparatus- Comparative analysis. *Energy and Buildings*, 2019, 195: 116-125.

**PAVELEK, Miloš**; ADAMOVIČ, Tereza. Bio-Waste Thermal Insulation Panel for Sustainable Building Construction in Steady and Unsteady-State Conditions. *Materials*, 2019, 12.12: 2004.

**PAVELEK, Miloš**; PRAJER, Marek; TRGALA, Kamil. Static and dynamic thermal characterization of timber frame/wheat (*Triticum Aestivum*) chaff thermal insulation panel for sustainable building construction. *Sustainability*, 2018, 10.7: 2363.

OBERHOFNEROVÁ, Eliška; PÁNEK, Miloš; PODLENA Milan; **PAVELEK, Miloš**; ŠTĚRBOVÁ, Irena. Color Stabilization of Siberian and European Larch Wood Using UVA, HALS, and Nanoparticle Pretreatments. *Forests*, 2019, 10.1: 23.

## Seznam literatury a použitých zdrojů

### Elektronické zdroje

1. ADAPA, Phani; TABIL, Lope; SCHOENAU, Greg. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. *Biosystems engineering*, 2009, 104.3: 335-344 [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.022>
2. ALAVEZ-RAMIREZ, Rafael, et al. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 425-431. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.053>
3. AL-JURUF, R. S., et al. Development of heat insulating materials using date palm leaves. *Journal of Thermal Insulation*, 1988, 11.3: 158-164. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1177/109719638801100304>
4. ANIS-UR-REHMAN, M.; MAQSOOD, Asghari. A modified transient method for an easy and fast determination of thermal conductivities of conductors and insulators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35.16: 2040. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/16/320>
5. ARLAUSKIENĖ, A., et al. The effect of catch crops and straw on spring barley nitrogen nutrition and soil humus composition. *Žemdirbystė (Agriculture)*, 2009, 96.2: 53-70.
6. ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G. Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and buildings*, 2011, 43.7: 1618-1626 [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005>.
7. ASDRUBALI, Francesco; D'ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI, Samuele. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 2015, 4: 1-17. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
8. ASDRUBALI, F., et al. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 2017, 114: 307-332. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
9. ASHOUR, Taha, et al. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Materials & Design*, 2010, 31.10: 4676-4685. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.026>
10. ASTE, Niccolò; ANGELOTTI, Adriana; BUZZETTI, Michela. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and buildings*, 2009, 41.11: 1181-1187. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>

11. ATANASIU, Bogdan a Shady ATTIA. *Principles for Nearly Zero-Energy Buildings: paving the way for effective implementation of policy requirements* [online]. Brussel: Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2011 [cit. 2019-07-30]. ISBN 9789491143021. Dostupné z: [https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/209904/1/HR\\_nZEB-study.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/209904/1/HR_nZEB-study.pdf)
12. AUDENAERT, A.; BRIFFAERTS, K.; ENGELS, L. Practical versus theoretical domestic energy consumption for space heating. *Energy Policy*, 2011, 39.9: 5219-5227. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.042>
13. AZADI, Pooya, et al. The evolution of the biofuel science. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 1479-1484. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.181>
14. BAGLIVO, Cristina, et al. Multi-objective optimization analysis for high efficiency external walls of zero energy buildings (ZEB) in the Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 2014, 84: 483-492. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.043>
15. BACHER, Peder; MADSEN, Henrik. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 2011, 43.7: 1511-1522. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.005>
16. BAUER, Alexander, et al. Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *Journal of Biotechnology*, 2009, 142.1: 50-55. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2009.01.017>
17. BENMANSOUR, Nadia, et al. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 2014, 81: 98-104. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>
18. BERARDI, Umberto; NALDI, Matteo. The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance. *Energy and buildings*, 2017, 144: 262-275. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.052>
19. BINICI, Hanifi; AKSOGAN, Orhan. Eco-friendly insulation material production with waste olive seeds, ground PVC and wood chips. *Journal of Building Engineering*, 2016, 5: 260-266. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2016.01.008>
20. BINICI, Hanifi, et al. An environment-friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibers. In: *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, 2013. p. 833-846. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749868>

21. BINICI, Hanifi, et al. Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Construction and Building materials*, 2007, 21.4: 901-906. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.004>
22. BJØRNEBOE, Matilde Grøn; SVENDSEN, Svend; HELLER, Alfred. Evaluation of the renovation of a Danish single-family house based on measurements. *Energy and Buildings*, 2017, 150: 189-199. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.050>
23. BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA. *Materiály na bázi dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva. Praha, 2012a [cit. 2019-07-30]. ISBN 978-80-213-2251-6. Dostupné z: <http://drevene-materialy.fld.czu.cz>
24. BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA. *Materiály na bázi dřeva* [online]. 2012b [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://katalogy.publikace.com/drevene-materialy/katalog/materialy>
25. BRISCHKE, Christian; HANSKE, Malte. Durability of untreated and thermally modified reed (*Phragmites australis*) against brown, white and soft rot causing fungi. *Industrial Crops and Products*, 2016, 91: 49-55.[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.031>
26. BROTÁNEK, Aleš. *For Pasiv 2013: Prezentace na konferenci: Jaké jsou výhody pasivních dřevostaveb*. Praha, 2013.
27. BURATTI, Cinzia, et al. Mechanical characterization and thermal conductivity measurements using of a new'small hot-box'apparatus: innovative insulating reinforced coatings analysis. *Journal of Building Engineering*, 2016a, 7: 63-70. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.05.005>
28. BURATTI, C., et al. Thermal conductivity measurements by means of a new 'Small Hot-Box' apparatus: manufacturing, calibration and preliminary experimental tests on different materials. *International journal of thermophysics*, 2016b, 37.5: 47. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.05.005>
29. CAPOZZOLI, Alfonso; GORRINO, Alice; CORRADO, Vincenzo. A building thermal bridges sensitivity analysis. *Applied Energy*, 2013, 107: 229-243. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>
30. CAPOZZOLI, Alfonso, et al. Vacuum insulation panels: Analysis of the thermal performance of both single panel and multilayer boards. *Energies*, 2015, 8.4: 2528-2547. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.3390/en8042528>
31. CARRÉ, Patrick; POUZET, André. Rapeseed market, worldwide and in Europe. *Ocl*, 2014, 21.1: D102. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2013054>



32. CASTRO-AGUIRRE, Edgar, et al. Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, 107: 333-366. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010>
33. CASTRO-LACOUTURE, Daniel, et al. Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia. *Building and environment*, 2009, 44.6: 1162-1170. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.009>
34. CIHLÁŘ, Jiří a Juraj HAZUCHA. Tepelné izolace. *Pasivní domy* [online]. Brno: Centrum pasivního domu, 2013 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/tepelne-izolace/t231>
35. COSTES, Jean-Philippe, et al. Thermal conductivity of straw bales: Full size measurements considering the direction of the heat flow. *Buildings*, 2017, 7.1: 11. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings7010011>
36. CURTIN, D., et al. Carbon dioxide emissions and transformation of soil carbon and nitrogen during wheat straw decomposition. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62.4: 1035-1041. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040026x>
37. CZAJKOWSKI, Łukasz, et al. Thermal properties of wood-based panels: specific heat determination. *Wood Science and Technology*, 2016, 50.3: 537-545. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0803-7>
38. DA ROSA, Leandro Cantorski, et al. Use of rice husk and sunflower stalk as a substitute for glass wool in thermal insulation of solar collector. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 90-97. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.127>
39. D'ALESSANDRO, F., et al. Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance. *Journal of Building Engineering*, 2017, 11: 56-68. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2017.03.012>
40. DUCOULOMBIER, Laure; LAFHAJ, Zoubeir. Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials. *Case studies in thermal engineering*, 2017, 10: 628-640. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.005>
41. *Ecococon: Determining of Thermal Conductivity Coefficient of Pressed Straw* [online]. 2012 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [http://www.ecococon.lt/wp-content/uploads/sites/15/2013/10/064\\_Ecococon-EN.doc.pdf](http://www.ecococon.lt/wp-content/uploads/sites/15/2013/10/064_Ecococon-EN.doc.pdf)
42. *ESTAV: Konstrukční systémy dřevostaveb: Lehký a těžký dřevěný skelet* [online]. 2016 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/3415.konstrukcni-systemy-drevostaveb-lehky-a-tezky-dreveny-skelet>

43. Eurostat: *Agricultural production -crops* [online]. 2017 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/26212.pdf>
44. EVANGELISTI, Luca, et al. Influence of the thermal inertia in the European simplified procedures for the assessment of buildings' energy performance. *Sustainability*, 2014, 6.7: 4514-4524. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.3390/su6074514>
45. EVOLA, G.; MARGANI, G.; MARLETTA, L. Cost-effective design solutions for low-rise residential Net ZEBs in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 7-18. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.026>
46. EDMINSTER, Ann Virginia; YASSA, Semi; MCDERMID, Matthew. *Efficient Wood Use in Residential Construction: A Practical Guide to Saving Wood, Money and Forests*. Natural Resources Defense Council, 1998.
47. EVON, Philippe, et al. New thermal insulation fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in a twin-screw extruder. *Industrial Crops and Products*, 2014, 52: 354-362. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.049>
48. FAO: *Food and Agriculture data* [online]. 2018 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://www.fao.org/statistics/en/>
49. FARM, Hollinroyd. Information guide to straw bale building. *Baubiologie* [online]. 2001 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://baubiologie.at/download/strawbaleguide.pdf>
50. FENG, Ya. Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. *Energy and Buildings*, 2004, 36.12: 1309-1312. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.08.003>
51. FERREIRA, L. C., et al. Influence of thermal pretreatment on the biochemical methane potential of wheat straw. *Bioresource technology*, 2013, 143: 251-257. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.065>
52. FOSSDAL, Sverre; EDVARDBSEN, Knut Ivar. Energy consumption and environmental impact of buildings: Environmental study shows that the log house has a smaller environmental impact than the timber-frame house. *Building research and information*, 1995, 23.4: 221-226. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613219508727463>
53. FRANCO, Alessandro. An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27.14-15: 2495-2504. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.02.008>
54. GRMELA, Dan. *Tepelně technické posuzování slaměných konstrukcí. Thermal physics assessment of straw bale structures: Seminární práce v rámci doktorského studia* [online].

