

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí



Diplomová práce

Posouzení stěnového panelu s PUR izolací z pohledu stavební fyziky

Autor: Bc. Tomáš Svoboda
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Horáček

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Svoboda

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

Posouzení stěnového panelu s PUR izolací z pohledu stavební fyziky

Název anglicky

Assessment of wall panel with PUR insulation from the perspective of building physics

Cíle práce

Cílem práce je experimentální a teoretická analýza přestupu tepla a vlhkosti přes stěnový panel s PUR tepelnou izolací. Experimentální část práce vychází z návrhu a výroby vzorků variant stěnových panelů na bázi PUR, a měření jejich tepelných vlastností ve vyhřívané/ochlazované komoře. Teoretická analýza je zaměřena na numerické řešení úlohy za stacionárních a nestacionárních podmínek metodou konečných prvků. Práce má posoudit u panelů konkrétní materiálové skladby a geometrie (a) tepelné vlastnosti a (b) riziko kondenzace vody v konstrukci panelu. Výstupem práce je srovnání skutečného a modelování chování panelu a návrh případné materiálové a/nebo geometrické optimalizace panelu.

Metodika

1. Posouzení stěnového panelu proveďte (a) teoreticky výpočtem a (b) experimentálně. U obou alternativ posuzujte stejnou skladbu a konstrukci panelu, a stejné podmínky prostředí.
2. Teoretický výpočet bude vycházet ze současného pohybu vlhkostního a teplotního pole v panelu za nestacionárních podmínek, tj. proměnlivých vlastností prostředí a materiálových konstant v čase. Okrajové podmínky pro výpočet volte dle experimentu (viz. bod 4). Na základě výpočtu navrhnete optimální skladbu panelu.
3. Experiment proveďte na vámi vyrobených vzorcích panelů o plošných rozměrech cca 1x1 m v několika variantách. Na těchto vzorcích proveďte zkoušku v "hot-boxu" dle normativního postupu a stanovte (a) hustotu tepelného a vlhkostního toku přes panel, (b) rozložení teplot a vlhkosti na povrchu a v průřezu panelu, (c) součinitel prostupu tepla a (d) difúzní odpor panelu.
4. Změřený průběh veličin experimentem porovnejte s teoretickým výpočtem pohybu tepla a vlhkosti a na základě statistických metod vyhodnoťte.

Doporučený rozsah práce

60 str.

Klíčová slova

stavební fyzika, tepelný a difúzní tok, dřevěný stěnový panel, PUR izolace, experimentální měření, metoda konečných prvků

Doporučené zdroje informací

HUDEC, Mojmir, Blanka JOHANISOVÁ a Tomáš MANSBART. Pasivní domy z přírodních materiálů. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4243-4

HUDEC, Mojmir. Pasivní rodinný dům: proč a jak stavět. Praha: Grada, 2008. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-2555-0

KOLB, J. – KOŽELOUH, B. *Dřevostavby : systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4071-3.

KULHÁNEK, František. Stavební fyzika II: stavební tepelná technika. 5., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04957-0

LINHART, Ladislav. Zateplování budov. Praha: Grada, 2010. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-3361-6

NOVOTNÝ, Marek. Tepelné izolace a stavební tepelná technika. Praha: ABF, 1994. Stavby a rekonstrukce. ISBN 80-901608-0-8

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

prof. Dr. Ing. Petr Horáček

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 4. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 01. 05. 2020

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Posouzení stěnového panelu s PUR izolací z pohledu stavební fyziky vypracoval samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Petra Horáčka a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 01. 05. 2020

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi za trpělivost a cenné rady, které mi poskytl při konzultacích této diplomové práce a také Ing. Miloši Pavelekovi Ph.D. za obětavou pomoc při laboratorních pokusech prováděných v rámci této práce.

Abstrakt

Cílem práce na téma *Posouzení stěnového panelu s PUR izolací z pohledu stavební fyziky* je experimentální a teoretická analýza přestupu tepla a vlhkosti přes stěnový panel s polyuretanovou izolací.

V literární rešerši je uveden přehled jednotlivých konstrukcí dřevostaveb a materiálů v nich používaných včetně jejich materiálových vlastností. Další kapitolou je teorie přestupu tepla a vlhkosti.

Pro analýzu přestupu tepla a vlhkosti byly navrženy čtyři vzorky stěnových panelů pro porovnání. Pro jejich teoretickou analýzu byl vytvořen numerický model, na kterém se simuloval průběh tepla a vlhkosti každým sendvičovým panelem.

Pro ověření vypočítaných hodnot byla navržena a vyrobena teplá skříň, což je experimentální zařízení sloužící pro simulaci teplotních podmínek a měření prostupu tepla. Do tohoto zařízení bylo nutné vložit vzorky vyrobených stěn a provést měření.

Výsledky teoretického měření byly porovnány z pohledu přestupu tepla i vlhkosti a za stacionárních i nestacionárních podmínek. U experimentálního měření bylo možné zjistit pouze tepelné vlastnosti, jež byly zhodnoceny a porovnány s teoretickým výpočtem. Byla také provedena ekonomická analýza pro zjištění nákladů na jednotlivé skladby stěnových panelů.

Klíčová slova: stavební fyzika, tepelný a difúzní tok, dřevěný stěnový panel, PUR izolace, experimentální měření, metoda konečných prvků

Abstract

The aim of this thesis on the topic Assessment of a wall panel made with polyurethane insulation from the point of view of building physics is an experimental and theoretical analysis of heat and humidity transfer through a wall panel with polyurethane insulation.

The literature search provides an overview of individual structures of wooden buildings and materials used in them including their material properties. The next chapter is the theory of heat and humidity transfer.

For the analysis of heat and moisture transfer four samples of wall panels were designed for comparison. A numerical model was created for their theoretical analysis on which the transfer of heat and humidity was simulated in each sandwich panel.

To verify the calculated values a warm box was designed and manufactured which is an experimental device used to simulate temperature conditions and measure heat transfer. It was necessary to insert samples of manufactured walls into this device and perform measurements.

The results of the theoretical measurement were compared from the point of view of heat and moisture transfer and under stationary and non-stationary conditions. In the experimental measurement it was possible to determine only the thermal properties which were evaluated and compared with the theoretical calculation. An economic analysis was also performed to determine the cost of individual compositions of wall panels.

Keywords: building physics, heat and diffusion transfer, wooden wall panel, PUR insulation, experimental measurements, finite element method

Obsah

1 Úvod	12
2 Cíl práce	13
3 Literární rešerše	14
3.1 Druhy konstrukcí dřevostaveb.....	14
3.1.1 Srubové konstrukce.....	14
3.1.2 Hrázděné konstrukce	16
3.1.3 Sloupkové a rámové konstrukce	17
3.1.4. Skeletové konstrukce	19
3.1.5 Konstrukce z masivního dřeva	20
3.2 Materiály pro výrobu rámových konstrukcí.....	22
3.2.1 Nosné materiály	23
3.2.2 Opláštěvací materiály.....	25
3.2.3 Izolační materiály využívané v rámových konstrukcích	30
3.2.4 Přehled vlastností stavebních materiálů	42
3.3 Popis výroby rámových konstrukcí.....	44
3.4 Teorie šíření tepla	48
3.4.1 Součinitel tepelné vodivosti	49
3.4.2 Tepelný odpor	49
3.4.3 Součinitel prostupu tepla	50
3.4.4 Vedení tepla (kondukce)	50
3.4.5 Šíření tepla prouděním (konvekce)	52
3.4.6 Šíření tepla sáláním (radiace)	52
3.5 Teorie šíření vodní páry	53
4 Metodika.....	57
4.1 Metoda teoretického výpočtu.	57
4.2 Metoda teplé skříně	57

4.2 Popis výroby a zprovoznění teplé skříně	60
4.3. Popis testovaných stěnových panelů	65
4.3.1. Vzorek 1	67
4.3.2. Vzorek 2	68
4.3.3. Vzorek 3	70
4.3.4. Vzorek 4	71
5 Výsledky	73
5.1 Výsledky měření metodou teplé skříně	73
5.2 Výsledky teoretického výpočtu metodou konečných prvků – stacionární podmínky	82
5.3 Výsledky teoretického výpočtu metodou konečných prvků – nestacionární podmínky	94
5.4 Ekonomické zhodnocení	107
6 Diskuse.....	110
7 Závěr	112
8 Seznam literatury.....	115
9 Přílohy	117
9.1 Stacionární výpočet	120
9.2 Nestacionární výpočet	123

Seznam obrázků

Obrázek 1: Srubová konstrukce Zdroj: www.drevoastavby.cz	15
Obrázek 2: Srubová konstrukce Zdroj: www.drevoastavby.cz	17
Obrázek 3: Rámová konstrukce Zdroj: autor	18
Obrázek 4: Skeletová konstrukce Zdroj: www.dietzholzbau.de	20
Obrázek 5: Konstrukce z CLT panelů Zdroj: www.drevoastavby.cz	22
Obrázek 6: KVH hranol Zdroj: autor.....	23
Obrázek 7: BSH profil Zdroj: autor.....	24
Obrázek 8: OSB desky Zdroj: autor	26
Obrázek 9: Sádrokartonová deska Zdroj: www.eshop.unihobby.cz	27
Obrázek 10: Sádrovláknité desky Zdroj: www.dek.cz	28
Obrázek 11: Cementotřískové desky Zdroj: www.drevoonline.cz	29
Obrázek 12: minerální vata Zdroj: autor	31
Obrázek 13: Dřevovláknitá izolace Zdroj: www.drevoastavby.cz	32
Obrázek 14: Aplikace celulózové izolace Zdroj: www.climatizer.cz	34
Obrázek 15: Expandovaný polystyren Zdroj: autor.....	35
Obrázek 16: Extrudovaný polystyren Zdroj: www-woddcote.cz	36
Obrázek 17: Aplikace PUR izolace Zdroj: autor	38
Obrázek 18: Metoda kalibrované teplé skříně Zdroj: vypracoval autor podle EN ISO 8990	58
Obrázek 19: Metoda chráněné teplé skříně Zdroj: vypracoval autor podle EN ISO 8990	58
Obrázek 20: Výkres teplé skříně Zdroj: autor	60
Obrázek 21: 3D zobrazení konstrukce teplé skříně Zdroj: autor.....	61
Obrázek 22: Aplikace PUR pěny na skříně Zdroj: autor	62
Obrázek 23: Kompletní teplá skříně Zdroj: autor	63
Obrázek 24: Umístění teplotních čidel na teplé straně Zdroj: autor.....	64
Obrázek 25: Chladná strana skříně – zkušební měření Zdroj: autor	64
Obrázek 26: Nářezový plán vzorků Zdroj: autor	65
Obrázek 27: Průřez stěnou číslo 1 Zdroj: autor.....	67
Obrázek 28: Technický výkres stěny číslo 1 Zdroj: autor	68
Obrázek 29: Průřez stěnou číslo 2 Zdroj: autor	69
Obrázek 30: Technický výkres stěny číslo 2 Zdroj: autor	69

Obrázek 31: Průřez stěnou číslo 3 Zdroj: autor	70
Obrázek 32: Technický výkres stěny číslo 3 Zdroj: autor.....	71
Obrázek 33: Průřez stěnou číslo 4 Zdroj: autor	72
Obrázek 34: Technický výkres stěny číslo 4 Zdroj: autor	72
Obrázek 35: Termovizní snímek 1. vzorku Zdroj: autor	74
Obrázek 36: Termovizní snímek 2. vzorku Zdroj: autor	76
Obrázek 37: Termovizní snímek vzorku číslo 3 Zdroj: autor.....	78
Obrázek 38: Termovizní snímek 4. vzorku Zdroj: autor	80
Obrázek 39: Náskres konstrukce vzorového domu Zdroj: autor.....	107

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení OSB desek Zdroj:	26
Tabulka 2: Přehled vlastností stavebních materiálů Zdroje jsou uvedeny v tabulce	42
Tabulka 3: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 1 Zdroje jsou uvedeny v tabulce	67
Tabulka 4: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 2 Zdroje jsou uvedeny v tabulce	68
Tabulka 5: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 3 Zdroje jsou uvedeny v tabulce	70
Tabulka 6: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 4 Zdroje jsou uvedeny v tabulce	71
Tabulka 7: Výsledky experimentálního měření - 1. vzorek Zdroj: autor	73
Tabulka 8: Výsledky experimentálního měření - 2. vzorek Zdroj: autor	76
Tabulka 9: Výsledky experimentálního měření - 3. vzorek Zdroj: autor	78
Tabulka 10: Výsledky experimentálního měření - 4. vzorek Zdroj: autor	80
Tabulka 11: Souhrn výsledků všech vzorků Zdroj: autor	82
Tabulka 12: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 1 Zdroj: autor.....	107
Tabulka 13: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 2 Zdroj: autor.....	108
Tabulka 14: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 3 Zdroj: autor.....	108
Tabulka 15: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 4 Zdroj: autor.....	108
Tabulka 16: Souhrn tepelných výsledků Zdroj: autor	112
Tabulka 17: Souhrn vlhkostních výsledků Zdroj: autor	113