- 2008 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/5905630-Tepelne-technicke-posuzovani-slamenych-konstrukci.html>
55. GUO, Wendi, et al. Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets. *Fuel*, 2013, 103: 347-355. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.037>
  56. GUPTA, Murlidhar; YANG, Jin; ROY, Christian. Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles☆. *Fuel*, 2003, 82.8: 919-927. [cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00398-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00398-8)
  57. HARUN, Noorfidza Y.; AFZAL, Muhammad T. Effect of particle size on mechanical properties of pellets made from biomass blends. *Procedia engineering*, 2016, 148: 93-99. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>
  58. HRČKA, Richard; BABIAK, Marián. Wood Thermal Properties. *Wood in Civil Engineering*, 2017, 25. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/65805>
  59. HUANG, Puxi, et al. Specific heat capacity measurement of *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo) by differential scanning calorimetry. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 821-831. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.103>
  60. HŮLKA, Ctibor, Radim MARŠÍK, Lubomír ODEHNAL, Pavel ŠTAJNRT a Viktor ZWIENER. Dřevostavby rodinných domů: Technická příručka pro žáky středních průmyslových škol stavebního oboru 36-47-M/01 Stavebnictví. SPŠS Opava [online]. Opava, 2014 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/pozemni\\_stavitelstvi/prirucky/Drevostavby.pdf](http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/pozemni_stavitelstvi/prirucky/Drevostavby.pdf)
  61. z: [http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/pozemni\\_stavitelstvi/prirucky/Drevostavby.pdf](http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/pozemni_stavitelstvi/prirucky/Drevostavby.pdf)
  62. CHARCA, S., et al. Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy and Buildings*, 2015, 108: 55-60. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.053>
  63. CHIKHI, Mourad, et al. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*, 2013, 66: 267-273. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.019>
  64. CHRISTIAN, J.; DESJARLAIS, O.; STOVALL, P. E. Straw-bale wall hot box test results and analysis. In: *ASRAE Conf., Florida*. 1998. [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1998%20B7%20papers/031\\_Christian.pdf](https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1998%20B7%20papers/031_Christian.pdf)
  65. *IMateriály: Deskové materiály v dřevostavbách* [online]. 2016 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/deskove-materialy-v-drevostavbach\\_43814.html](https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/deskove-materialy-v-drevostavbach_43814.html)

66. INGRAO, Carlo, et al. Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 29-42.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.002>
67. JANNOT, Yves; MEUKAM, Pierre. Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip. *Measurement Science and Technology*, 2004, [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/034>
68. JIN, Hong-Qing, et al. Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International journal of heat and mass transfer*, 2016, 92: 589-602. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103>
69. JOCHIM, Stanislav. Determining the heat transfer coefficient of insulated log-cabon walls based on one-dimensional heat conduction. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen res Publica Slovaca*, 2016, 58.2: 101. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.17423/afx.2016.58.2.11>
70. JOSHI, Satish V., et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2004, 35.3: 371-376. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
71. KALNÆS, Simen Edsjø; JELLE, Bjørn Petter. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 2015, 94: 150-176. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>
72. KHEDARI, Joseph, et al. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and environment*, 2004, 39.1: 59-65.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.08.001>
73. KOSSECKA, Elisabeth; KOSNY, Jan. Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. *Energy and Buildings*, 2002, 34.4: 321-331.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00121-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00121-9)
74. KUČEROVÁ, Lucie; ČERNÍKOVÁ, Marcela; HRUBA, Barbora. Thermal technical assessment of selected constructions of wooden houses. In: *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2014. p. 988-991. [cit. 2019-07-30].  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.470.988>
75. KYMÄLÄINEN, Hanna-Riitta; SJÖBERG, Anna-Maija. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and environment*, 2008, 43.7: 1261-1269.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
76. LAGÜELA, S., et al. Thermal conductivity measurements on wood materials with transient plane source technique. *Thermochimica acta*, 2015, 600: 45-51.

[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.11.021>

77. LEHMANN, Steffen. Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society*, 2013, 6: 57-67. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.08.004>
78. LELIEVRE, Dylan; COLINART, Thibaut; GLOUANNEC, Patrick. Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses. *Energy and Buildings*, 2014, 84: 617-627. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>
79. LIMAM, Amel, et al. Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation. *Energy and Buildings*, 2016, 116: 89-95. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.007>
80. LIU, LiFang, et al. The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 912-932. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>
81. MANOHAR, Krishpersad, et al. Biodegradable fibrous thermal insulation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2006, 28.1: 45-47. [cit. 2019-07-30]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782006000100005>
82. *Markets and Markets: Building Thermal Insulation Market by Material (Glass Wool, Stone Wool, Polystyrene), Application (Flat Roof, Pitched Roof, External Wall, Internal Wall, Cavity Wall, Floor), Building Type (Residential, Non-residential) - Global Forecast to 2022* [online]. 2017 [cit. 2019-07-30]. Dostupné <https://www.marketsandmarkets.com/Thanks/subscribepurchase.asp?id=510>
83. MARTIN, K., et al. Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy and Buildings*, 2012, 55: 704-714. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.024>
84. MARTÍN, K., et al. Methodology for the calculation of response factors through experimental tests and validation with simulation. *Energy and Buildings*, 2010, 42.4: 461-467. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.015>
85. MCCABE, Joseph. The thermal resistivity of straw bales for construction. *Unpublished Master's thesis. Department Nuclear Engineering University of Arizona, Tucson, AZ*, 1993.
86. MCCARTNEY, D. H., et al. The composition and availability of straw and chaff from small grain cereals for beef cattle in western Canada. *Canadian journal of animal science*, 2006, 86.4: 443-455. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.4141/A05-092>

87. MIKI, Tsunehisa, et al. Thermal behaviors and transitions of wood detected by temperature-modulated differential scanning calorimetry. *Journal of wood science*, 2012, 58.4: 300-308.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1259-5>
88. MUMAW, J. R. Calibrated hot box: an effective means for measuring thermal conductance in large wall sections. In: *Heat transmission measurements in thermal insulations*. ASTM International, 1974.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1520/STP34779S>
89. *MTA: Materiály pro dřevostavby* [online]. 2015 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.mta.cz/produkty/materialy-pro-drevostavbu/>
90. MUNCH-ANDERSEN, J.; ANDERSEN, B. M. Halmhuse, Udformning og materialeegenskaber (Straw houses, design and material properties). *Statens Byggeforskningsinstitut/Danish Building and Urban Research (By og Byg Resultater/City and Build Results 033)*, Copenhagen, Denmark, 2004. [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://sbi.dk/Assets/Halmhuse/2006-01-12-9974566144.pdf>
91. MYNÁŘ, Josef a Jiří Teslík. Materiály pro dřevostavby. *Dřevostavební portál* [online]. 2016 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://drevostavebniportal-popularizace.msdk.cz/files/Materialy-pro-drevostavby.pdf>
92. NGUYEN, S. T., et al. Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale homogenization approach. *Building and Environment*, 2016, 107: 127-134.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.026>
93. NIK, Vahid M. Application of typical and extreme weather data sets in the hygrothermal simulation of building components for future climate—A case study for a wooden frame wall. *Energy and Buildings*, 2017, 154: 30-45. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.042>
94. *OK Pyrus: Moderní roubené stavby z masivních lepených profilů* [online]. 2014 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://www.okpyrus.cz/aktuality/nizkoenergeticke-roubenky-215.html>
95. ONÉSIPPE, Cristel, et al. Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: thermal considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41.4: 549-556.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.002>
96. PAIVA, Anabela, et al. A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, 2012, 45: 274-279.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>
97. PALUMBO, M., et al. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. *Construction and Building Materials*, 2016, 124: 269-275. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106>

98. PANTHAPULAKKAL, S.; ZERESHKIAN, A.; SAIN, M. Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites. *Bioresource technology*, 2006, 97.2: 265-272. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.043>
99. PANYAKAEW, Satta; FOTIOS, Steve. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and buildings*, 2011, 43.7: 1732-1739. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015>
100. PANYAKAEW, Satta; FOTIOS, Steve. 321: Agricultural Waste Materials as Thermal Insulation for Dwellings in Thailand: Preliminary Results. In: *25 Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin*. 2008. [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.585.122&rep=rep1&type=pdf>
101. PARSONS, Gary. Energy Efficiency of Building Walls: Thermal Modeling, Experimental Testing, Long Term Evaluation and Correlation of Building Wall Systems. *ASHRAE Transactions*, 2013, 119: B1. [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/268095040\\_Energy\\_Efficiency\\_of\\_Building\\_Walls\\_Thermal\\_Modeling\\_Experimental\\_Testing\\_Long\\_Term\\_Evaluation\\_and\\_Correlation\\_of\\_Building\\_Wall\\_Systems\\_DE-13-C002](https://www.researchgate.net/publication/268095040_Energy_Efficiency_of_Building_Walls_Thermal_Modeling_Experimental_Testing_Long_Term_Evaluation_and_Correlation_of_Building_Wall_Systems_DE-13-C002)
102. PAVLÍK, Zbyšek, et al. Application of effective media theory for determination of thermal properties of hollow bricks as a function of moisture content. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34.5: 894-908. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1183-3>
103. PETERSEN, Ann Kristin; SOLBERG, Birger. Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction.: Case: beams at Gardermoen airport. *Environmental Science & Policy*, 2002, 5.2: 169-182. [cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(01\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(01)00044-2)
104. PINTO, Jorge, et al. Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, 2012, 34: 28-33. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014>
105. PINTO, Jorge, et al. Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy and Buildings*, 2011, 43.8: 1985-1990. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.004>
106. POIRIER, Erik, et al. Design and construction of a 53-meter-tall timber building at the university of British Columbia. In: *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*. 2016. [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://www.proholz.at/fileadmin/proholz/media/documents/Thomas-Tannert.pdf>

107. PRAŁAT, K. Research on thermal conductivity of the wood and analysis of results obtained by the hot wire method. *Experimental Techniques*, 2016, 40.3: 973-980. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0096-7>
108. PRETZSCH, Hans. Forest dynamics, growth, and yield. In: *Forest dynamics, growth and yield*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 1-39. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.044>
109. PROVÁZEK, Jiří a Martin Glos. *Dřevostavební portál: Deskové materiály v dřevostavbách* [online]. 2009 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://drevostavebniportal-popularizace.msdk.cz/files/Deskove-materialy-v-drevostavbach.pdf>
110. RAGLAND, K. W.; AERTS, D. J.; BAKER, A. J. Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource technology*, 1991, 37.2: 161-168. [cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90205-X](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90205-X)
111. RAJI, Saed, et al. Thermophysical characterization of a laminated solid-wood pine wall. *Construction and Building Materials*, 2009, 23.10: 3189-3195. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.015>
112. RICCIARDI, P., et al. Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications. *Construction and Building Materials*, 2017, 147: 185-193. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.114>
113. ROUCOULT, J.-M.; DOUZANE, O.; LANGLET, T. Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings*, 1999, 29.2: 129-133. [cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00057-7)
114. ŘIHÁK, Pavel; ŠKOLNÍK, Petr. Heat thermal transmittance of log wall. In: *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2016. p. 429-436. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.824.429>
115. SAHA, Badal C., et al. Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of wheat straw to ethanol. *Process Biochemistry*, 2005, 40.12: 3693-3700. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.04.006>
116. SAIN, Mohini; PANTHAPULAKKAL, Suhara. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products*, 2006, 23.1: 1-8. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.01.006>
117. SALA, J. M., et al. Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis. *Energy and Buildings*, 2008, 40.8: 1513-1520. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.011>
118. *Sandia National Laboratories: The thermal conductivity of free bales of straw: Test report dated May 13, 1994*. [online]. 1994 [cit. 2019-07-30].



119. SARTORI, Igor; NAPOLITANO, Assunta; VOSS, Karsten. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and buildings*, 2012, 48: 220-232. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>
120. SULEIMAN, B. M., et al. Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood science and technology*, 1999, 33.6: 465-473. [cit. 2019-07-30]. <https://doi.org/10.1007/s002260050130>
121. SVOBODA, Zbyněk a Jiří NOVÁK. Řešené příklady ze stavební fyziky. *Katedra technických zařízení budov* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2014 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/stavebni-fyzika-resene-priklady-zs+jn-2014.08.31\\_04.pdf](http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/stavebni-fyzika-resene-priklady-zs+jn-2014.08.31_04.pdf)
122. ŠADZEVIČIUS, Raimondas; GURSKIS, Vincas; RAMUKEVIČIUS, Dainius. Sustainable construction of agro-industrial buildings from straw panels. In: *Rural Development 2015: Towards the Transfer of Knowledge, Innovations and Social Progress: Proceedings of the 7th International Scientific Conference, 19–20th November, 2015, Aleksandras Stulginskis University, Lithuania [elektroninis išteklius]. Akademija: Aleksandras Stulginskis University*. 2015. [cit. 2019-07-30]. DOI: <http://doi.org/10.15544/RD.2015.012>
123. *Šance pro budovy* [online]. 2019 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [www.sanceprobudovy.cz/energeticke-standardy](http://www.sanceprobudovy.cz/energeticke-standardy)
124. ŠÍPKOVÁ, Veronika, Šárka KORBEOVÁ a Jiří LABUDEK. *Stavební tepelné izolace pro svislé konstrukce*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2019-07-30]. ISBN 978-80-248-3661-4. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4670880-Stavebni-tepelne-izolace.html>
125. TENWOLDE, Anton; MCNATT, J. Dobbin; KRAHN, Lorraine. *Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings*. Oak Ridge National Lab., TN (USA); Forest Service, Madison, WI (USA). Forest Products Lab., 1988. [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1988/tenwo88a.pdf>
126. THYGESSEN, Anders, et al. Electricity generation by microbial fuel cells fuelled with wheat straw hydrolysate. *Biomass and bioenergy*, 2011, 35.11: 4732-4739. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.026>
127. TOFANICA, Bogdan Marian, et al. Properties of rapeseed (*Brassica napus*) stalks fibers. *Journal of Natural Fibers*, 2011, 8.4: 241-262. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2011.626189>
128. *USDA: World agricultural supply and demand estimates report to incorporate minor table changes* [online]. 2018 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/>

129. USDA: *Global agricultural Information Network: EU-28 Oilseeds and Products Annual* [online]. 2017 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Oilseeds%20and%20Product%20Annual\\_Vienna\\_EU-28\\_3-31-2017.pdf](https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Oilseeds%20and%20Product%20Annual_Vienna_EU-28_3-31-2017.pdf)
130. VAY, Oliver, et al. Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions. *Wood science and technology*, 2015, 49.3: 577-589. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0716-x>
131. VOLLARO, Roberto De Lieto, et al. Building energy performance analysis: A case study. *Energy and Buildings*, 2015, 87: 87-94. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
132. VOLOLONIRINA, Oly; COUTAND, Marie; PERRIN, Bernard. Characterization of hygrothermal properties of wood-based products–Impact of moisture content and temperature. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 223-233. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014>
133. VRÁNA, Tomáš; GUDMUNDSSON, Kjartan. Comparison of fibrous insulations–Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation. *Construction and Building Materials*, 2010, 24.7: 1151-1157. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.026>
134. WAMBUA, Paul; IVENS, Jan; VERPOEST, Ignaas. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites science and technology*, 2003, 63.9: 1259-1264. [cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)
135. WANG, Weimin; ZMEUREANU, Radu; RIVARD, Hugues. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and environment*, 2005, 40.11: 1512-1525. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.017>
136. WEI, Kangcheng, et al. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy and Buildings*, 2015, 87: 116-122. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.026>
137. WHITTAKER, Carly; SHIELD, Ian. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 1-11. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>
138. WILLIAMS, Joseph, et al. Less is more: A review of low energy standards and the urgent need for an international universal zero energy standard. *Journal of Building Engineering*, 2016, 6: 65-74. [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.02.007>
139. WILSON, James B. *Forests, Carbon and Climate Change: Chapter seven highlights: Using Wood Products To Reduce Global Warming* [online]. 2006 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [https://corrim.org/wp-content/uploads/2017/12/Using\\_Wood\\_Products\\_to\\_Reduce\\_Global\\_Warming.pdf](https://corrim.org/wp-content/uploads/2017/12/Using_Wood_Products_to_Reduce_Global_Warming.pdf)

140. WIMMER, R., et al. *Haus der Zukunft. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie in Zusammenarbeit mit asbn und StrohTec* [online]. 2001 [cit. 2019-07-30].  
Dostupné z: <http://www.baubiologie.at/download/hausderzukunft.pdf>
141. WINTER, Dustin a Eric OKERSTROM. *Structural Systems Wood Platform Framing* [online]. 2015 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: [https://static1.squarespace.com/static/5313b826e4b02a8d25126c66/t/552d6abce4b05dc92592aa35/1429039804616/33471-82504+-+Dustin+Winter+-+Mar+5%2C+2015+813+PM+-+A-3Wood+Platform+Framing\\_DW\\_EO.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5313b826e4b02a8d25126c66/t/552d6abce4b05dc92592aa35/1429039804616/33471-82504+-+Dustin+Winter+-+Mar+5%2C+2015+813+PM+-+A-3Wood+Platform+Framing_DW_EO.pdf)
142. YANG, Han-Seung; KIM, Dae-Jun; KIM, Hyun-Joong. Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*, 2003, 86.2: 117-121.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00163-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00163-3)
143. ZHANG, Yifeng, et al. Generation of electricity and analysis of microbial communities in wheat straw biomass-powered microbial fuel cells. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2009, 75.11: 3389-3395.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02240-08>
144. ZHAO, Dongliang, et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*, 2016, 138.4: 040802.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034605>
145. ZHOU, Xiao-yan, et al. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 2010, 42.7: 1070-1074.  
[cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020>
146. ZHU, Na; MA, Zhenjun; WANG, Shengwei. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50.12: 3169-3181 [cit. 2019-07-30]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.019>

### **Tištěné zdroje**

1. ANSELL, Martin P. *Wood composites*. Waltham, MA: Elsevier, 2015. ISBN 978-1-78242-454-3.
2. BERGE, Bjørn. *The ecology of building materials*. 2nd ed. Oxford: Architectural Press, 2009. ISBN 978-1-85617-537-1.
3. BLASS, Hans Joachim a Carmen SANDHAAS. *Timber Engineering - Principles for Design*. 2013. ISBN 3731506734.