Seznam grafů

Graf 1: Závislost teploty povrchu na čase - 1. vzorek Zdroj: autor.....	74
Graf 2: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 1. vzorek Zdroj: autor.....	75
Graf 3: Závislost teploty povrchu na čase - 2. vzorek Zdroj: autor.....	76
Graf 4: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 2. vzorek Zdroj: autor.....	77
Graf 5: Závislost teploty povrchu na čase - 3. vzorek Zdroj: autor.....	79
Graf 6: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 3. vzorek Zdroj: autor.....	79
Graf 7: Závislost teploty povrchu na čase - 4. vzorek Zdroj: autor.....	81
Graf 8: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 4. vzorek Zdroj: autor.....	81
Graf 9: Rozložení teplot - 1. vzorek Zdroj: autor.....	83
Graf 10: Hustota tepelného toku - 1. vzorek Zdroj: autor.....	83
Graf 11: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 1. vzorek Zdroj: autor.....	84
Graf 12: Hustota vlhkostního toku - 1. vzorek Zdroj: autor.....	84
Graf 13: Rozložení teplot - 2. vzorek Zdroj: autor.....	85
Graf 14: Hustota tepelného toku - 2. vzorek Zdroj: autor.....	86
Graf 15: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 2. vzorek Zdroj: autor.....	87
Graf 16: Hustota vlhkostního toku - 2. vzorek Zdroj: autor.....	88
Graf 17: Rozložení teplot - 3. vzorek Zdroj: autor.....	89
Graf 18: Hustota tepelného toku - 3. vzorek Zdroj: autor.....	89
Graf 19: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 3. vzorek Zdroj: autor.....	90
Graf 20: Hustota vlhkostního toku - 3. vzorek Zdroj: autor.....	91
Graf 21: Rozložení teplot - 4. vzorek Zdroj: autor.....	92
Graf 22: Hustota tepelného toku - 4. vzorek Zdroj: autor.....	92
Graf 23: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 4. vzorek Zdroj: autor.....	93
Graf 24: Hustota vlhkostního toku - 4. vzorek Zdroj: autor.....	94
Graf 25: Závislost hustoty tepelného toku na čase - 1. vzorek Zdroj: autor.....	95
Graf 26: Závislost součinitele prostupu tepla na čase - 1. vzorek Zdroj: autor.....	95
Graf 27: Závislost hustoty vlhkostního toku na čase - 1. vzorek Zdroj: autor.....	96
Graf 28: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na čase - 1. vzorek Zdroj: autor.....	97
Graf 29: Závislost hustoty tepelného toku na čase - 2. vzorek Zdroj: autor.....	98
Graf 30: Závislost součinitele prostupu tepla na čase - 2. vzorek Zdroj: autor.....	98
Graf 31: Závislost hustoty vlhkostního toku na čase - 2. vzorek Zdroj: autor.....	99

Graf 32: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 2. vzorek Zdroj: autor.....	100
Graf 33: Závislost hustoty tepelného toku na času - 3. vzorek Zdroj: autor....	101
Graf 34: Závislost součinitele prostupu tepla na času - 3. vzorek Zdroj: autor.	101
Graf 35: Závislost hustoty vlhkostního toku na času - 3. vzorek Zdroj: autor....	102
Graf 36: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 3. vzorek Zdroj: autor.....	103
Graf 37: Závislost hustoty tepelného toku na času - 4. vzorek Zdroj: autor....	104
Graf 38: Závislost součinitele prostupu tepla na času - 4. vzorek Zdroj: autor.	104
Graf 39: Závislost hustoty vlhkostního toku na času - 4. vzorek Zdroj: autor....	105
Graf 40: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 4. vzorek Zdroj: autor.....	106

1 Úvod

Výroba domů z dřevěnou konstrukcí prochází neustálým vývojem. Historicky se jako izolační materiály používaly výhradně přírodní produkty. Postupně se vzrůstajícími nároky na tepelný odpor konstrukce se začaly vyhledávat nové materiály, které tepelně izolační vlastnosti stěn zdokonalují.

Každý materiál má své výhody i nevýhody. V současnosti již nejde jen o jeho tepelné vlastnosti, ale i o rychlost aplikace, která zkracuje čas výstavby a tím i výslednou cenu.

Nejčastěji využívaným materiálem pro izolování konstrukce dřevostaveb je minerální vata. Poměrně nový materiál, který se v tuzemsku začal prosazovat, je polyuretanová pěna. Ve stěnách dřevostaveb se nejdříve začala používat v Severní Americe a postupně se tento materiál dostal i do Evropy. Protože polyuretanová pěna v České republice není zatím příliš rozšířena, byla vytvořena tato práce, aby její vlastnosti posoudila.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je teoretická a experimentální analýza přestupu tepla a vlhkosti přes stěnový panel s tepelnou izolací tvořenou polyuretanovou pěnou. Experimentální část práce spočívá v návrhu a konstrukci čtyř různých variant vzorků stěnových panelů. Pro toto experimentální měření musí být vyrobena teplá komora, do které se vsadí jednotlivé vzorky stěn a provede se měření tepelných vlastností. Další částí práce je teoretická analýza, která je zaměřena na numerické řešení úlohy za stacionárních a nestacionárních podmínek metodou konečných prvků. Práce má posoudit stavebně fyzikální vlastnosti jednotlivých panelů. Výstupem práce je srovnání experimentálního měření a matematického výpočtu. Z těchto výsledků se poté případně navrhnou změny skladby panelů, aby se dosáhlo optimálních fyzikálních i ekonomických parametrů.

3 Literární rešerše

3.1 Druhy konstrukcí dřevostaveb

Mezi základní typy patří

1. Srubové konstrukce
2. Hrázděné konstrukce
3. Sloupkové a rámové konstrukce
4. Skeletové konstrukce
5. Konstrukce z masivního dřeva

3.1.1 Srubové konstrukce

Srubové domy u nás mají velmi významnou historickou tradici. Jejich konstrukce je založena na kladení klád, které jsou odkorněny, do nich jsou vydlabány dlaby a kladou se přes sebe za pomoci jednoduchých plátů a spojů. Dříve se tyto stavby často zakládaly na plochých kamenech, které byly jakousi hydroizolací a spodní prahová kláda se většinou dělala z dřeviny, která je odolnější proti vodě, jako například modřín nebo dub. (Kolb, 2010)

Významnou předností srubových domů je velká míra využití obnovitelných surovin s nízkým podílem spotřeby primární energie z neobnovitelných zdrojů. V minulosti se velmi často tyto domy stavěly z kulatiny, která se těžila v bezprostřední blízkosti staveb a tím téměř odpadaly náklady na dopravu, které jsou dnes ve stavebnictví poměrně významné. Všechny prvky stavby se rovněž opracovávaly v místě stavby za pomoci ručních nástrojů, takže tento způsob stavby je pravděpodobně jeden z nejekologičtějších způsobů výstavby. V těchto stavbách se využívá dřevo jako hlavní izolant a jeho masivní hmota plní akumulární funkci. (Copper, 2000)

Tyto stavby ale nemají pouze výhody, ale v některých technických parametrech mají také dost nevýhod. Jedna z hlavních nevýhod je použití mokrého rostlého dříví. Tím, že dřevo ve stavbě postupně sesychá, vznikají velké objemové změny. Tyto změny nejsou navíc rovnoměrné, a proto se dům v různých místech snižuje rozdílně. Pokud se jedná například o patrový dům,

kde se využívá podkroví, je běžné, že podlaha v místnosti následkem sesychání není rovná a rozdíly jsou běžně i 5 - 10 cm. Dalším typickým problematickým místem těchto budov je osazení schodiště, protože poslední schod musí v novostavbě končit níže, než je podlaha a není možné přesně určit míru posunutí. U dveří a oken se musí ve stavebních otvorech nechávat nahoře větší prostor, aby sesychající konstrukce domu netlačila a tím nedeformovala okna a dveře. (Burch, 1984)

Další konstrukční problém spočívá ve spojení jednotlivých klád, protože dosedové plochy se opracovávají ručně z mokré kulatiny. Do spoje se většinou vkládá ovčí vlna, která má utěsnit nerovnosti vzniklé ruční prací a růstovými vadami dřeva. Tyto nerovnosti se postupem času, jak stavba sesychá, ještě zvětšují a ve stěnách tak přibývají netěsnosti, které se musí postupně dotěšňovat. Celý tento proces trvá běžně několik let. (Mackie, 1977)



Obrázek 1: Srubová konstrukce

Zdroj: www.drevoastavby.cz

V minulosti se tyto problémy nepovažovaly za příliš důležité, ale v dnešní době to je poměrně zásadní problém, který nemá snadné řešení. Jednou z možností je použití sušeného dřeva, které je rozměrově stálé. Sušení kulatiny o průměru třicet a více centimetrů je technicky a energeticky náročné, protože pokud se kulatina má sušit v sušárně, tak tento proces trvá velmi dlouho. Dřevo

se musí opakovaně zvlhčovat, aby se proces sušení dostal až do středu kulatiny. Toto sušení trvá oproti sušení běžného řeziva mnohem déle a z ekonomických důvodů se v praxi téměř nepoužívá. Druhým a častěji využívaným způsobem sušení kulatiny velkých průměrů je sušení na venkovních skládkách. Kulatina se složí na skládce tak, aby mezi ní bylo dobré proudění vzduchu a pravidelně se kropí vodou. To obvykle probíhá 6 až 7 let, potom se kulatina dosuší v sušárně a může se opracovat. Z toho vyplývá, že tento proces je zdlouhavý. Proto se domy srubových konstrukcí dnes využívají hlavně z designových důvodů, například v horských oblastech jako stylové restaurace a penziony. (Houdek, a další, 2013)

3.1.2 Hrázděné konstrukce

Hrázděné konstrukce staveb byly velmi využívané hlavně v minulosti, postupně nahrazovaly srubové konstrukce. Základem těchto staveb je nosná kostra, která bývá viditelná. V kostře jsou různé typy výplní. Hrázděné stavby se využívaly především v regionech, v nichž nebyl dostatek dřeva v takovém množství, jaké bylo potřebné například pro srubové stavby. Jednou z výhod hrázděných staveb je také to, že na ně lze používat spíše krátké části listnatého dřeva. V 2. polovině 19. století se začaly hrázděné stavby omítat, aby zdánlivě napodobovaly masivní domy ze zdiva a kamene. Dělo se to také z protipožárních důvodů, protože omítnutím získají domy větší požární odolnost. (Pešta, 2013)

V dnešní době se klasické hrázděné domy s nosnou konstrukcí viditelnou z venkovní strany pro novostavby používají velmi zřídka. Výztužná vzpěrová konstrukce hrázděných staveb má i dnes využití například v zemědělství nebo jednoduché jedno až dvoupodlažní účelové stavby. Velkou výhodou pro stavbu hrázděných konstrukcí jsou v současnosti moderní tesařská obráběcí centra, která nahrazují lidskou práci. Centra pracují s velkou produktivitou a přesností. Tím lze dosáhnout cenové dostupnosti těchto konstrukcí. (Vaverka, a další, 2008)

Stěny hrázděných konstrukcí se skládají z masivní hranolové kostry a vyrábějí se jako vnější stěny a vnitřní příčky. Spoje jsou provedeny tak, že mohou přenášet tlakové síly z prvku na prvek, ale ne tahové síly. V minulosti se

používaly ozdobné spoje s využitím dřevěných kolíků, které byly velmi pracné na zhotovení. Dnes se nejčastěji používá plátování vodorovných prvků. Sloupky a vzpěry se upevňují hlavně použitím čepových spojů, případně se celé zapustí. Pro zamezení posunutí prvků se používají hřebíky nebo vruty. (Kolb, 2010)



Obrázek 2: Srubová konstrukce

Zdroj: www.drevoastavby.cz

Hrázděná stavba může podobně jako sрубová konstrukce vykazovat značné deformace vzniklé sesycháním. Bobtnání a sesychání se projevuje v radiálním a tangenciálním směru až dvacetkrát více než v podélném směru. Zmenšení rozměrů vodorovně zabudovaných prahů a nosníků tak výrazně ovlivňuje velikost celkového sednutí, tedy rozdíl rozměrů od postavení stavby do stavu ustálené vlhkosti a rozměrové stability. Hlavním faktorem, který ovlivňuje sesedání, je vlhkost dřeva. Z tohoto důvodu se v dnešní době využívá předem vysušené dřevo na vlhkost 12 až 15%. (Vaverka, a další, 2008)

3.1.3 Sloupkové a rámové konstrukce

Rámová konstrukce je celosvětově nejrozšířenější způsob výstavby dřevostaveb. Pochází z tradičního systému nejvíce využívaného v severní Americe, často se tento systém také označuje jako two by four. Tento název je odvozen od původního rozměru fošen v palcích. Princip rámové konstrukce

dřevostavby spočívá ve vytvoření nosné dřevěné konstrukce složené z vodorovných a svislých prvků. Jako materiál na konstrukci se v současnosti v Evropě nejčastěji používají KVH hranoly o rozměrech 60 x 100 mm až 60 x 160 mm. (Kolb, 2010)