4. FOURIER, Joseph. *Théorie Analytique de la Chaleur 1822*. Paris: Jacques Gabay, 1988. Stavitel. ISBN 2-87647-046-2.
5. HERZOG, Thomas. *Timber construction manual*. Boston: Birkhäuser, 2004. ISBN 978-3-7643-7025-1.
6. HOUDEK, Dalibor a Otakar KOUDELKA. *Srubové domy z kulatin*. 5. vyd. Vážany nad Litavou: JoshuaCreative, c2013. ISBN 978-80-904414-6-0.
7. HUDEC, Mojmír. *Pasivní rodinný dům: proč a jak stavět*. Praha: Grada, 2008. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-2555-0.
8. HUDEC, Mojmír, Blanka JOHANISOVÁ a Tomáš MANSBART. *Pasivní domy z přírodních materiálů*. Vyd. 2., aktualiz. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
9. HUGUES, Theodor, Ludwig STEIGER a Johann WEBER. *Timber construction: details, products, case studies*. Munich: Edition Detail, c2004. ISBN 37-643-7032-7.
10. HORÁČEK, Petr. *Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva*. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy, 2004. ISBN 80-86386-59-7.
11. CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 978-80-247-2532-1.
12. JOSTEN, Elmar, Thomas REICHE a Bernd WITTCHEN. *Dřevo a jeho obrábění*. Praha: Grada, 2010. Průvodce truhláře. ISBN 978-80-247-2961-9.
13. KING, Bruce a Mark ASCHHEIM. *Design of straw bale buildings: the state of the art*. San Rafael, CA: Green Building Press, c2006. ISBN 0976491117.
14. KOLB, Josef. *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2275-7.
15. KULHÁNEK, František. *Stavební fyzika II: stavební tepelná technika*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3408-9.
16. MÁRTON, Jan. *Stavby ze slaměných balíků: slaměné izolace v nízkoenergetických a pasivních domech, návrh staveb šetrných k životnímu prostředí, hliněné omítky, ozeleněné střechy*. 2., dopl. a aktualiz. vyd. Liberec: J. Márton, 2014. ISBN 978-80-260-5713-0.
17. MILLER, Frederic P.; VANDOME, Agnes F.; MCBREWSTER, John. *Passive solar building design: Passive solar building design, sun path, building insulation, daylighting, solar water heating, passive house, solar energy, low-energy house, zero-energy building*. Beau Bassin: Alphascript Pub, 2009. ISBN 978-613-0046-491.
18. MINKE, Gernot a Friedemann MAHLKE. *Stavby ze slámy: jak pořídít z balíků slámy standardní dům*. Ostrava: HEL, 2009. ISBN 978-80-86167-31-2.

19. NYČ, Miroslav. *Sádrokarton*. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-802-4709-864.
20. NEWTON, Isaac. *Isaaci Newtoni opera quae exstant omnia*. Excudebat Joannes Nichols, (1785\*=-vydání).
21. PAVLAS, Marek. *Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: technologie CLT*. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-271-0055-2.
22. PFEIFEROVÁ, Magda, Karel SRDEČNÝ a František ŠIMEK. *Slaměný dům*. České Budějovice: Rosa, 2001. ISBN 80-238-6834-9.
23. POČINKOVÁ, Marcela, Danuše ČUPROVÁ a Olga RUBINOVÁ. *Úsporný dům*. Brno: CPress, 2012. Stavíme. ISBN 978-80-264-0014-1.
24. PREGIZER, Dieter. *Zásady pro stavbu pasivního domu*. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 9788024724317.
25. RŮŽIČKA, Martin. *Stavíme dům ze dřeva*. Third edition. Praha: Grada, 2006. ISBN 80-247-1461-2.
26. RŮŽIČKA, Martin. *Moderní dřevostavba*. Third edition. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3298-5.
27. SIAU, John F. *Transport processes in wood*. Springer Verlag Berlin, 1984. ISBN-13:978-3-642-69215-4.
28. TYWONIAK, Jan. *Nízkoenergetické domy 3: nulové, pasivní a další*. Praha: Grada, 2012. Stavitel. ISBN 978-80-247-3832-1.
29. TYWONIAK, Jan. *Nízkoenergetické domy: principy a příklady*. Praha: Grada, 2005. Stavitel. ISBN 80-247-1101-x.
30. VAŘEKA, Josef a Václav FROLEC. *Lidová architektura: encyklopedie*. 2., přeprac. vyd., V nakl. Grada 1. vyd. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1204-8.
31. VAVERKA, Jiří. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 8021429100.
32. VOSS, Karsten a Eike MUSALL. *Net zero energy buildings: International projects of carbon neutrality in buildings*. Munich: Detail green books, 2013. ISBN 978-3955531720.
33. WATTS, Andrew. *Modern construction handbook*. Third edition. Vienna, Austria: Ambra/V, 2013. ISBN 978-3990434543.
34. YARBROUGH, D. W., K. E. WILKES, P.A. OLIVIER, R.S. GRAVES a A. VOHRA. Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells. *Thermal conductivity 27: thermal expansion 15 : joint conferences, October 26-29,*

2003, Knoxville, Tennessee, USA. Lancaster, Pa.: DEStech Pub., c2005, s. 222-230. ISBN 1-932078-34-7.

35. ZAHRADNÍČEK, Václav a Pavel HORÁK. *Moderní dřevostavby*. Vyd. 2., aktualiz. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-3568-6.

### Technické normy

1. *ASTM C1363 - 97: Standard Test Method for the Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, 1997.
2. *ASTM E1269 - 05: Standard Test Method For Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, 2005.
3. *ČSN 73 0540-1: Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2005.
4. *ČSN 73 0540-2: Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2011.
5. *ČSN 73 0540-3: Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2005.
6. *ČSN 73 0540-4: Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2005.
7. *ČSN EN ISO 6946: Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2018.
8. *ČSN EN 12 667: Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2001.
9. *ČSN EN 1946-4: Tepelné chování stavebních výrobků a stavebních dílců – Specifická kritéria pro posuzování laboratorních měření veličin šíření tepla – Část 4: Měření metodou teplé skříně*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika., 2001.
10. *ČSN EN ISO 8990: Tepelná izolace - Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu - Kalibrovaná a chráněná teplá skříně*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika, 1998.
11. *ČSN EN ISO 10 456: Stavební materiály a výrobky - Tepelně vlhkostní vlastnosti - Tabelované návrhové hodnoty a postupy pro stanovení deklarovaných a návrhových tepelných hodnot*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika, 2009.

12. ČSN EN ISO 10 211: *Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích - Tepelné toky a povrchové teploty - Podrobné výpočty*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika, 2018.
13. ČSN EN ISO 14 683: *Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích - Lineární činitel prostupu tepla - Zjednodušené metody a orientační hodnoty*. Český normalizační institut. Praha, Česká republika, 2018.
14. *Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Baustrohballen*. Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin, Deutschland, 2006.
15. *ISO 8302: Thermal Insulation - Determination of Steady - State Thermal Resistance and Related Properties - Guarded Hot Plate Apparatus First Edition*. The International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 1991.
16. *ISO 11357-4: Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 4: Determination of specific heat capacity*. The International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2014.
17. *ISO 3310-1: Test sieves - Technical requirements and testing - Part 1: Test sieves of metal wire cloth*. The International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2016.
18. *ISO 8894-1: Refractory materials - Determination of thermal conductivity - Part 1: Hot-wire methods (cross-array and resistance thermometer)*. The International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2010.
19. *STN 73 0540-3: Tepelná ochrana budov. Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konstrukcí a budov. Část 3: Vlastnosti prostředí a stavebných výrobků*. Úřad pro normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo. Bratislava, Slovensko, 2012.

### **Legislativní dokumenty**

1. Commission Delegated Regulation (EU) No 157/2014 of 30 October 2013 on the conditions for making a declaration of performance on construction products. Brusel, Belgium. Dostupné z:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0157>
2. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32. Brusel, Belgium, 2012, 315: 1-56.  
Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>
3. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union, Brusel, Belgium, 2010. Dostupné z:  
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>

4. Directive 2004/35/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage. Official Journal of the European Union L, Brusel, Belgium, 2004, 143: 56-75.  
Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0035>
5. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union, Brusel, Belgium, 2009, 5: 2009.  
Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0028>
6. Vyhláška č. 268/2009 Sb.: Vyhláška o technických požadavcích na stavby. Ministerstvo pro místní rozvoj, Praha, Česká republika, 2009.  
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-268>
7. Vyhláška č. 499/2006 Sb.: Vyhláška o dokumentaci staveb. Ministerstvo pro místní rozvoj, Praha, Česká republika, 2006.  
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-499>
8. Vyhláška č. 78/2013 Sb.: Vyhláška o energetické náročnosti budov. Ministerstvo pro místní rozvoj, Praha, Česká republika, 2013.  
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2013-78>
9. Zákon č. 183/2006 Sb.: Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). Parlament České republiky, Praha, Česká republika, 2006.  
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183>
10. Zákon č. 406/2000 Sb.: Zákon o hospodaření energií. Parlament České republiky, Praha, Česká republika, 2000.  
Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-406>

### **Použitý software**

MS Office 2016 (word, excel)