Největší rozvoj těchto typů staveb nastal zavedením průmyslového zpracování dřeva, které umožnilo ekonomicky dosažitelnou výrobu přesného stavebního řeziva. Tím se tento typ staveb začal především v Severní Americe masivně prosazovat. Koncem 19. století byla v této části světa velká potřeba stavět levně a rychle, a přesně to sloupková konstrukce umožňovala. (Wagner, 1998)

Tento typ staveb se rozděluje na dva základní typy tzv. Baloon-Frame, kde svislé sloupky procházejí přes celou výšku budovy. Stropní fošny jsou pak ukotveny do vodorovných prvků, které jsou mezi stěnovými sloupky. Druhým typem je tzv. Platform-Frame, jejímž typickým znakem je poschodová skladba. To znamená, že každé podlaží je zakončeno rovnou plochou, na které se potom vyrábí a staví další patro. (Simpson, 2007)



Obrázek 3: Rámová konstrukce

Zdroj: autor

V počátcích stavba probíhala tak, že se na stavenišťe dovezly hráně stavebního řeziva v celých délkách a veškerá výroba probíhala přímo na staveništi. Fošny se nařezaly na příslušné délky ručními pilami, spoje se dělaly natupo a zafixovaly se hřebíky. Výroba této konstrukce byla velmi jednoduchá a mohli ji provádět i nekvalifikovaní dělníci. (Guertin, 2001)

Dříve se na vnější i vnitřní opláštění používala obyčejná prkna upevněná vertikálně a vnitřní prostor se nijak neizoloval. Později se postupně zlepšovala kvalita opláštění tím, že se používala frézovaná prkna nebo se prkna dávala horizontálně a překládala se přes sebe. Jako izolace se začaly využívat v tu dobu dostupné přírodní materiály. (Zahradníček, a další, 2000)

Na základě zkušeností a úspěchu v Americe se tento typ staveb v Evropě začal objevovat kolem roku 1930. Většího rozmachu tyto stavby v Evropě dosáhly až v posledních cca 30 letech a jsou prováděny na zcela jiné kvalitativní úrovni než v Americe a také zcela jiným systémem výroby. Vzhledem k rychlosti výstavby a omezení vlivu počasí na výstavbu je základním znakem současných rámových staveb snaha o co největší prefabrikaci již ve výrobním závodě. Tím lze dosáhnout toho, že montáž konstrukce na stavbě probíhá velmi rychle, a to umožní výrazně omezit vliv nepříznivého počasí na konstrukci domu a také samozřejmě omezit náklady na zhotovení budovy. (Kolb, 2010)

3.1.4. Skeletové konstrukce

Skeletové konstrukce jsou jedním z nejstarších způsobů stavění. V dávné minulosti se masivní kmeny zahrabávaly do země jako svislé sloupy a do vidlice koruny stromu se zaklesly střešní kusy dřeva. Hlavním znakem skeletových konstrukcí jsou svislé sloupy, které nejčastěji procházejí přes celou výšku budovy a do nich se předává zatížení z vedlejší nosné vodorovné konstrukce. Skeletový způsob konstrukce na našem území nejvíce prosazoval Tomáš Baťa, který takto stavěl veškeré výrobní haly ve Zlíně, ale tyto konstrukce byly zhotoveny z železobetonu. V současnosti technologie na lepení a zpracování řeziva umožňují stavbu podobně rozsáhlých skeletových budov ze dřeva. (Kolb, 2010)

Mezi hlavní výhody skeletových staveb patří velká variabilita využití vnitřního prostoru, protože nosný skelet a vnitřní příčky na sobě nejsou závislé.

V některých zemích, jako například v Německu nebo Rakousku, jsou vysoké požadavky na využití materiálu z obnovitelných zdrojů, a proto se tento typ konstrukcí hojně využívá ke stavbě škol i veřejných a administrativních budov. V oblasti výstavby rodinných domů tato konstrukce umožňuje splnit požadavky na stále větší prosklené plochy fasád i otevřené vnitřní prostory. (Kottjé, 2008)

Nosný dřevěný skelet lze navrhnout tak, že může být viditelný zevnitř nebo zvenku nebo se oboustranně zakryje. Ke spojování jednotlivých prvků se nejčastěji používají ocelové prostředky. Výhodné je také to, že veškeré části střešních, stropních a stěnových prvků lze navrhnout a vyrobit ve výrobním závodě. (Vaverka, a další, 2008)



Obrázek 4: Skeletová konstrukce

Zdroj: www.dietzholzbau.de

3.1.5 Konstrukce z masivního dřeva

Prvními stavbami z masivního dřeva byly vlastně sruby a později roubenky. V současném odborném světě dřevostaveb jsou však jako konstrukce z masivního dřeva považovány stavby vyrobené průmyslově z velkoplošných vrstvených dílců. Tyto panelové dílce jsou nejnovějším typem dřevěných konstrukcí. (Zahradníček, a další, 2000)

Dřevěné panely se skládají většinou z masivního dřeva, které může být příčně lepené, lepené, spojované hřebíky nebo hmoždinkami. Někdy se také využívají desky vyrobené na bázi dřeva jako je dřevotříska nebo OSB desky.

Hlavní část dílce tvoří buď uzavřený, většinou masivní deskový průřez, nebo optimalizovaný skříňový dílec, který se sestavuje do plošné konstrukce. Nosná část systému se skládá z nosného jádra, to je vytvořeno z masivního dřeva nebo desek na bázi dřeva. (Gagnon, 2011)

Velkou výhodou jsou menší požadavky na kvalitu používaného řeziva, protože při rozřezání kulatiny na jednotlivé lamely se dá vytrít většina vad a následným lepením se vytvoří kvalitní konstrukční materiál. Dobrou vlastností těchto masivních dřevěných panelů je také to, že mají schopnost odebírat vlhkost ze vzduchu místnosti, tu dokážou navázat, a když potom přijdou suchá období, tak vlhkost opět odevzdávají zpět do místnosti. Často se tyto panely také využívají z estetického důvodu, protože jejich vnitřní vrstva může být pohledová a vytvoří tak finální povrch stěny interiéru. (Pavlas, 2016)

Tento typ konstrukce se vyznačuje tím, že jejich masivní nosná vrstva je z plošně působící desky. Podíl masivu v nosné vrstvě stěny je nejméně 50 %. Panely se vyrábí většinou jako vícevrstevné, to znamená, že se jednotlivé vrstvy lamel pokládají podobně jako u překližovaných desek pod různými úhly. Tím se dosáhne účinného přenosu vysokých zatížení a vysoké rozměrové stability. (Lehmann, 2012)

Nejčastěji používanými typy těchto konstrukcí jsou panely z vrstveného nebo křížově slepeného řeziva. Panely z vrstveného řeziva se skládají z prken nebo fošen, které se rovnají do polohy na stojato, u menších dílců se tato prkna dávají z jednoho kusu, ale je také možné používat lamely délkově nastavené zubovitým spojem, aby bylo možné vyrábět větší formáty. Tloušťky prken se nejčastěji používají 20–50 mm. Přenos smykových sil v příčném směru se řeší tím, že jednotlivé lamely jsou vzájemně spojeny hřebíky nebo kolíky z tvrdého dřeva. Tímto propojením se z jednotlivých prvků stává homogenní deska, která je schopna rozdělení zátěže z jednotlivých břemen do celého panelu. Panely z takto vrstveného řeziva se vyrábějí v různých kvalitách povrchu a profilech. Nejčastější síly vyrobených dílců z vrstveného řeziva jsou 80-240 mm. (Brandner, 2016)

Křížově slepené řezivo se skládá z více křížově slepených vrstev prken. Díky tomuto uspořádání mají tyto dílce vysokou tvarovou stálost a vzniklé dílce

mohou přenášet zatížení v obou směrech. Hlavní surovinou pro výrobu těchto panelů je smrkové nebo jedlové řezivo. Nejčastější tloušťky panelů z křížově slepeného řeziva jsou 50-300 mm. (Pavlas, 2016)

System masivních dřevěných panelů je poměrně náročný na plánování výroby a výrobu, protože pro plánování musí být výrobce vybaven vhodným softwarem a pracovníky, kteří tento software ovládají. Výroba má velké nároky na prostor a především je potřeba složité a nákladné strojní vybavení jako jsou velké výrobní stoly, velkoplošná CNC obráběcí zařízení, portálové jeřáby a velkoplošné lisy. (Pavlas, 2016)



Obrázek 5: Konstrukce z CLT panelů

Zdroj: www.drevoastavby.cz

3.2 Materiály pro výrobu rámových konstrukcí

V této části budou popsány materiály, které se používají při výrobě stěn z rámových konstrukcí. Tyto materiály se rozdělují do čtyř hlavních částí:

1. nosné materiály
2. opláštovací materiály
3. izolační materiály
4. spojovací materiály

3.2.1 Nosné materiály

V současnosti se jako nosné materiály rámových konstrukcí používají hlavně KVH a BSH hranoly.

3.2.1.1 KVH hranoly

Název KVH hranolů (pochází z německého Konstruktionvollholz). Jsou to délkově nastavované hranoly pomocí lepeného zubového spoje. Vyrábějí se ve dvou variantách jako pohledové konstrukční dřevo (KVH Si), to je řezivo bez velkých vad a je používáno především na pohledově náročné využití například pro trámové stropy. Druhá varianta je nepohledové konstrukční dřevo (KVH NSi). Toto řezivo má shodné mechanické vlastnosti jako Si, ale mohou v něm být drobné vady a je proto určeno především do skrytých konstrukcí nebo pro méně náročné použití – konstrukce stěnových prvků v rámových dřevostavbách. Řezivo se vyrábí v přesných průřezech. Nejčastěji se používá dřevo smrku, případně modřín nebo jedle. Řezivo je sušené v komorových sušárnách na vlhkost 13 %, sušením se také snižuje riziko napadení biologickými škůdci. Během výroby se vykracují růstové vady dřeva, aby se dosáhlo vyšší mechanické pevnosti materiálu. Následně jsou do jednotlivých kusů vyfrézovány zubové spoje. Je na ně nanášeno polyuretanové lepidlo a spoje jsou vzájemně délkově stlačeny. Po několika hodinách, když dojde k vytvrnutí lepidla se tyto připravené dřevěné profily hoblují na čtyřstranných frézách, kde



Obrázek 6: KVH hranol

Zdroj: autor

se jim i lehce srazí hrany z důvodu vyšší požární odolnosti a snadnější manipulace. Nejčastěji dodávané průřezy jsou od 40x60 mm až po 140x240 mm. (Böhm, 2012)

3.2.1.2 BSH profily

Lepené lamelové dřevo BSH (pochází z německého Brettschichtholz) se vyrábí z vyříděného sušeného řeziva (12 %), které je také délkově napojováno pomocí zubových spojů. Tyto slepené dřevěné lamely se dále vrství na sebe a může tak vzniknout masivní dřevěný profil velké délky a výšky. Nejčastější síla používaných lamel je 40 mm, proto je výška profilu obvykle násobkem této hodnoty. Výroba tohoto materiálu v posledních letech zažívá velký rozvoj, často se využívá při stavbách montovaných hal a sportovišť. Největší možnosti využití tohoto materiálu jsou při stavbách montovaných skeletových budov, protože při využití velkých profilů lze z tohoto materiálu stavět vícepodlažní budovy jako školy a administrativní budovy. (Böhm, 2012)

BSH profily se vyrábějí také ve variantě pohledové (BSH Si) nebo ve variantě konstrukční (BSH NSi). Další zajímavostí tohoto materiálu je možnost lepení obloukových profilů, které mohou mít velké rozpětí (vyskytují se i 100 m dlouhé). Tyto profily je možno lepit i do různých zvlněných profilů, což umožňuje



Obrázek 7: BSH profil

Zdroj: autor

architektům vytvářet ze dřeva stavby takových tvarů, které dříve nebyly možné. (Böhm, 2012)

3.2.2 Opláštovací materiály

V rámových konstrukcích se nejčastěji pro opláštění používají velkoplošné desky vyrobené na bázi dřeva. Mezi tyto desky patří hlavně OSB, překližky, dřevotřísky a dřevovláknité desky. Pro zvýšení požární odolnosti staveb se využívají také desky cementotřískové a sádrovláknité.

3.2.2.1 OSB desky

Desky z orientovaných třísek neboli OSB desky jsou tvořeny slisovanými plochými třískami. Pro výrobu těchto desek se v Evropě nejčastěji používá jehličnaté dřevo smrku nebo borovice. Odkorněná kulatina se v diskovém roztřískovači rozmělní na třísky o síle 0,4 - 0,8 mm, šířce 6 - 25 mm a délce 75-130 mm. Tyto třísky se musí následně vysušit, protože vlhkost materiálu má zásadní vliv na výslednou kvalitu desky. Sušení probíhá při teplotách 280-300 °C a výsledná vlhkost třísek se musí pohybovat mezi 2 – 4 %. Vysušené třísky jsou ze sušárny odvedeny na třídění, kde se třídí na tři frakce. Nejmenější třísky se na výrobu OSB obvykle nepoužívají, střední třísky se používají do středové vrstvy desky a z nejdelších třísek se tvoří povrchové vrstvy OSB desky. Materiál dále postupuje do zařízení pro nanášení lepidla, kde se jednotlivé třísky nasatí lepidlem. Nejčastěji se v Evropě používají melamin-formaldehydová nebo MDI lepidla v závislosti na způsobu využití desek. Výhodou MDI lepidel je, že neuvolňují žádné emise formaldehydu. Připravená směs se vrství obvykle do tří vrstev. Tyto tři vrstvy jsou usměrněny tak, aby vzájemně svíraly pravý úhel, povrchové vrstvy jsou směřovány podélně a tím je dosaženo vyšší pevnosti vzniklého materiálu. Desky se pak slisují za teploty 220 °C a vychladí. Desky se ještě upravují podle využití jako ostrohranné nebo se do nich frézuje profil pero-drážka, aby je bylo možné vzájemně spojovat. Desky, které jsou určeny jako pohledové nebo podlahové se ještě brousí, aby bylo dosaženo rovného povrchu. (Böhm, 2012)

Podle kvality zpracování se OSB desky třídí na 4 kategorie OSB 1 – 4

Typ OSB	Způsob použití
OSB - 1	Desky pro všeobecné účely, pro použití v interiéru a v suchém prostředí nebo jako obalové materiály Použité lepidlo je nejčastěji močovino-formaldehdyové (UF)
OSB - 2	Desky pro nosné účely pro použití v interiéru a v suchém prostředí Používají se obvykle dva druhy lepidel např. (MUF pro středové vrstvy a PF pro vnější vrstvy)
OSB - 3	Desky pro nosné účely pro použití v exteriéru a ve vlhkém prostředí. Tento typ desek se nejčastěji používá na opláštění dřevostaveb. Všechny vrstvy se obvykle lepí PF lepidlem, případně jiným lepidlem odolným proti zvýšené vlhkosti
OSB - 4	Zvláště zatížené desky pro použití v exteriéru a ve vlhkém prostředí. Používají se např. do složených nosníků nebo jako obklady míst s rizikem navlhnutí. Pro co největší voděodolnost se používá izokyanátové lepidlo.

Tabulka 1: Rozdělení OSB desek

Zdroj: (Böhm, 2012)



Obrázek 8: OSB desky

Zdroj: autor

3.2.2.2 Sádrokartonové desky

Sádrokartonové desky byly poprvé vyrobeny v USA koncem 19. století. Později v 30. letech 20. století už byla zahájena průmyslová výroba sádrokartonu. Desky jsou vyráběny tak, že se mezi dva silné kartony zalisuje sádrová hmota. Poté se deska dosuší v sušárně. Desky se vyrábí v různých provedeních podle způsobu využití. Pokud je například nutné, aby deska odolávala větší vlhkosti, napouští se sádrové jádro silikonem, který výrazně zlepšuje vlastnosti desky v této oblasti. Dále se vyrábí desky s přísadami, které zpomalují hoření nebo zlepšují neprůzvučnost konstrukce. (Skulinová, a další, 2012)

Montáž desek se provádí za pomoci vrtů, které se připevňují do podkladové vrstvy nebo se vytvoří montážní předstěna z ocelových profilů, do kterých se desky zasadí. Pro vyplnění spár mezi deskami se používají práškové tmely, do kterých se vlepí výztužné pásy, aby se zamezilo budoucím prasklinám ve spojích, které jsou způsobeny roztažností materiálu vlivem tepla a vlhkosti. (Nyč, 2005)



Obrázek 9: Sádrokartonová deska

Zdroj: www.eshop.unihobby.cz

3.2.2.3 Sádroláknité desky

Sádroláknité desky jsou kompozitním stavebním materiálem, kde hlavní materiál sádra je armovaná za pomoci celulózových vláken. Z toho vyplývá, že sádroláknité desky se vyrábějí ze sádry a papíru. Tyto desky jsou homogenní, neboť na celém průřezu mají stejné vlastnosti. Protože mají vysokou objemovou hmotnost, mají velmi dobré protipožární vlastnosti a také poměrně dobře dokáží tlumit hluk. Ve směsi, ze které se desky vyrábějí, fungují celulózová vlákna podobně jako armovací ocel v železobetonu. Sádroláknité desky jsou typické vysokou stabilitou, odolností a pevností, proto konstrukce tvořené těmito deskami mají velmi dobré akustické vlastnosti. Další výhodou těchto desek je to, že konstrukce vytvořené ze sádroláknitých desek vykazují lepší vzduchotěsnost, než konstrukce ze sádrokartonu. Sádroláknité desky dokáží vstřebávat přebytečnou vlhkost v místnosti a později ji vydávat do suchého prostoru. Výhodný poměr akumulace tepla a tepelné izolace vytváří výhodné a zdravé prostředí v místnosti. Pro požární odolnost je výhodné to, že sádra obsahuje vázanou vodu, ta se při případném požáru uvolňuje, a tím zvyšuje požární odolnost sádroláknitých desek. Obvyklá hustota výsledné sádroláknité desky je $1150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, součinitel tepelné vodivosti je $0,32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Sádroláknité desky se využívají ve všech částech konstrukce domu.



Obrázek 10: Sádroláknité desky

Zdroj: www.dek.cz

V dřevostavbách jsou výhodné, protože se za pomoci těchto desek dají vyztužovat dřevěné konstrukce nosných stěn. (Skulinová, a další, 2012)

3.2.2.4 Cementotřískové a cementovláknité desky

Desky na bázi cementu kombinují vynikající vlastnosti cementu, nehořlavého materiálu odolného v tlaku, a dřeva, které má relativně nízkou hustotu a velmi dobrou pevnost v tahu a ohybu. Propojením těchto dvou materiálů vznikly desky, které vykazují velmi dobré fyzikálně – mechanické vlastnosti. Na našem trhu je nejvíce rozšířená cementotřísková deska (CETRIS). Tyto desky mají ve svém objemu poměrně velké zastoupení dřevěných třísek (63 %), dále obsahují cement (25 %) a vodu (10 %), ještě se do nich přidávají hydratační přísady. Výroba těchto desek probíhá tak, že se dřevní hmota z jehličnanů odkorní, potom se tři až čtyři měsíce skladuje. Po odležení na skládce se hmota roztřískuje na jehlicovité třísky a uskladní do sil. Při vlastní výrobě se do míchacího zařízení jednotlivé složky dopravují přes váhy, aby byly jednotlivé složky ve správném poměru, potom se ve vrstvicím zařízení namíchaný materiál rozprostře na ocelové plechy a vytvoří se jednotlivé desky. Následně se desky nechají vytvrdnout v klimatizovaném skladu. Tento proces trvá sedm dní. Po dozrání se materiál dosuší na vlhkost 4 – 9 %, naformátuje se na požadované rozměry a je připraven k použití. Velkou výhodou cementotřískových desek je jejich odolnost proti ohni (dle ČSN 73 0862 zařazení A – nehořlavé). Proto se velmi často využívají v interiéru montovaných domů a



Obrázek 11: Cementotřískové desky

Zdroj: www.drevoonline.cz

hal, kde se těmito deskami řeší požární odolnost stavby. V současnosti se také tyto desky v modifikované variantě využívají jako provětrávané fasády domů, protože velmi dobře odolávají dlouhodobě vlhku, plísním i hmyzu. (Kolář, a další, 2012)

3.2.3 Izolační materiály využívané v rámových konstrukcích

Tepelné izolace jsou pro stavbu moderního domu zásadní. V průběhu historie stavebnictví se využívání tepelných izolací stále vyvíjelo. První historická obydlí byla zahloubena do země a využívala tak okolní hmotu jako tepelnou izolaci. Pozdější historické objekty měly velmi silné obvodové konstrukce, které plnily nejenom nosnou, ale i tepelnou funkci. Velkým problémem těchto staveb byla zejména povrchová kondenzace. V dalších obdobích, jak se lidé učili stavět objekty vylehčenými nosnými konstrukcemi docházelo také ke snižování tepelně-technické kvality staveb. U nás to bylo především v období 50. – 60. let 20. století, kdy byl velký tlak na masovost staveb a jejich kvalita byla zatlačena do pozadí. Přibližně od 80. let 20. století se však začínaly tepelně-izolační vlastnosti staveb řešit stále více a tomu se postupně také upravovaly stavební normy pro stavbu nových budov. (Hudec, 2008)

V současnosti mezi nejčastěji využívané izolační materiály pro výrobu dřevostaveb patří:

1. Minerální vlákna
2. Dřevovláknité izolace
3. Foukaná celulóza
4. Pěnové polystyreny
5. Extrudované polystyreny
6. Pěnové polyuretany
7. Fenolická pěnová izolace
8. Přírodní izolační materiály

3.2.3.1 Minerální vlákna

Minerální vlákna jsou jedním z nejdůležitějších tepelně-izolačních materiálů současnosti. Mají velmi širokou škálu druhů i způsobů využití. Vyrábějí se ve formě desek, rohoží nebo jsou volně sypané. Kromě teplených izolací se dají využívat i jako zvukové a požární izolace. Vyrábějí se z taveniny, která vzniká v tavných pecích. Tato tekutá hmota se pomocí rozvlákňovacího kola a vzduchu rozmělní na tenká vlákna. Základní složkou taveniny je čedič nebo křemičitý písek a k těmto složkám se přimíchávají v určitém poměru vápenec, struska a další materiály, které ovlivňují vlastnosti výsledné hmoty. Výrobní linky obvykle produkují čtyři metry široké pásy, které se formují za pomoci okružních pil a sekacích zařízení do požadovaných rozměrů. Současné výrobní linky dokáží vyrábět produkty z minerálních plstí, které mají hustotu v rozsahu 50 - 500 kg/m³. Minerální vata vykazuje velkou tepelnou odolnost od -50° do +700° C, a proto je možné ji využít pro průmyslové izolace vysokoteplotních médií. Vzhledem k tomu, z čeho se tento materiál vyrábí, je nehořlavý a tedy má široké uplatnění z hlediska požární odolnosti. Dalšími významnými vlastnostmi je vysoká odolnost proti chemickému namáhání. Vlákna odolávají



Obrázek 12: Minerální vata

Zdroj: autor

téměř všem běžným chemikáliím. Z biologického pohledu jsou vlákna také velmi odolná, nehnijí ani neplesniví. Důležitou vlastností vláken je jejich objemová

stálost. Desky z minerální vaty, které mají objemové hmotnosti nad 200 kg/m³ se mohou používat na ploché střechy přímo pod hydroizolaci bez jakýchkoliv plošně dilatačních úprav. Vlhkost minerálních vláken se pohybuje mezi 2 - 5% a do desek se přidává řada hydrofobních přísad, které omezují jejich nasákavost. Přirozenou nasákavost těchto desek je ale možné využívat například pro pěstování hydroponií nebo se využívají pro nasákavou vrstvu zelených střech. (McElroy, 1990)

3.2.3.2 Dřevovláknité izolace

Tepelné izolace založené na použití dřeva jsou jedny z prvních používaných izolací vůbec. Zejména pak u srubových a roubených staveb, kde samotné masivní dřevo působilo jako tepelná izolace díky jeho vynikajícím tepelným vlastnostem. Dřevo má kvůli svému anizotropnímu charakteru odlišné vlastnosti v různých směrech, to se týká i tepelně-izolačních vlastností, proto je s tím nutné při návrhu a výběru materiálů počítat. Velkou výhodou dřeva je jeho tepelná jímavost. Tato vlastnost se využívá hlavně v interiérech, znamená to, že materiál působí jako pocitově teplý, proto je dřevo vhodné například pro



Obrázek 13: Dřevovláknitá izolace

Zdroj: www.drevoastavby.cz

vnitřní obklady. Při výrobě izolačních materiálů na bázi dřeva lze kombinovat většinu požadovaných vlastností dřeva do jednoho výrobku. (Hudec, 2008)

Základním materiálem pro výrobu této zvukové a tepelné izolace je jehličnaté dřevo, které se nejdříve zpracuje na dřevní štěpku. Potom se nejčastěji za pomoci vodní páry nechá změknout a prostřednictvím ocelových kotoučů se pozvolna rozvlákní. Do konečného tvaru desek se rozmělněný materiál upravuje mokřím nebo suchým způsobem. Při mokřím procesu se využívá pojících vlastností dřeva a jeho vláken. Tímto procesem se obvykle vyrábí desky o menší tloušťce, zatímco při suchém procesu výroby se rozmělněná vlákna obalují polyuretanovou pryskyřicí, což umožňuje vyrobit desky o větší tloušťce a menší hustotě. (Hudec, a další, 2013)

Významnou výhodou dřevovláknitých desek je jejich schopnost tepelné akumulace, která zpomaluje přehřívání v létě nebo rychlé chladnutí v zimě. Stěny izolované tímto materiálem jsou vhodné pro difúzně otevřené skladby dřevostaveb, velmi dobře tlumí hluk a dokáží absorbovat vzdušnou vlhkost až do 20 % své hmotnosti. Tato izolace se nejčastěji využívá na zateplení vnějšího pláště budovy. Méně častěji na izolaci interiéru. Moderní výrobní procesy umožňují výrobu desek se spojením na pero a drážku, tím se omezují úniky ve spojích mezi deskami a zlepšují se fyzikálně-mechanické vlastnosti pláště budovy. (Novák, 2008)

3.2.3.3 Foukaná celulóza

Izolační materiál na bázi celulózy se nejčastěji vyrábí z recyklovaného papíru. Výroba probíhá tak, že papír se nejprve očistí a následně rozvlákní na buničinu. Do výsledného materiálu se přidávají materiály, které zvyšují odolnost proti ohni a také napadení biologickými činiteli. Výhodou celulózy je její zdravotní nezávadnost a minimální dopady na životní prostředí. Tento typ izolace využívá přirozené vlastnosti dřevního vlákna, jako je jeho hygroskopicitu, tedy schopnost přijímat a vydávat vodu. Díky tomu se ideálně hodí do dřevostaveb, protože má podobné vlastnosti jako okolní konstrukce. Další výhodou je možnost aplikace do uzavřených prostor a způsob aplikace foukáním je velmi rychlý. Materiál také vytváří souvislou vrstvu bez spár.