Archicad 19 - výuková verze

Autocad 2018 - výuková verze

Area 2017 EDU (Svoboda Software) - freeware verze

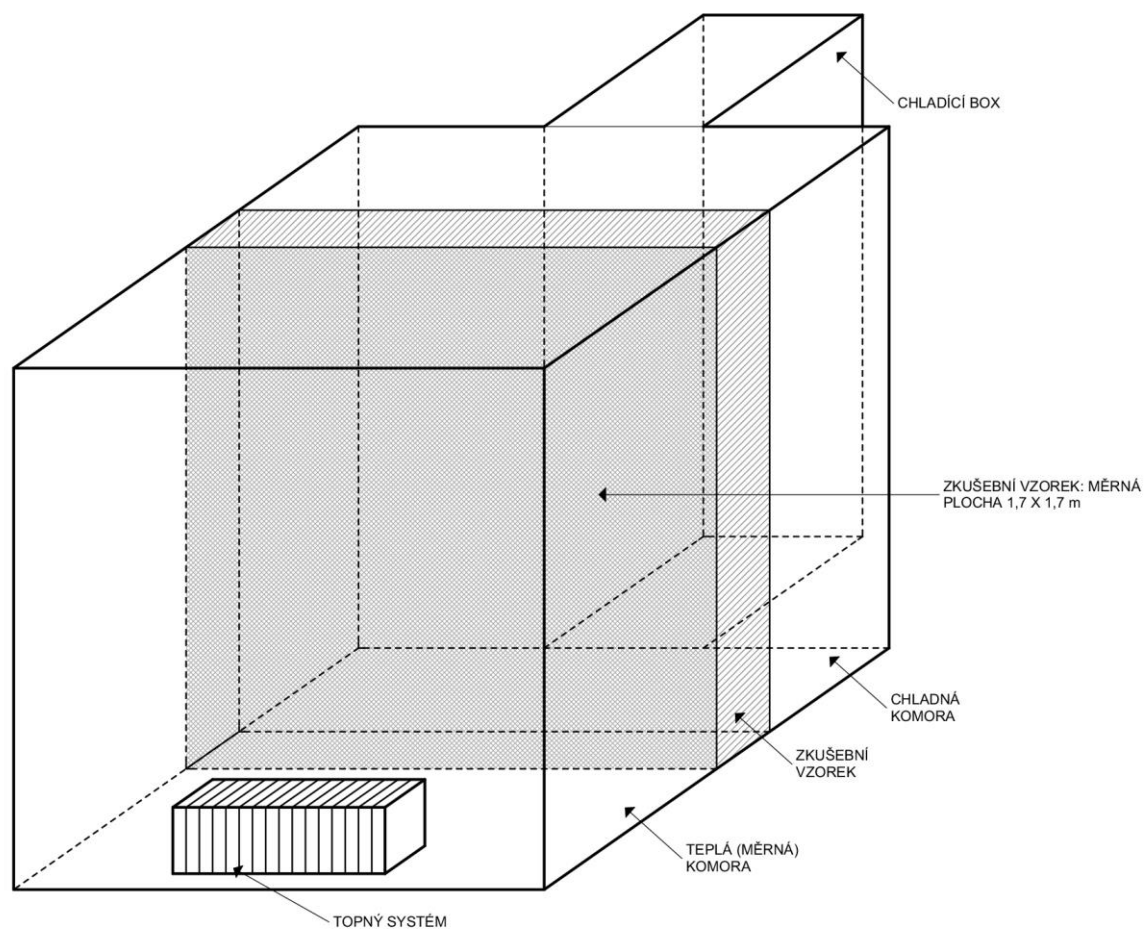
Testo Saveris software



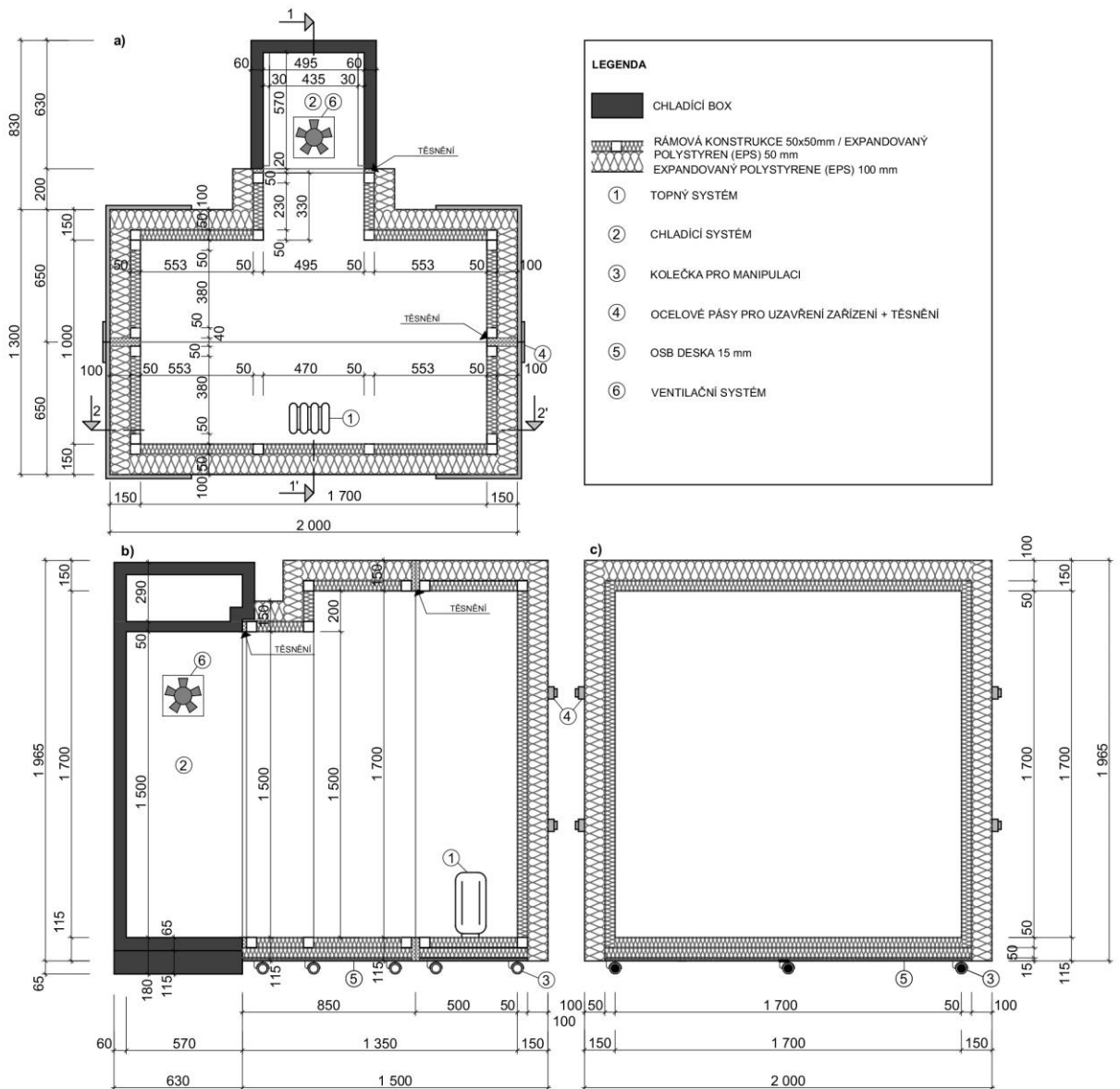
## Seznam příloh

<b>Příloha 1:</b> 3D Schéma návrhu experimentálního zařízení teplé skříně .....	178
<b>Příloha 2:</b> Výrobní výkresy teplé skříně: (a) půdorys/horizontální řez; (b) vertikální řez 1-1'; (c) vertikální řez 2-2' .....	179
<b>Příloha 3:</b> Výroba konstrukce teplé skříně ve fakultní dílně.....	180
<b>Příloha 4:</b> Instalace teplotních čidel na povrchu stěnového panelu, pohled na teplou stranu panelu.....	180
<b>Příloha 5:</b> (a) Instalace izolačního rámečku z expandovaného polystyrenu po obvodu panelu, (b) instalace teplotního čidla pomocí tmelu a lepicí pásky.....	181
<b>Příloha 6:</b> Teplá skřín po osazení testovaného panelu a uzavření obou komor ocelovými pásky .....	181
<b>Příloha 7:</b> Teplá skřín z boku po osazení testovaného panelu a uzavření obou komor ocelovými pásky; vpravo teplá komora, vlevo chladná komota .....	182
<b>Příloha 8:</b> Měřicí přístroje (a) báze Testo Saveris (sběrnice), (b) monitorování naměřených dat pomocí softwaru, (c) rádiová sonda Testo Saveris s čidly teploty a vlhkosti, (d) instalace teplotních čidel na povrchu testovaného panelu.....	182
<b>Příloha 9:</b> Měřicí přístroje - Analyzátor výkonu Rohde & Schwarz HMC 8015, ukládání dat pomocí USB flash disku.....	183
<b>Příloha 10:</b> Měřicí přístroje - Kontrolní analyzátor výkonu DVH5261- M od firmy Acean Neris a sběrnice inteligentních teplotních a vlhkostních čidel typu THT2 od firmy Papouch s přímým připojením k počítačové síti .....	183
<b>Příloha 11:</b> Měřicí přístroj - Multifunkční měřicí přístroj Testo 435 s teplotní sondou pro kontrolní měření teploty vzduchu v laboratoři .....	184
<b>Příloha 12:</b> Výrobní výkresy panelu na bázi dřeva pro testování izolačních výplní (ozn. 1-4) (a) půdorys/horizontální řez, (b) vertikální řez .....	185
<b>Příloha 13:</b> Výroba konstrukce panelu na bázi dřeva pro testování izolačních výplní (ozn. 1-4) ve fakultní dílně .....	186
<b>Příloha 14:</b> Příprava vzorků na měření obsahu vlhkosti u izolačních výplní (ozn. 1-4 ), na obrázku řepková řezanka.....	186
<b>Příloha 15:</b> Sítová analýza u sypaných izolačních výplní (ozn. 1-3), na obrázku řepková řezanka.....	187
<b>Příloha 16:</b> Panel na bázi dřeva s izolační výplní z pšeničných plev (ozn. 1).....	187
<b>Příloha 17:</b> Panel na bázi dřeva s izolační výplní z řepkové řezanky (ozn. 2).....	188
<b>Příloha 18:</b> Panel na bázi dřeva s izolační výplní z dřevní štěpky (ozn. 3).....	188
<b>Příloha 19:</b> Panel na bázi dřeva s izolační výplní z minerální vlny (ozn. 4).....	189
<b>Příloha 20:</b> Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5).....	189
<b>Příloha 21:</b> Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7) .....	190
<b>Příloha 22:</b> Panel rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8).....	190
<b>Příloha 23:</b> Panel z keramických tvárnic Porotherm (ozn. 9) .....	191
<b>Příloha 24:</b> Kondicionování stěnových panelů v laboratoři.....	191

## Přílohy



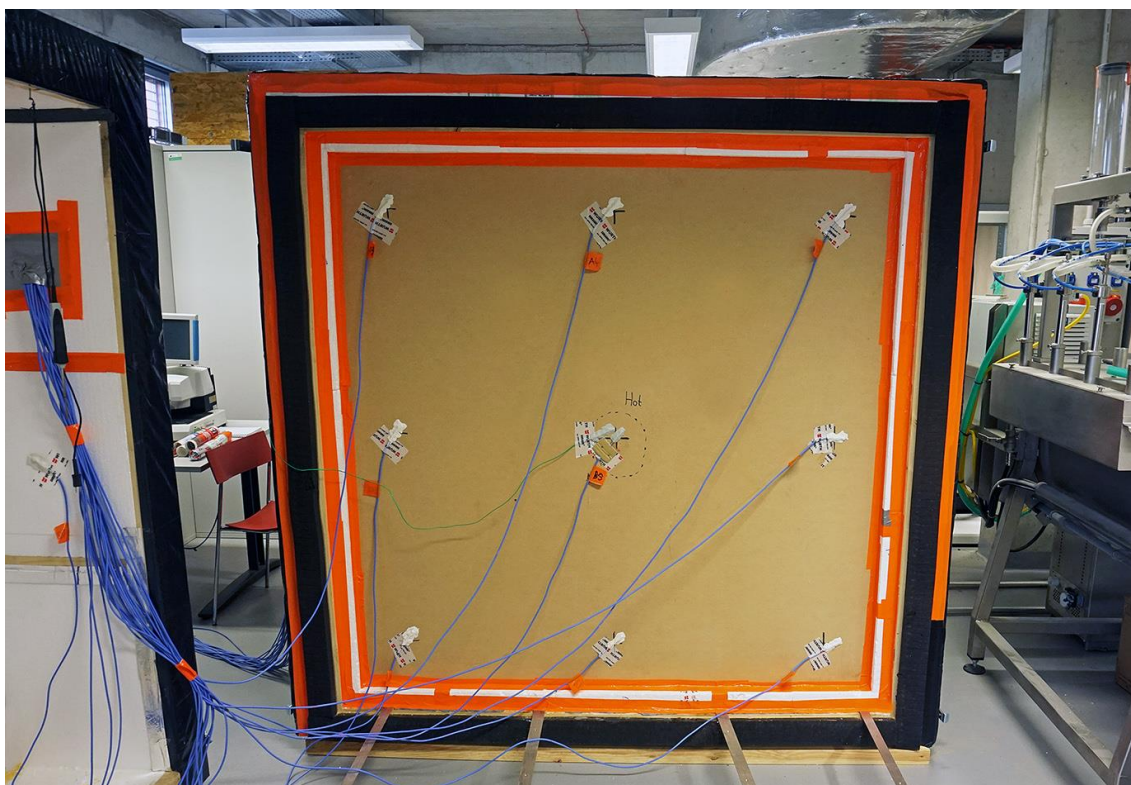
**Příloha 1:** 3D Schéma návrhu experimentálního zařízení teplé skříně



**Příloha 2:** Výrobní výkresy teplé skříně: (a) půdorys/horizontální řez; (b) vertikální řez 1-1'; (c) vertikální řez 2-2'



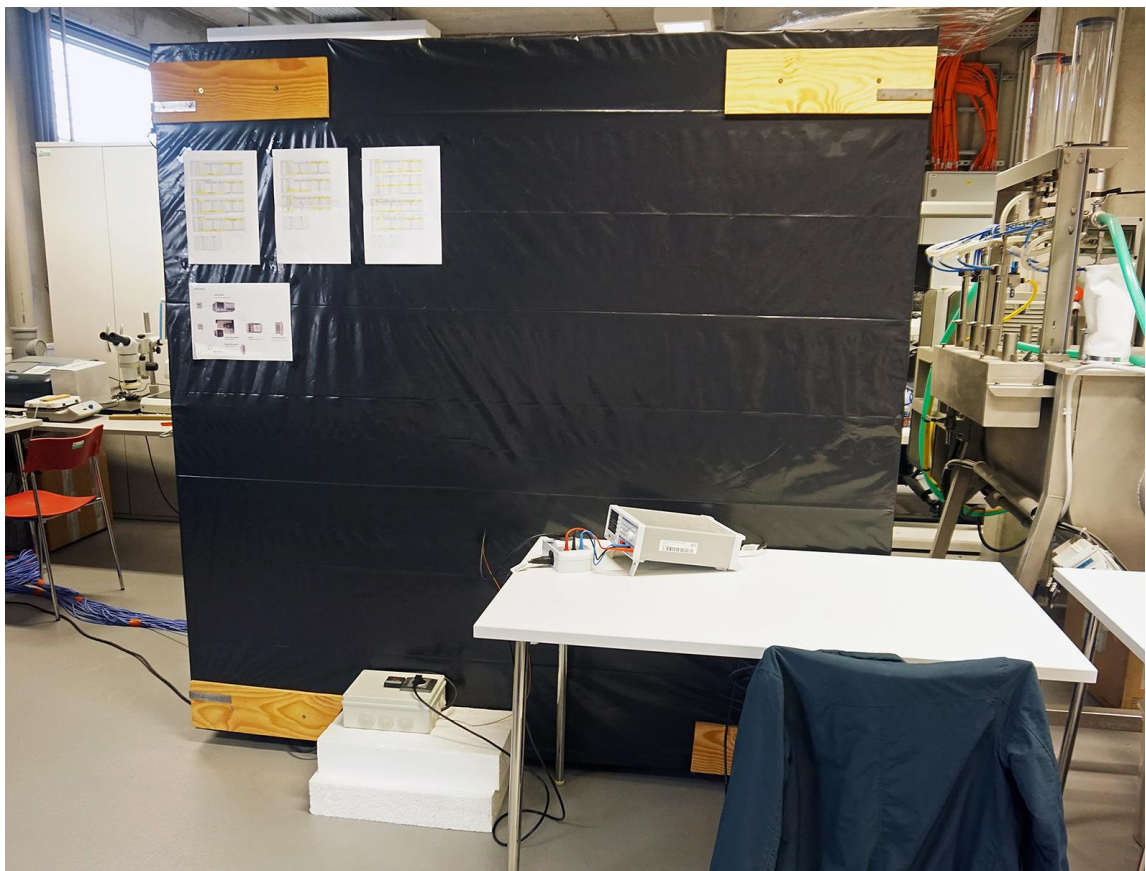
**Příloha 3:** Výroba konstrukce teplé skříně ve fakultní dílně



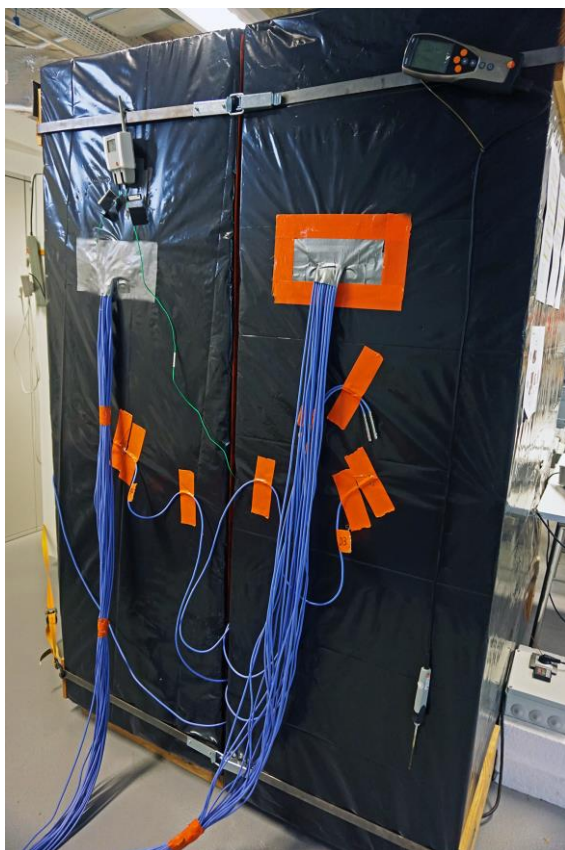
**Příloha 4:** Instalace teplotních čidel na povrchu stěnového panelu, pohled na teplou stranu panelu