Největším problémem tohoto typu izolace je jeho postupné sesedání, což je komplikace především ve svislých konstrukcích. Proto se nejčastěji používá pro izolaci půdních prostor. Součinitel tepelné vodivosti je $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. (Linhart, 2010)



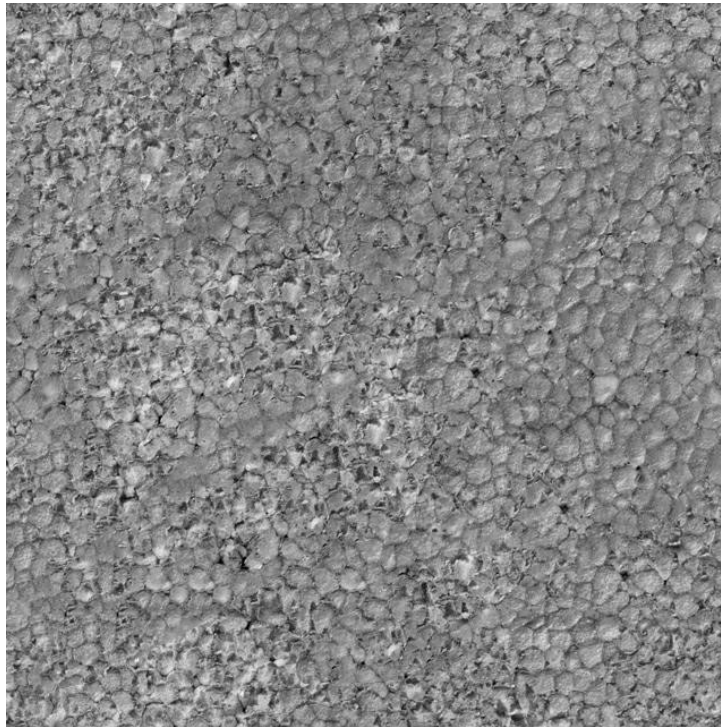
Obrázek 14: Aplikace celulózové izolace

Zdroj: www.climatizer.cz

3.2.3.4 Pěnové polystyreny

Pěnové polystyreny jsou v současnosti jedna z nejrozšířenějších tepelných izolací. Výchozí surovinou pro jejich výrobu je ropa. Výroba je buď kontinuální nebo diskontinuální. Při jednodušší diskontinuální výrobě se materiál nechá vypěnit v otevřených kovových formách ve tvaru kvádrů, jehož stěny jsou opatřeny ze všech stran tryskami na páru. Formy naplněné předpěněným granulátem se prosytí párou o teplotě $110^{\circ} - 120^{\circ} \text{ C}$. Tímto krokem jednotlivé granule začnou napěňovat a jejich povrch se teplem stává lepkavým a tlakem, který vznikne při pění, se jednotlivé granule spojují do homogenního bloku. Blok se poté nařeže na požadované rozměry. Složitější je kontinuální výroba, kde materiál napěňuje na pohybujícím se pásu. Primární surovina styren má perličkovou velikost zrn $0,3 - 2,8 \text{ mm}$, je sypké struktury a objemové hmotnosti $650-1030 \text{ kg/m}^3$. Pěnový polystyren se nejčastěji vyrábí v objemových hmotnostech $15 - 30 \text{ kg/m}^3$. Co se týče tepelné odolnosti pěnového polystyrenu, lze říci, že velmi dobře odolává nízkým teplotám, ale při

vyšších teplotách jako je 70° - 80° C, začíná jeho degradace. Toto je určitá nevýhoda při skladbách střešních konstrukcí, kde se tyto teploty v letních měsících pod černou střešní krytinou mohou běžně vyskytovat. Pěnový polystyren je nasákavý a jeho nasákavost závisí na objemové hmotnosti a množství otevřených buněk. Nasákavost se proto pohybuje v rozmezí 3 - 10 %



Obrázek 15: Expandovaný polystyren

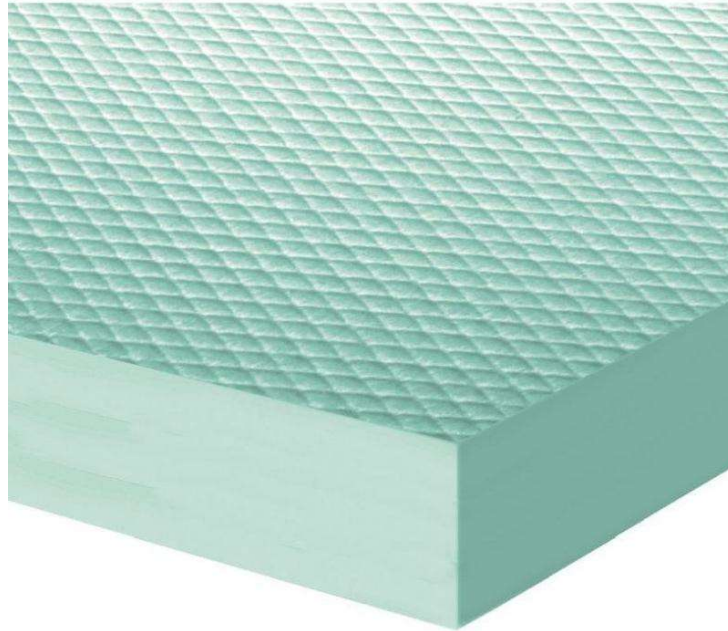
Zdroj: autor

jeho objemu. Expandovaný polystyren se obchodně označuje EPS a číslem, které udává jeho pevnost v tlaku, nejčastější pevnosti jsou 50, 70, 100, 150, 200 a 250 kPa. Součinitel tepelné vodivosti je $\lambda=0,036 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Nejčastější využití pěnového polystyrenu je na kontaktní zateplení fasád domů nebo jako tepelná izolace do podlah. (Straka, 2013)

3.2.3.5 Extrudované polystyreny

Izolační materiály na bázi extrudovaného polystyrenu se vyrábějí kontinuálním vytlačováním napěněného polystyrenu. Extrudovaný polystyren se označuje XPS a vyznačuje se uzavřenou strukturou pórů, proto má velmi omezenou nasákavost a zároveň má zvýšenou pevnost. Proto je možné ho trvale vystavit vlhku, využívá se na izolaci zdiva suterénů nebo na izolaci základů domů. Extrudovaný polystyren je možné vyrábět ve velkém rozmezí

objemových hmotností. Nejčastěji se využívají objemové hmotnosti 25 - 40 kg/m³. Materiál je zapotřebí chránit před působením světla a povětrnostních podmínek, jinak by materiál ztrácel svoji původní barvu a docházelo by ke zhoršení mechanických vlastností. Tepelná odolnost tohoto materiálu je v rozmezí -50° - +100° C. XPS má oproti pěnovému polystyrenu výhodu



Obrázek 16: Extrudovaný polystyren

Zdroj: www-woddcote.cz

nejenom v odolnosti proti vlhkosti, ale i v nižší hodnotě součinitele tepelné vodivosti, která je 0,02-0,04 W.m⁻¹.K⁻¹. Tato hodnota je u XPS stabilní a nepodléhá vlivu vnějšího prostředí. Je tedy možné konstatovat, že u XPS nedochází ke stárnutí materiálu, pokud je vhodně zabudován v konstrukci. Jedinou nevýhodou oproti pěnovému polystyrenu je jeho vyšší cena, která se odvíjí od složitější a energeticky náročnější výroby. (Straka, 2013)

3.2.3.6 Pěnové polyuretany

Izolační materiály na bázi polyuretanových pěn mají v současném stavebnictví široké možnosti využití. Lze je v základu rozdělit na materiál s otevřenou buněčnou strukturou nebo uzavřenou buněčnou strukturou. Toto členění se často pojmenovává měkká (s otevřenou buněčnou strukturou) a tvrdá (s uzavřenou buněčnou strukturou). Oba dva typy pěny ale mohou mít ještě

mnoho dalších variant hustoty a pevnosti. Výchozí surovinou pro výrobu všech polyuretanových pěn je ropa, ze které se vyrábějí dvě hlavní složky. První složkou, která je pro všechny polyuretanové pěny stejná jsou polyizokyanáty. Druhá je ze sloučenin bohatých na hydroxilové skupiny, tato složka určuje kubaturovou hmotnost budoucí pěny. Sloučením těchto dvou složek ve speciálních vysokotlakých zařízeních vzniká výsledná polyuretanová pěna. (Novotný, a další, 1994)

Tato směs se následně může vstříkovat do kvádrových forem, nechá se vytvrdit a tyto kvádry se potom rozřežou na desky požadovaného formátu. Tímto způsobem se vytvářejí deskové materiály na obklady základů domů nebo například desky pro nadkroevní izolace. Druhou možností aplikace polyuretanových pěn je jejich nástřik přímo na staveništi, kdy se za pomoci vysokotlakých zařízení provádí aplikace do krovů, stropů, podlah a stěn domů. Při tomto způsobu aplikace je výhodou to, že izolace nemá žádné spoje a vytváří se tak jednolitá vrstva, která dokonale přilne k podkladu. V praxi aplikace probíhá tak, že se na staveništi dopraví technologie, která se skládá z vysokotlakého aplikačního zařízení (např. GRACO EXP 2). Toto zařízení pro svůj provoz potřebuje stlačený vzduch, který mu dodává kompresor o odpovídajícím výkonu. Jednotlivé složky pěny jsou dodávány výrobcem v sudech o objemu cca 200 litrů. Do každého z těchto sudů se ponoří zařízení, které nasává materiál směrem k aplikačnímu čerpadlu. Před zahájením se musí veškerý materiál v sudech, čerpadle a hadicích ohřát na provozní teplotu, která je podle typu materiálu 35° - 50°. Po této přípravné části může obsluha vybavená ochrannými pomůckami (ochranný oblek a plynová maska) zahájit vlastní aplikaci. Pro kvalitní aplikaci je nutná příprava povrchu, na který se pěna aplikuje. Ten musí být suchý a zbaven nečistot a mastnoty. Pěna se následně stříká ve více vrstvách, které se vzájemně překřížují a tím se zamezuje možnosti vzniku dutin v izolační vrstvě. Měkké pěny výrazně nabývají na objemu po nastříkání (z 1 mm nastříkaného materiálu vzniká až 100 mm silná vrstva). U měkkých pěn se obvykle aplikují 2 - 3 vrstvy. Tvrdá pěna jednou 1 mm silnou aplikovanou vrstvou vytvoří 20 - 30 mm izolační vrstvy, proto se při aplikaci obvykle používá alespoň 5 vrstev v závislosti na požadované tloušťce a tepelném odporu konstrukce. (Novotný, a další, 1994)

Měkká PUR pěna s otevřenou buněčnou strukturou se nejčastěji využívá k přímé aplikaci do konstrukcí staveb. Tento typ PUR pěny má nižší kubaturovou hmotnost (6 - 20 kg/m³), proto je nejlevnější z běžně používaných



Obrázek 17: Aplikace PUR izolace

Zdroj: autor

PUR pěn a má tedy široké uplatnění ve stavebnictví. Její vysoká prodyšnost jí předurčuje pro využití ve skladbách stěn difúzně otevřených. Hojně se také využívá pro zateplování podhledů domů, které jsou tvořeny vazníkovou nebo trámovou konstrukcí. Výhodou aplikace do těchto prostor je, že pěna nabývá na objemu a vyplní tak veškeré obtížně přístupné prostory v konstrukci. Součinitel tepelné vodivosti měkké PUR pěny je přibližně 0,035 W.m⁻¹.K⁻¹. (Novotný, a další, 1994)