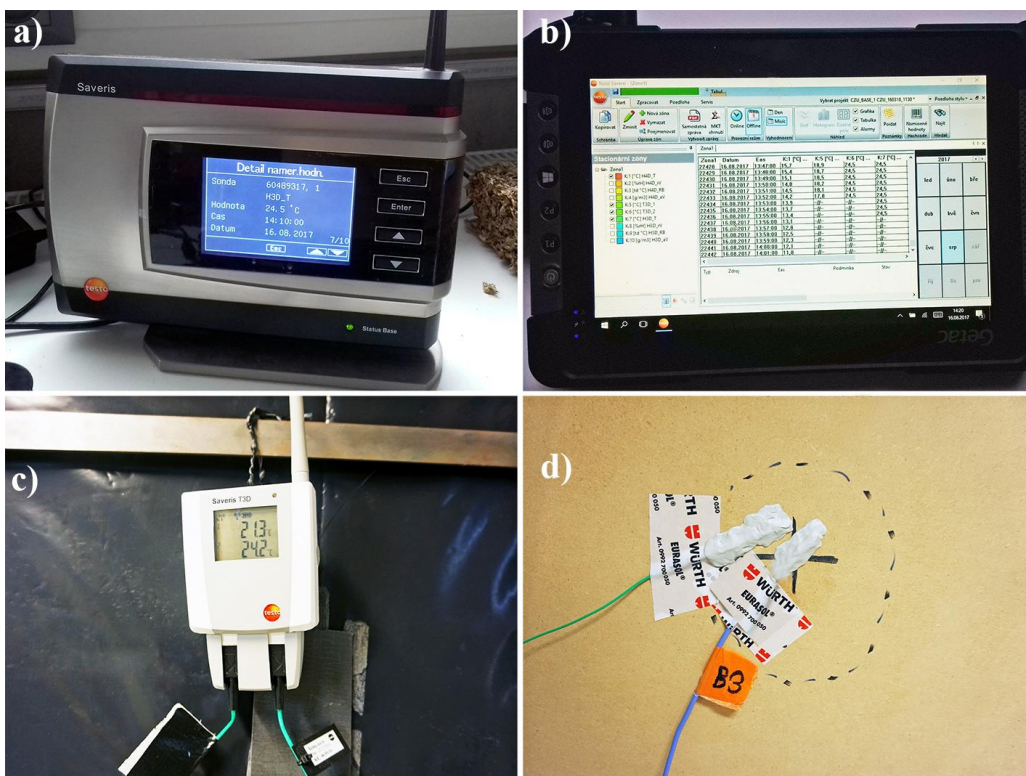
**Příloha 5:** (a) Instalace izolačního rámečku z expandovaného polystyrenu po obvodu panelu, (b) instalace teplotního čidla pomocí tmelu a lepicí pásky



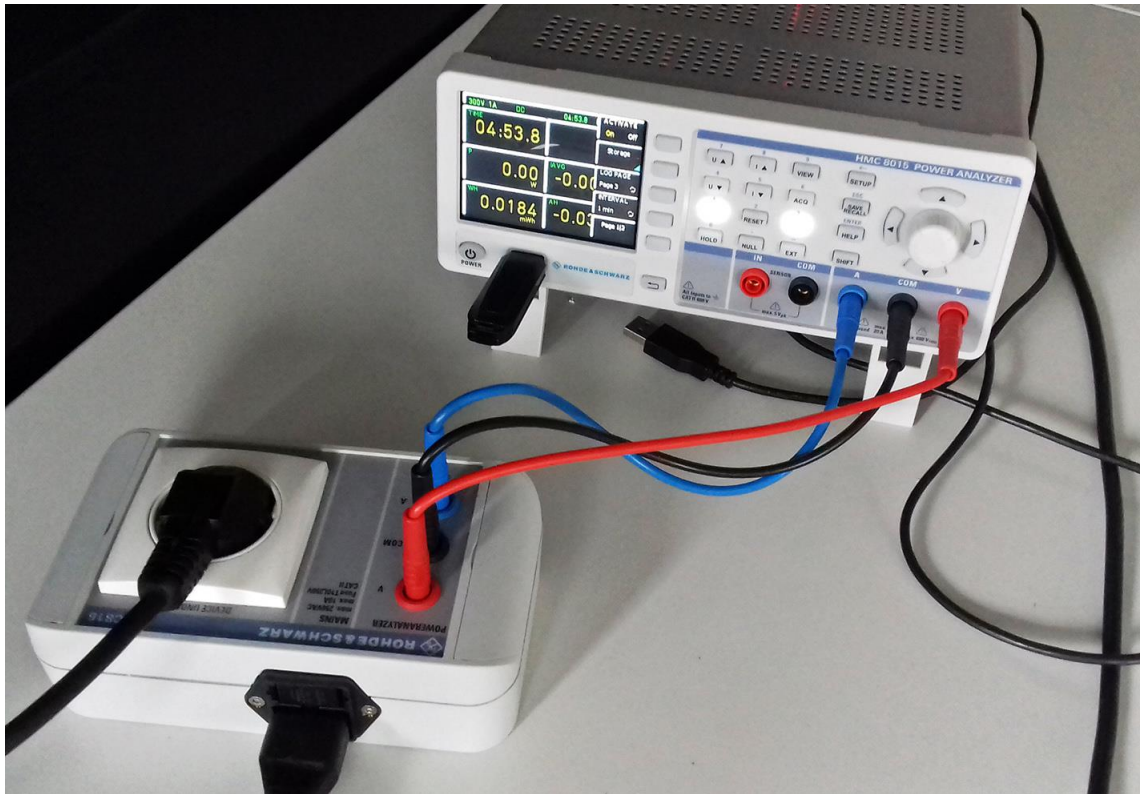
**Příloha 6:** Teplá skřín po osazení testovaného panelu a uzavření obou komor ocelovými pásy



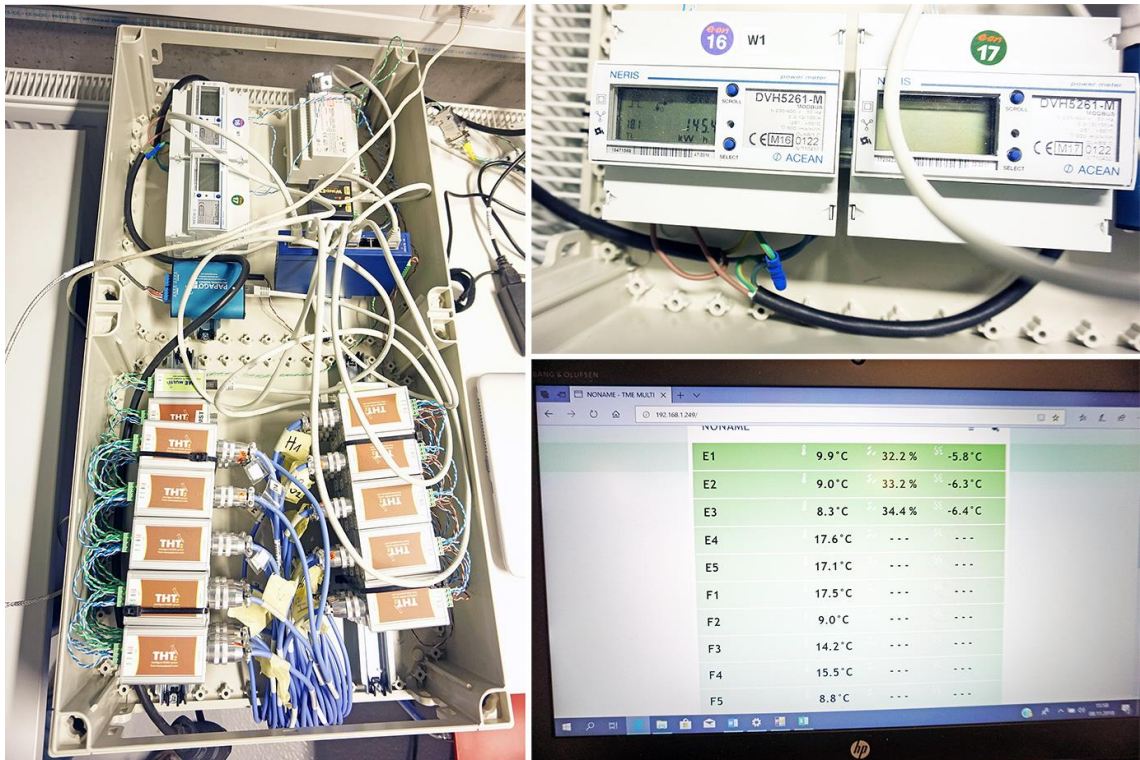
**Příloha 7:** Teplá skřín z boku po osazení testovaného panelu a uzavření obou komor ocelovými pásky; vpravo teplá komora, vlevo chladná komota



**Příloha 8:** Měřicí přístroje (a) báze Testo Saveris (sběrnice), (b) monitorování naměřených dat pomocí softwaru, (c) rádiová sonda Testo Saveris s čidly teploty a vlhkosti, (d) instalace teplotních čidel na povrchu testovaného panelu