Tvrdá PUR pěna s uzavřenou buněčnou stěnou se využívá jak k přímé aplikaci do konstrukce, tak se z ní vyrábějí deskové materiály. Velkou výhodou tohoto materiálu je jeho nenasákavost, vysoká stabilita, mechanická pevnost, ale oproti měkké pění je kvůli své vyšší kubaturové hmotnosti (25 - 80 kg/m³) dražší. Vyrábějí se také pěny s výrazně vyšší hustotou, ale ty už se obvykle nevyužívají ve stavebnictví. Desky vyrobené z tohoto materiálu se často používají jako nadkroevní izolace staveb. Pro tyto případy se desky již ve výrobě opláštějí foliemi, které zlepšují jejich fyzikální vlastnosti. Pro přímou aplikaci za pomoci vysokotlakých zařízení se tvrdá PUR pěna využívá na stavbách jako vysoce kvalitní izolace základů, kdy je možno celý obvod základů nastříkat jednolitou souvislou vrstvou a dosáhnout tak lepší odolnosti, než je tomu například při použití extrudovaného polystyrenu. Ve skladbě stěn plní pěna

funkci parobrzdy, protože má vyšší difúzní odpor než většina běžných izolačních materiálů. A tato vlastnost se dá ve skladbě konstrukcí využít. Přílnavost k povrchu a nenasákavost se často využívá při izolování kovových a plechových konstrukcí, protože při dostatečné síle izolačního povrchu na vnitřní straně stavby nejsou problémy s kondenzovanou vodou. Velkou výhodou je vynikající hodnota součinitele tepelné vodivosti, která je $0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. To umožňuje dosáhnout požadovaných tepelných parametrů při menší tloušťce stěny a tím na stejné zastavěné ploše získat větší užitečný prostor. (Novotný, a další, 1994)

3.2.3.7 Fenolická pěnová izolace

Fenolická pěnová izolace se vyrábí ve formě desek v sílách od 20 mm. Tyto desky je možno vyrábět i v provedení pero-drážka a nejčastěji se využívají jako nadkroevní izolace moderních staveb. Pro tyto účely se desky většinou opatřují ještě fóliemi, které se po složení desek do konstrukce vzájemně slepují. Unikátní vlastností fenolické pěnové izolace je její nehořlavost, při přímém vystavení plamenům nescapává, nesublimesuje a při požáru se z ní do ovzduší neuvolňují žádné jedovaté plyny ani kouř. Součinitel tepelné vodivosti je podobný jako u tvrdých PUR pěn ($0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ale oproti těmto pěnám není technicky možné fenolickou pěnu aplikovat přímo na stavbě. (Novotný, a další, 1994)

3.2.3.8 Přírodní izolační materiály

Na trhu se vyskytuje velké množství izolačních materiálů. V souvislosti se zvyšujícími se nároky na ekologii a životní prostředí jsou na vzestupu také alternativní typy izolací, které se už v minulosti často používaly a nyní zažívají návrat. Představíme si proto některé z nich.

Sláma

Sláma je běžný materiál, který vzniká jako odpad v zemědělství. Vyznačuje se nízkou cenou a dostatečnými tepelnými vlastnostmi i životností. Kromě ruční aplikace do konstrukce existuje i efektivnější způsob práce s tímto materiálem a to ve formě balíků. Tyto balíky jsou vyrobeny zemědělskými balíkovači přímo na poli. Kubaturová hmotnost je zhruba $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a součinitel tepelné vodivosti je v rozmezí $0,05 - 0,08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Podobně jako u dřeva záleží při pokládání izolace na orientaci jednotlivých stébel. Základní stavební

látkou slámy je celulóza, proto má srovnatelné vlastnosti jako jiné materiály z dřevních vláken. Problémem je hořlavost, proto se musí sláma oplášťovat vrstvou z jiného nehořlavého materiálu například cementovými deskami nebo omítkou. Ze slámy se také vyrábí tzv. slámokartonové desky, které se používají na oplášťování podobně jako desky sádrokartonové. (Márton, 2014)

Konopí a len

Využívání lnu a konopí setého má v evropských zemích mnohaletou tradici zejména v textilním průmyslu. Dříve se také využívalo k výrobě papíru a léčiv. V dnešní době se opětovně začíná produkovat a používá se především v automobilovém a papírenském průmyslu. Z konopí se vyrábějí tepelně izolační rohože používané ve stavebnictví. Technické konopí je totiž výhodnou náhradou místo použití dřeva, na jednom hektaru osetém konopím se vyprodukuje až 4x více celulózy s nižším obsahem ligninu ve srovnání s jedním hektarem lesa. Izolace vyrobené z technického konopí mají dobré mechanické, fyzikální i akustické vlastnosti. Součinitel prostupu tepla se pohybuje v rozmezí $0,039 - 0,050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Objemová hmotnost izolací vyrobených z technického konopí je $25 - 45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Určitou nevýhodou materiálů vyrobených na této bázi je hořlavost nechráněného materiálu, které je nutno předcházet správným zabudováním do konstrukce. Další nevýhodou je to, že se tyto desky obtížněji řežou. (Nagy, 2015)

Ovčí vlna

Ovčí vlna je izolační materiál, který se používal již od pradávna a dodnes má uplatnění v některých kulturách na izolování jednoduchých staveb (například izolování mongolských jurt). Vlna je vlastně odpadním produktem z chovu ovcí a k produkci vlny není zapotřebí speciálně pěstovat a obhospodařovat pole jako je tomu u izolačních materiálů, které mají rostlinný původ. Mezi základní vlastnosti ovčí vlny patří vysoká hydroskopicita (až do 30 %). Proto když se její vlhkost zvyšuje, tak se zvyšují i její izolační schopnosti vlivem sorpčního tepla. Výhodou oproti jiným přírodním materiálům je její nižší hořlavost. Vlna se průmyslově zpracovává do tepelně izolačních desek tloušťky 40 - 160 mm technologií kolmého kladení mykaného ovčího rouna bez použití pojiv. Využívání po domácku zpracované neprané vlny se příliš nedoporučuje

z důvodu horších fyzikálních vlastností a především kvůli velké náchylnosti na napadení moly. Součinitel tepelné vodivosti je $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a objemová hmotnost je $12 - 25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tepelná izolace vyrobená z ovčí vlny se nejčastěji připevňuje na dřevěný podklad hřeby nebo sponkami, do lehkých příček se někdy i lepí. Pokud se tento materiál používá v interiéru, má schopnost vyrovnávat vlhkost vnitřního prostředí a jeho využití spočívá i ve využití při rekonstrukcích historických objektů. V současnosti se u nás asi nejčastěji využívá ovčí vlna jako izolant mezi klády při stavbě srubových domů. (Chybík, 2009)

3.2.4 Přehled vlastností stavebních materiálů

materiál	součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	faktor difuzního odporu μ [-]	zdroj
dřevěný rám	0,150	2500	450	157	ČSN 73 0540-3
OSB desky	0,130	1600	600	50	www.stavba.tzb-info.cz
sádkartonové desky	0,220	1060	750	90	www.stavba.tzb-info.cz
cementotřískové desky	0,350	1580	1200	60	cetris.cz
sádrovláknité desky	0,320	1100	1150	13	fermacell.cz
expandovaný polystyren	0,032	1270	14	20-40	www.isover.cz
extrudovaný polystyren	0,030	2050	30	150	www.stavba.tzb-info.cz
tvrdá PUR pěna	0,022	1500	27	70-90	www.polychem-systems.com
měkká PUR pěna	0,038	800	8	4	www.polychem-systems.com
fenolická pěna	0,022	1400	35	35	www.stavba.tzb-info.cz
minerální vata	0,036	950	110	1	www.rockwool.cz
celulóza	0,038	2020	130	2	ciur.cz
dřevovláknitá izolace	0,039	2100	50 - 300	1,1	www.drevoastavby.cz
konopné desky	0,045	1600	30 - 100	2	www.stavba.tzb-info.cz
ovčí vlna	0,045	1760	20	1	www.stavba.tzb-info.cz

Tabulka 2: Přehled vlastností stavebních materiálů

Zdroje jsou uvedeny v tabulce

Z tabulky číslo 1 vyplývá, že při porovnání součinitele tepelné vodivosti má z uvedených materiálů nejmenší hodnotu tvrdá PUR pěna společně s fenolickou pěnou ($0,022 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), která má výhodu ve své požární odolnosti, nevýhodou je ale její vyšší cena a nemožnost aplikace přímým nástřikem, jako

u PUR pěn. Izolační materiály ve formě desek mají hodnotu λ podobnou (od 0,03 do 0,045 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Jejich výhodou je nižší cena a jednoduchá montáž. Dají se vzájemně zaměňovat podle toho, do jaké části konstrukce se mají využít nebo podle preference stavitele, například materiály na přírodní bázi jsou výhodné z ekologického hlediska. Nosné konstrukční materiály a deskové materiály na opláštění konstrukcí mají výrazně vyšší hodnotu λ než izolační materiály. Jejich použití je však nezbytné.

Při porovnávání měrné tepelné kapacity vychází nejvyšší hodnota u dřeva ($2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Poměrně vysokých hodnot dosahuje celulóza a dřevovláknité izolace. Materiály, které se využívají na opláštění, jako sádkartón a sádkovláknité desky mají nízkou hodnotu, nejnižší měrnou tepelnou kapacitu z izolačních materiálů má měkká PUR pěna ($800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Hustota v kombinaci s měrnou tepelnou kapacitou má zásadní vliv na výslednou tepelnou akumulaci budovy. Izolační materiály jako jsou celulóza, dřevovláknité a konopné desky s vyšší hustotou (až $300 \text{ kg}/\text{m}^3$) mají tedy velkou akumulační schopnost. Pěnové a polystyrenové izolace mají hustotu malou ($14 - 35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Tyto materiály se tedy ohřívají rychleji, ale také teplo rychleji vydávají.

Faktor difúzního odporu vypovídá o propustnosti materiálu pro vodní páru. Z uvedených materiálů je nejméně propustné dřevo (157). Opláštovací deskové materiály mají hodnotu od 50 do 90. Z izolačních materiálů má malou propustnost pro vodní páru extrudovaný polystyren (150) a následuje ho tvrdá PUR pěna (70 – 90) a fenolická pěna (35). Ostatní porovnávané izolační materiály jsou pro vodní páru velmi propustné. Nejmenší hodnoty 1 dosahuje minerální vata, ovčí vlna a dřevovláknitá izolace. Poměrně nízkou hodnotu má i měkká PUR pěna (4). Tyto materiály jsou vhodné pro difúzně otevřenou skladbu stěny.

3.3 Popis výroby rámových konstrukcí

Tato diplomová práce je zaměřena především na rámový typ konstrukce, proto bude v této části popsán způsob výroby tohoto stavebního systému.

Nejjednodušším způsobem stavění domů rámovým způsobem konstrukce je ruční výroba jednotlivých částí přímo na staveništi. Jak již bylo řečeno v předchozí části práce, tento způsob výroby je stále velmi rozšířen zejména v severní Americe, kde se takto staví velká většina rodinných domů včetně větších developerských projektů. (Simpson, 2007)

V praxi tato výroba probíhá tak, že se na stavbu dovezou balíky řeziva, opláštovacích desek a izolace. Pracovníci rozřežou řezivo dle výrobního plánu na příslušné délky. K nařezání používají ruční pokosové pily. Na základové desce si vytvoří rovnou pracovní plochu, na té si jednotlivé dřevěné prvky srovnají podle výrobního výkresu. Aby předešli nepřesnostem v rozměrech, je nutné časté měření jak obvodu, tak úhlopříčné měření stěn. Následuje spojení jednotlivých prvků pomocí hřebíků nebo vrutů do dřeva, za pomoci pneumatických hřebíkovaček nebo rázových utahováků. Poté co takto vyrobí všechny rámové stěny domu, usadí je na příslušné místo, připevní k základové desce a spojí je vzájemně mezi sebou. Tato část výroby konstrukce vyžaduje zkušenost a zodpovědnost pracovníků, protože je nutné časté přeměřování konstrukce, její vyrovnaní a následné zavětrování. (Roy, 2004)

Po postavení stěn z rámové konstrukce lze přistoupit k dalšímu kroku a tím je opláštění stěn deskovým materiálem z jedné strany. Nejčastěji využívaným materiálem pro tuto pracovní operaci jsou OSB desky nejlépe v provedení pero-drážka. Desky lze kotvit za pomoci hřebíků, pokud možno konvexních nebo se dají připevňovat vruty do dřeva. Pro zabezpečení vzduchotěsnosti a pevnosti konstrukce je vhodné všechny spoje desek s konstrukcí a spoje desek mezi sebou lepit lepidlem k tomu určeným. Často se využívají například pěnová lepidla na polyuretanové bázi. (Šubrt, 2011)

Dalším krokem je montáž rozvodů elektřiny, telekomunikačních kabelů, vody a kanalizace. Po dokončení rozvodů se musí prostor v rámové konstrukci stěny zaizolovat izolačním materiálem. Možností zaizolování je poměrně široká řada, nejčastěji je u nás využívána izolační vata, polystyren, PUR pěna, foukaná

celulóza nebo izolační materiály na bázi dřeva. Tato pracovní operace je náročná na kvalitu provedení, u některých izolačních materiálů ve svislých konstrukcích je nutno také pamatovat na sesedání. Veškeré prostupy skrz stěnu jako jsou například přípravné otvory na rekuperaci, elektrické vedení apod. je nutno pečlivě zaizolovat například PUR pěnou. (Šubrt, 2011)

Následuje opláštění stěn OSB nebo jinými deskami. Pokud skladba stěny vyžaduje použití parotěsné folie, instaluje se na stěnu folie, všechny spoje se přelepují speciálními parotěsnými páskami. Z vnitřní části zbývá již jen opláštění sádkartonem nebo jinou pohledovou obkladovou deskou. Vnější část stěny se zatepluje většinou kontaktním způsobem pomocí čedičové vaty, polystyrenu nebo dřevěné vaty. Na tuto vrstvu lze dále instalovat provětrávanou fasádu nebo klasickou strukturovanou omítku. (Novák, 2008)

Sofistikovanějším výrobním postupem rámových dřevostaveb je různá míra prefabrikace stěn. V jednodušší prefabrikaci jsou nosné prvky stěny nařezány a smontovány, případně opláštěny z jedné strany již ve výrobním závodě, potom jsou převezeny na staveniště, za pomoci jeřábu rozmístěny a uchyceny k základové desce. Další pracovní postupy jsou již stejné jako u ruční výroby. (Růžička, 2006)

Nejmodernějším způsobem výroby rámových konstrukcí je kompletní výroba hotových stěn ve výrobním závodě. V tomto případě se celý dům navrhne ve speciálním softwaru určenému na výrobu dřevostaveb (SEMA, DIETRICH). Tyto programy dokáží jednak vyřešit statické vlastnosti budoucí konstrukce a také mohou spočítat skladbu stěn tak, aby vyhovovala požadavkům na tepelný odpor stěny. Po dokončení návrhu domu touto technologií je možné si celý dům detailně prohlédnout a případné konstrukční a dispoziční problémy odstranit ještě před zahájením výroby. Toto je velká výhoda oproti základní ruční výrobě, protože významně omezuje možnost vzniku chyby, která by se jinak řešila až na stavbě, to šetří jak čas, tak náklady na stavbu. Po návrhu a zkontrolování plánů domu program dokáže vytvořené výrobní výkresy odeslat do strojů ve výrobě. (Albert, 2010)

V ideálním případě se veškeré nosné dřevěné prvky nařežou v nářezovém centru. Toto CNC centrum (např. Hundegger SC3), je vybaveno

pilovým kotoučem, který dokáže nařezat libovolné úhly, ale i frézovací hlavou otočnou ve více osách, která může připravit sedla a pláty na přesné osazení sloupkové konstrukce, což by u ruční výroby bylo zdlouhavé a pracné. Další výhodou tohoto centra je, že je osazeno různými typy vrtáků a fréz, které mohou předvrtat otvory pro kolíky, šrouby a také připravit různé otvory na kabely a jiné instalace. Jednotlivé prvky konstrukce také mohou být potištěny přímo ve stroji v souladu s výrobní dokumentací, aby nedošlo k jejich záměně. Tyto možnosti CNC center výrazně zpřesňují a zrychlují výrobu stěn. (Mayo, 2015)

Deskové materiály, které se používají na opláštění stěn rámových konstrukcí, lze také řezat velmi efektivním způsobem a to za pomoci např. velkoplošných pil, které mají vysokou rychlost řezu, lze na nich řezat několik desek na sobě a využívají optimalizaci nářezu podle výrobní dokumentace. Materiál do nich navíc může být zakládán automaticky pomocí robotické ruky nebo unašeče na portálovém jeřábu. Ještě produktivnější metodou nařezávání je využití nestingového centra (např. Felder Format 4 H80). Tato technologie může deskový materiál nejen nařezat v libovolných tvarech, ale dokáže vrtat, vyřezávat a vykružovat jakékoli otvory. To umožňuje již v této fázi výroby připravit do budoucích stěn otvory na elektrické a další rozvody. Materiál do tohoto centra je naskladňován automaticky, jednotlivé prvky dokáže stroj popsat a obsluha je jen zakládá do připravených stojanů. (Smith, 2010)

Po nařezání nosné sloupkové konstrukce a desek na opláštění následuje kompletace stěny. K tomu se využívá speciální překlápěcí výrobní stůl. V tomto stole se nejprve sesadí základní rám z KVH profilů. Vzhledem k tomu, že dřevěné prvky jsou již předfrézované, navrtané a označené a ve výrobním stole je automaticky nastavený rozměr stěny, je kompletace tohoto rámu velmi přesná a rychlá. V některých špičkových výrobních závodech již veškeré pracovní úkony při skládání těchto stěn provádějí robotické podavače. Když je dřevěný rám sešroubovaný, opláští se jedna strana stěny deskovým materiálem. V něm jsou již otvory na okna, dveře a drobné otvory na zapojení sítí. Aby bylo možné oplástit druhou stranu stěny, překlápěcí stůl stěnu otočí na druhou stranu. Nyní se do stěny zapojí prostupy na sítě, osadí se krabice na elektřinu, dále se může pokračovat s vyplněním stěny izolačním materiálem. (Smith, 2010)

Následuje opláštění druhé strany stěny domu, které se provádí opět deskovým materiálem, jenž byl předtím přesně vyřezán a navrtán. Stěna se v montážním stole postaví a pomocí mostového jeřábu se přemístí do dalšího montážního stojanu. V této části výroby se do stěny montují okna a dveře. Potom je možné na vnější stranu stěny namontovat izolační vrstvu a na ní je možné nanést první vrstvy kontaktní fasády. Takto připravená stěna se zabalí a umístí do přepravního stojanu pro expedici na stavbu. Na stavbě potom kompletace jednoho patra rodinného domu trvá obvykle jeden den, takže oproti ruční výrobě se většina práce vykoná ve výrobním závodě. Způsoby prefabrikace dřevostaveb se stále vyvíjejí a modernizují. (Smith, 2010)

3.4 Teorie šíření tepla

Teplo je druh energie, která se šíří v jakémkoli prostředí, dokud se rozdíl v teplotě mezi prostředím nevyrovná. Energie z teplejšího prostředí se vždy šíří do prostředí s nižší teplotou. Tento přenos energie označujeme jako **tepelný tok** (q) a vyjadřuje teplo dodané za časovou jednotku a je definován vztahem (Vaverka, a další, 2000):

$$q = \frac{Q}{\tau}$$

Kde Q je dodané teplo (J).

τ je čas (s).

Hustota tepelného toku je vyjádřením tepelného toku, který připadá na plošnou jednotku (1 m^2), která je postavena kolmo ke směru šíření tepla. Je definována jako podíl tepelného toku a plochy, kterou tento tok prochází. (Vaverka, a další, 2000)

$$q = \frac{Q}{\tau S}$$

Kde Q je dodané teplo (J).

τ je čas (s).

S je plocha (m^2).

Teplotní gradient častěji nazývaný tepelný spád určuje teplotní rozdíl, který připadá na jednotkovou vzdálenost (1 m). Vyjadřuje se jako (Kulhánek, 2011):

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Kde ΔT je teplotní rozdíl v K, případně ve $^{\circ}\text{C}$, který připadá na vzdálenost Δx .

Hustota tepelného toku při uvedeném teplotním gradientu je pak:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Kde λ je součinitel tepelné vodivosti, určující schopnost materiálu vést teplo. Tepelná vodivost materiálu je hustota tepelného toku při jednotkovém teplotním gradientu. (Hudec, a další, 2013)

3.4.1 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ je ve stavební tepelné technice jedna z nejdůležitějších vlastností stavebních hmot. Na jeho hodnotu má významný vliv objemová hmotnost materiálu. Lze říci, že součinitel prostupu tepla roste s objemovou hmotností materiálu. U izolačních materiálů je optimální hodnota nejčastěji mezi 30 – 40 kg.m⁻³. Dalším významným faktorem, který ovlivňuje hodnotu součinitele tepelné vodivosti je vlhkost, protože se zvyšující se vlhkostí roste i tepelná vodivost materiálu. Tím se snižují jeho tepelně izolační vlastnosti. Obsah vody v látce může snížit tepelnou vodivost oproti vzduchu přibližně 25 x. (Hudec, a další, 2013)

3.4.2 Tepelný odpor

Tepelný odpor udává stupeň odporu stavební konstrukce proti pronikání tepla. Se zvyšujícím se tepelným odporem uniká teplo z budovy pomaleji. Tepelný odpor stavební konstrukce je určen pro jednorozměrné teplotní pole za předpokladu neměnného teplotního stavu. Jedná se tedy o jednovrstvou stavební konstrukci, která odděluje dvě prostředí s rozdílnými, ale stálými teplotami. K odvození tepelného odporu se používá první a druhý Fourierův zákon, protože se jedná o přenos tepla vedením (Kulhánek, 2011).

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ tepelný odpor konstrukce (m}^2\text{.K.W}^{-1}\text{)}$$

Tento vzorec platí pro jednovrstevný materiál, který je homogenní. V případě vícevrstvého materiálu se dají jednotlivé tepelné odpory sčítat, protože tepelný odpor je aditivní veličina. Tepelný odpor se rozděluje na odpor na vnitřní (R_i) a vnější (R_e) straně konstrukce. Celkový odpor se potom vypočítá součtem všech odporů. (Kulhánek, 2011)

Pro odpor při přestupu tepla v interiérové straně konstrukce se používá vzorec:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{si}} \text{ (m}^2\text{.K.W}^{-1}\text{)}$$

Pro odpor při přestupu tepla v exteriérové straně konstrukce se používá vzorec:

$$R_{se} = \frac{1}{h_{se}} \text{ (m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}\text{)}$$

Celkový odpor konstrukce tedy je:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \text{ (m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}\text{)}$$

3.4.3 Součinitel prostupu tepla

Na povrchu stavby v mezní vrstvě dochází k výměně tepla mezi konstrukcí a okolím. Tato výměna tepla se nazývá přestupem tepla a dochází k ní jak v interiéru tak v exteriéru budovy. Tudíž se rozlišuje součinitel prostupu tepla na vnitřním a vnějším povrchu. K přestupovým jevům dochází na základě fyzikálních jevů, tedy proudění, sálání a vedení. (Vaverka, a další, 2000)

Součinitel přestupu tepla ve stavební konstrukci zahrnuje dvě složky, a těmi jsou součinitel přestupu tepla při sálání a součinitel přestupu tepla při proudění. To udává hustotu tepelného toku přestupujícího ze vzduchu do konstrukce. Pro tepelně technické výpočty se využívá převrácená hodnota odporu při přestupu tepla. (Vaverka, a další, 2000)

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

Ve vztahu k danému prostředí a fyzikálním zákonům, podle kterých se přenos energie uskutečňuje, rozeznáváme tři hlavní způsoby přenosu tepla. (Kulhánek, 2011)

1. Vedení (kondukcce)
2. Proudění (konvence)
3. Sálání (radiace)

3.4.4 Vedení tepla (kondukcce)

K přenosu tepla vedením dochází hlavně v pevných látkách. Tento typ šíření tepla se uplatňuje u téměř všech stavebních konstrukcí. Vedení tepla

popisují Fourierovi zákony, definují ho jako závislost tepelného toku na gradientu teploty. **První Fourierův zákon** je postaven na předpokladu stacionárního teplotního pole, tedy pokud se teplota v průběhu času nemění. Další nutností je izotropnost a homogenita tělesa. Matematicky lze první Fourierův zákon pro jednorozměrné vedení tepla formulovat jako (Kulhánek, 2011):

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0$$

Kde d je tloušťka desky nebo délka tyče v metrech.

λ je součinitel tepelné vodivosti ve ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

dt/dx je teplotní gradient v ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$).

Součinitel tepelné vodivosti λ je základní hodnotou při sdílení tepla vedením. λ udává tepelný tok, který proudí 1 m^2 stěny při teplotním gradientu 1°C (1K) na 1 metr.

Pro dvojrozměrné vedení tepla ve stacionárním stavu má parciální diferenciální rovnice tvar:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda_y \frac{dT}{dy} \right) = 0$$

Kde λ_x a λ_y jsou materiálové vlastnosti.