**Příloha 9:** Měřicí přístroje - Analyzátor výkonu Rohde & Schwarz HMC 8015, ukládání dat pomocí USB flash disku

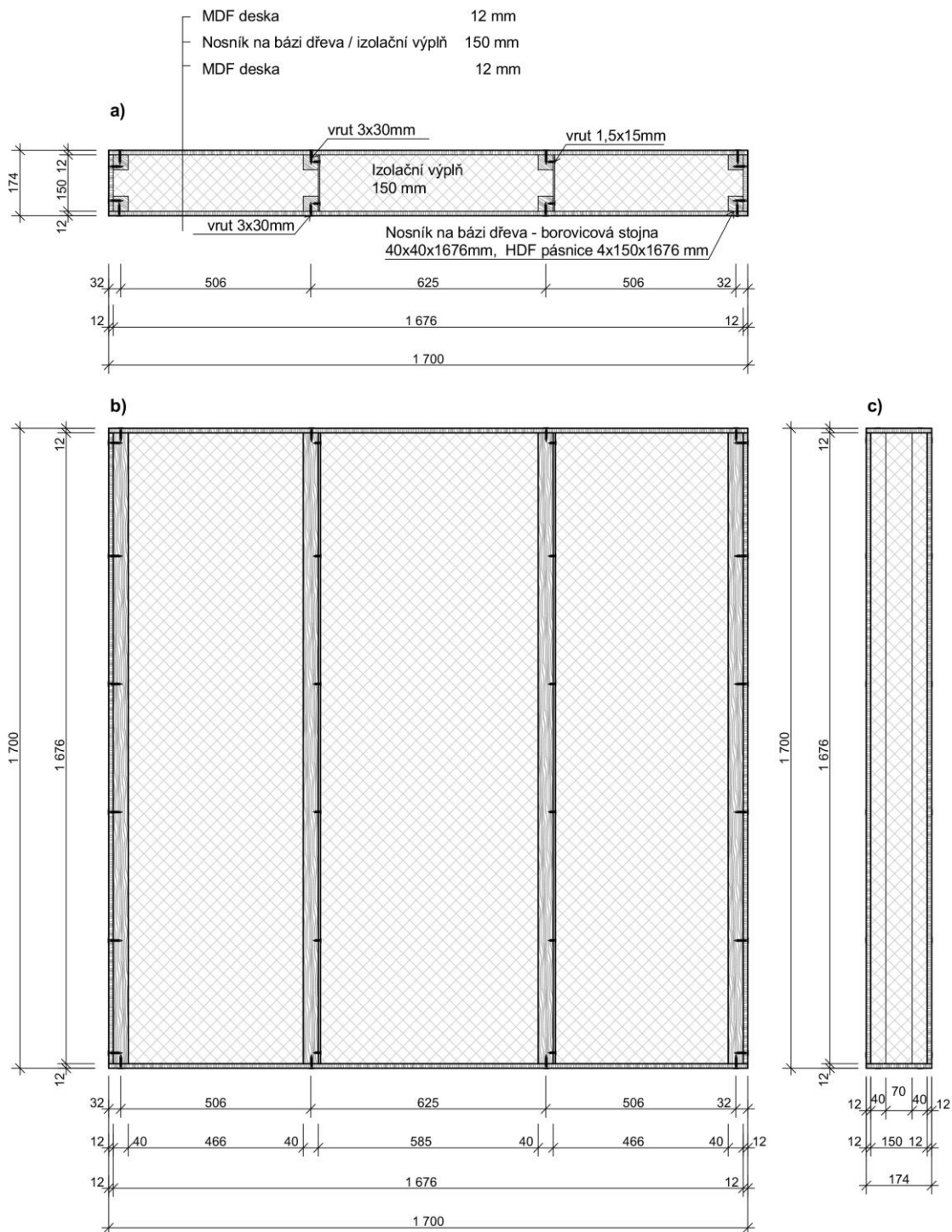


**Příloha 10:** Měřicí přístroje - Kontrolní analyzátoři výkonu DVH5261- M od firmy Acean Neris a sběrnice inteligentních teplotních a vlhkostních čidel typu THT2 od firmy Papouch s přímým připojením k počítačové síti



**Příloha 11:** Měřicí přístroj - Multifunkční měřicí přístroj Testo 435 s teplotní sondou pro kontrolní měření teploty vzduchu v laboratoři





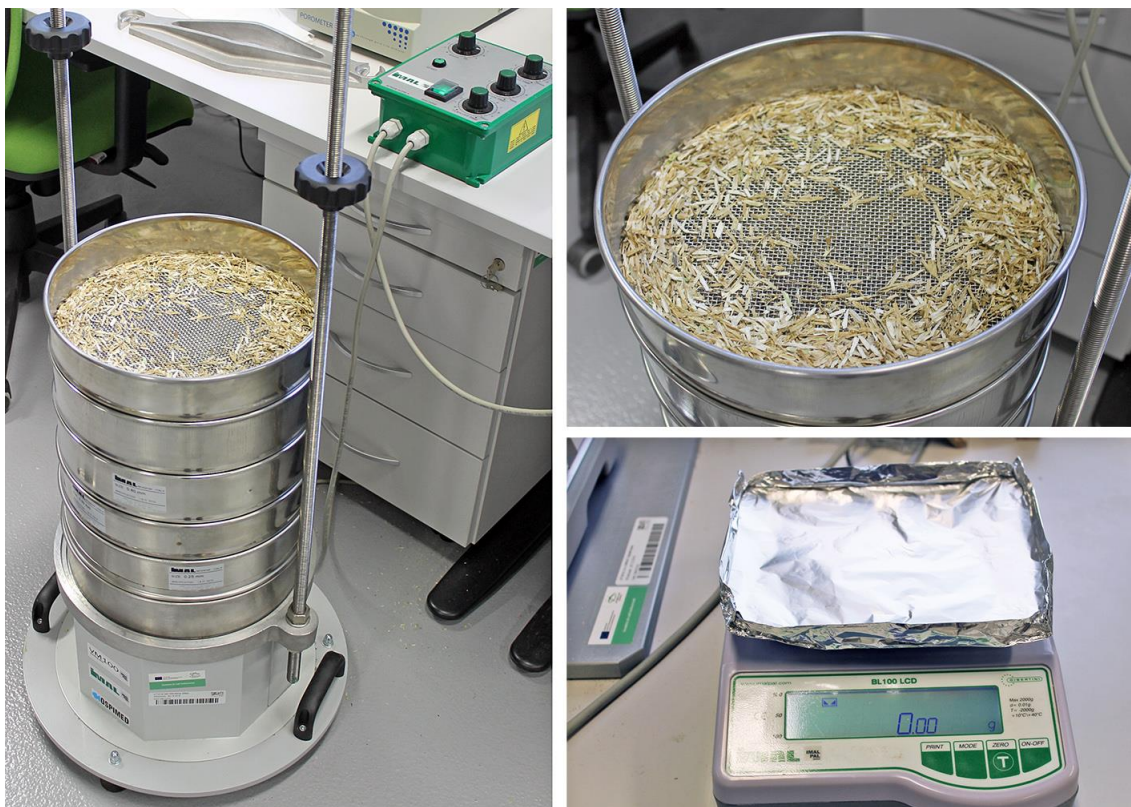
**Příloha 12:** Výrobní výkresy panelu na bázi dřeva pro testování izolačních výplní (ozn. 1-4) **(a)** půdorys/horizontální řez, **(b)** vertikální řez



**Příloha 13:** Výroba konstrukce panelu na bázi dřeva pro testování izolačních výplní (ozn. 1-4) ve fakultní dílně



**Příloha 14:** Příprava vzorků na měření obsahu vlhkosti u izolačních výplní (ozn. 1-4), na obrázku řepková řezanka



**Příloha 15:** Sítová analýza u sypaných izolačních výplní (ozn. 1-3), na obrázku řepková řezanka



**Příloha 16:** Panel na bázi dřeva s izolační výplní z pšeničných plev (ozn. 1)



**Příloha 17:** Panel na bázi dřeva s izolační výplní z řepkové řezanky (ozn. 2)



**Příloha 18:** Panel na bázi dřeva s izolační výplní z dřevní štěpky (ozn. 3)



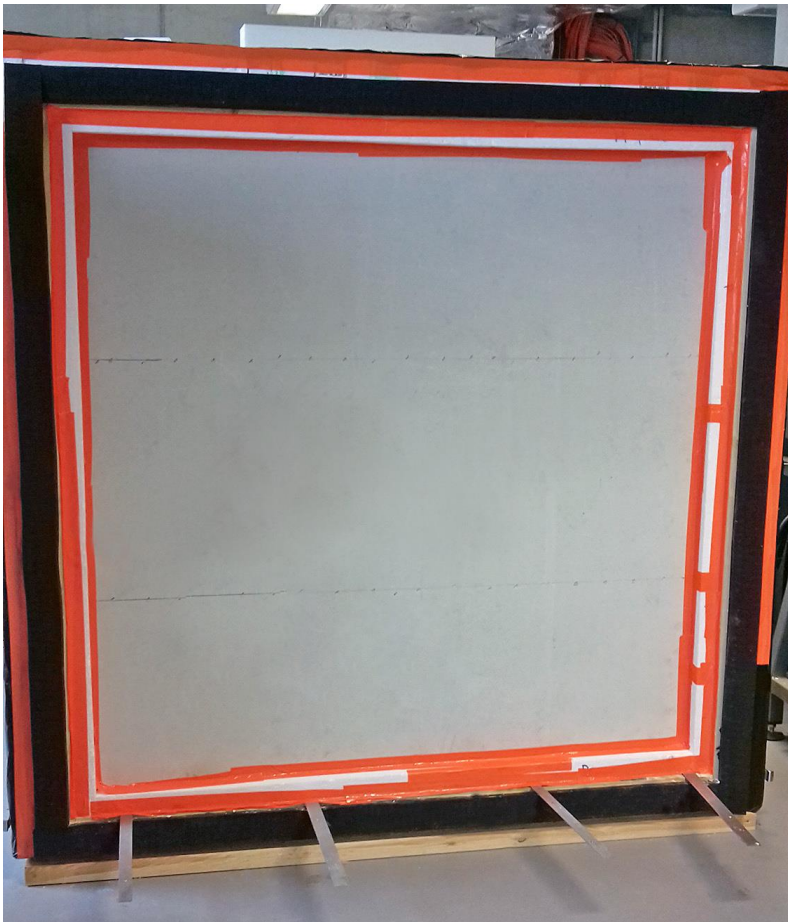
**Příloha 19:** Panel na bázi dřeva s izolační výplní z minerální vlny (ozn. 4)



**Příloha 20:** Panel roubené stěny z lepených smrkových profilů (ozn. 5)



**Příloha 21:** Panel zateplené roubené stěny ze smrkových profilů (ozn. 7)



**Příloha 22:** Panel rámové dřevostavby s izolační výplní (ozn. 8)



**Příloha 23:** Panel z keramických tvárnic Porotherm (ozn. 9)



**Příloha 24:** Kondicionování stěnových panelů v laboratoři