Druhý Fourierův zákon popisuje vztah mezi místní změnou teploty v závislosti na čase. Jedná se tedy o nestacionární časové proměnné teplotní pole. Rovnici pro neustálené teplotní pole v jednorozměrném prostoru lze formulovat jako (Kulhánek, 2011):

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = c\rho \frac{dT}{dt}$$

Kde c je měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

ρ je objemová hmotnost materiálu ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Rovnici pro nestacionární teplotní pole v dvojrozměrném prostoru lze formulovat jako:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\lambda_y \frac{dT}{dy} \right) = c\rho \frac{dT}{dt}$$

3.4.5 Šíření tepla prouděním (konvekce)

K přenosu tepla prouděním dochází u kapalných a plynných látek. Rozlišuje se na přirozené proudění, které vzniká přesouváním částic různé hmotnosti při zahřívání látky a na vynucené proudění, kde je fyzikální jev ovlivňován vnějšími vlivy, obvykle čerpadlem nebo ventilátorem. Hlavním fyzikálním zákonem, který popisuje hustotu tepelného toku při proudění je Newtonův zákon (Svoboda a další 2014):

$$q_c = -h_c(T_s - T_a)$$

Kde q_c je hustota tepelného toku při proudění ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

h_c je součinitel přestupu tepla při proudění ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

T_s je teplota povrchu ($^{\circ}\text{C}$).

T_a je teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$).

3.4.6 Šíření tepla sáláním (radiace)

Šíření tepla sáláním je v podstatě přenos elektromagnetického infračerveného záření. Tento druh záření vydává každé těleso s teplotou vyšší než absolutní 0. Taktéž každé těleso záření částečně pohlcuje, odráží i propouští. Pro výpočet hustoty tepelného toku při záření musíme nejprve zjistit součinitel přestupu tepla sáláním. Ten se odvozuje z následujícího vzorce (Vaverka, a další, 2000):

$$h_{Re} = \frac{4\sigma \left(\frac{T_s + T_R}{2} \right)^3}{\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s} + \frac{1}{F} + \frac{1 - \varepsilon_R}{\varepsilon_R} \frac{A_s}{A_R}}$$

Kde h_{Re} je součinitel přestupu tepla sáláním ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

σ je Stefano-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$).

ε je emisivita daného povrchu ($\pm 0,9$).

A je pohltivost záření (mezi 0 a 1).

F = 1

Nyní je možné dosadit do vzorce pro výpočet hustoty tepelného toku:

$$\vec{q}_R = -h_R(T_s - T_R)$$

3.5 Teorie šíření vodní páry

Vodní páry, které jsou ve vzduchu, mají z hlediska procházení stavebními konstrukcemi podobné vlastnosti jako tepelný tok. Stejně jako při toku tepla je nutný gradient teploty, k toku vodních par je nutný gradient částečných tlaků vodních par. Děj, při kterém dochází k přestupu vlhkosti mezi dvěma prostředími s rozdílnými parciálními tlaky vodních par, nazýváme difúzí. Difundující vodní pára vychází z oblasti s vyšším tlakem do oblasti, kde je tlak vodní páry nižší. Za určitých tepelných a tlakových podmínek může docházet v materiálu ke kondenzaci vodní páry. Ve stěně, která se skládá z jedné vrstvy materiálu, je účinek kondenzace vodní páry minimální. Ve stěnách, které se skládají z více vrstev materiálu, je vznik kondenzace větším rizikem a může dojít i k poškození materiálu včetně hygienických rizik jako například vznikem plísní. (Mrlík, 1984)

Vodní pára nebo plyn difundují všemi látkami, které mají mezimolekulární prostory větší než střední volná dráha molekul plynu. Ve stavebních materiálech se proto vyskytují mikrokapiláry a makrokapiláry. (Vaverka, a další, 2000)

Mikrokapiláry mají rozměr $d < 10^{-7}$ m, nastává v nich kapilární kondenzace, protože střední volná dráha molekul vodní páry je větší nebo stejná než průměr pórů. (Vaverka, a další, 2000)

Makrokapiláry mají rozměr $d > 10^{-7}$ metru, a proto v nich nenastává kapilární kondenzace. Vodní pára se v nich dle zákona difúze pohybuje, protože volná dráha jejich molekul je menší než průměr pórů. Izolační stavební materiály většinou mají průměr pórů 10x nebo ještě vícekrát větší, nežli střední volná dráha molekul. Z tohoto důvodu je difúze vodní páry stejná jako difúze vzduchu. (Vaverka, a další, 2000)

Podobně jako pro přestup tepla platí Fourierovy zákony, pro přestup vlhkosti platí Fickovo zákony (Horáček, 2004).

1. Fickův zákon pro propustnost vodní páry

$$\vec{j} = -\delta_x \frac{dp}{dx} - \delta_y \frac{dp}{dy}$$

2. Fickův zákon pro přestup vodní pár při neustálených podmínkách

$$\frac{d}{dx} \left(\delta_x \frac{dp}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\delta_y \frac{dp}{dy} \right) = \frac{M}{RT} \frac{dp}{dt}$$

2. Fickův zákon pro přestup vodní páry při ustálených podmínkách

$$\frac{d}{dx} \left(\delta_x \frac{dp}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(\delta_y \frac{dp}{dy} \right) = 0$$

Okrajové podmínky pro přestup vodní páry:

$$\vec{j} = -h_p (-p_{vs} - p_v)$$

Kde h_p je součinitel přestupu vodní páry (s.m^{-1}).

p_{vs} je parciální tlak vodních par na povrchu.

p_v je parciální tlak vodních par v interiéru nebo exteriéru

Součinitel přestupu vodní páry pro interiéru dle ČSN 73 0540:

$$h_{pi} = 1.10^{-8} \text{ (s.m}^{-1}\text{)}$$

Součinitel přestupu vodní páry pro exteriér dle ČSN 73 0540:

$$h_{pe} = 2.10^{-8} \text{ (s.m}^{-1}\text{)}$$

Hustota difúzního toku při uvedeném gradientu tlaků vodních par je pak při ustálených difúzních podmínkách (Kulhánek, 2011):

$$\vec{j} = -\delta_p \text{grad} p_v$$

Kde j je hustota difúzního tlaku vodní páry ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

δ je součinitel difúze vodní páry (s).

p je skutečný částečný tlak vodní páry (Pa).

Součinitel difúze vodní páry δ značí vlastnost materiálu propustit vodní páru difúzí. Je vyjádřen následujícím vztahem:

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

Kde δ_a je součinitel difúzní vodivosti vzduchu (s).

μ je faktor difúzního odporu.

Při hodnocení stavu vlhkosti ve stavebních konstrukcích se počítá s difúzními konstantami. Používají se především dva parametry a těmi jsou faktor difúzního odporu a součinitel difúze vodní páry. (Vaverka, a další, 2000)

Faktor difúzního odporu je bezrozměrná veličina, která udává kolikanásobně je zkoušený materiál méně propustný nežli vzduch pro vodní páru. V současné době je tato veličina využívána více nežli součinitel difúze vodní páry, který charakterizuje difúzní schopnost materiálu propouštět vodní páru. (Vaverka, a další, 2000)

Pro převod obou mezi těmito součiniteli platí následující vztah:

$$\mu = \frac{1}{N \cdot \delta}$$

Kde μ je faktor difúzního odporu.

N je teplotní difúzní funkce ($5,315 \cdot 10^9 \text{ v} \cdot \text{s}^{-1}$).

δ je součinitel difúze vodní páry (s).

Další sledovanou veličinou v konstrukci staveb je difúzní odpor, který udává schopnost materiálu odolat šíření tlaku vodní páry. Čím větší je difúzní odpor, tím pomaleji proniká vodní pára materiálem. Tuto veličinu lze vyjádřit vztahem (Kulháněk, 2011):

$$R = \frac{x}{\delta}$$

Kde δ je součinitel difúze vodní páry (s)

X je tloušťka materiálu

R je difúzní odpor ($m \cdot s^{-1}$)

Celkový difúzní odpor při přestupu vodní páry konstrukcí lze vyjádřit jako (Kulhánek, 2011):

$$R_{Do} = R_i + R + R_e$$

Kde R_i je odpor při přestupu vodní páry na vnitřní straně konstrukce, vyjadřuje se vztahem $1/h_{pi}$. $h_{pi} = 1 \cdot 10^{-8}$ ($s \cdot m^{-1}$) (ČSN 730540)

R_e je odpor při přestupu vodní páry na vnější straně konstrukce, vyjadřuje se vztahem $1/h_{pe}$. $h_{pe} = 2 \cdot 10^{-8}$ ($s \cdot m^{-1}$) (ČSN 730540)

Součinitel prostupu vodní páry U_{Do} je převrácenou hodnotou odporu při přestupu vodní páry (Vaverka, a další, 2000):

$$U_{Do} = \frac{1}{R_{Do}} \quad (s \cdot m^{-1})$$

4 Metodika

Pro celkové povědomí o dřevostavbách byl v úvodu literární rešerše uveden přehled všech hlavních typů dřevostaveb. Další část byla zaměřena na materiály používané pro výrobu rámových dřevostaveb a to jak konstrukční, tak izolační. Pro ucelený přehled byla vypracována tabulka hlavních fyzikálních vlastností materiálů, se kterými se dále pracovalo. Další kapitola byla zaměřena na výrobu rámových dřevostaveb, neboť to souvisí s výrobou vzorků, které byly použity v experimentálním měření v této práci. Následně byla rozpracována teorie prostupu tepla a vlhkosti, která zastřešuje teoretický výpočet a experimentální měření.

V této kapitole bude popsána metodika teoretického výpočtu a postup přípravy experimentálního měření metodou teplé skříně a jeho provedení.

4.1 Metoda teoretického výpočtu.

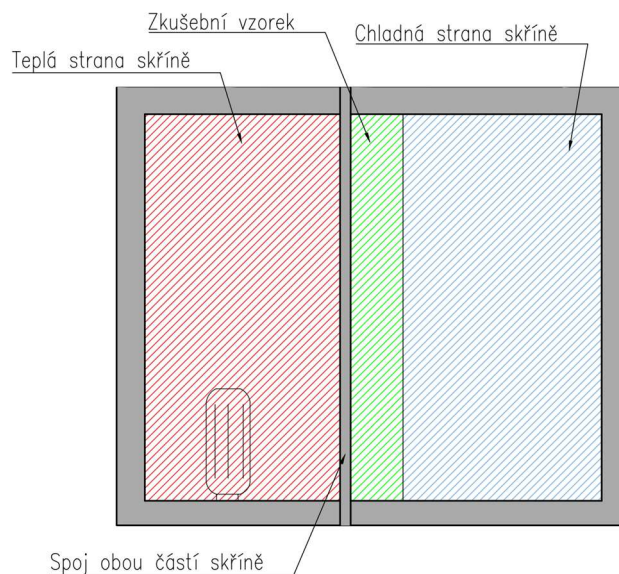
K výpočtu tepelných a vlhkostních vlastností byla využita metoda konečných prvků. Princip této metody spočívá ve vytvoření fyzikálního modelu. Pro účely výpočtu použitého v této práci byl vytvořen 2-D model průřezu každého stěnového panelu. K samotnému výpočtu byl použit počítačový program pro řešení diferenciálních rovnic FlexPDE. Celý skript pro tento program je součástí přílohy a to pro výpočet za stacionárních (10.1) i nestacionárních podmínek (10.2.).

Tato metoda přináší oproti experimentálnímu měření detailní zobrazení přenosu tepla ve všech částech panelu. Další zásadní výhodou je zobrazení přestupu vlhkosti, který v experimentálním měření nebylo možné zjistit. Pomocí této metody je možné odhalit riziková místa, kde by mohlo docházet ke kondenzaci vlhkosti uvnitř panelu a následnému poškození konstrukce vlivem degradačních činitelů. (Šubrt, 2011)

4.2 Metoda teplé skříně

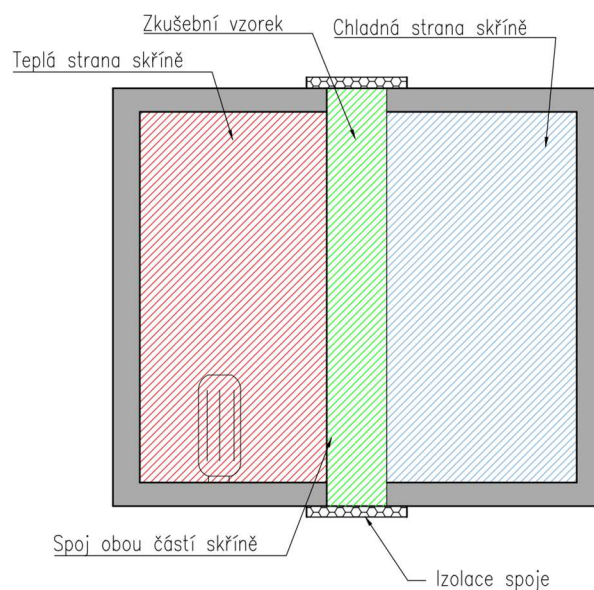
Norma EN ISO 8990 z roku 1998 popisuje stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu. Norma stanovuje principy návrhu zkušebního zařízení a základní požadavky, které musí toto zařízení splňovat, aby se s jeho pomocí

daly laboratorně stanovit vlastnosti prostupu tepla částí staveb. Norma uvádí dvě metody měření součinitele prostupu tepla a tepelného odporu: metodu kalibrované teplé skříně a metodu chráněné teplé skříně. Pro tuto práci byla použita metoda kalibrované teplé skříně, kdy se vzorek umístí do skříně a izoluje se spára ve spoji skříně. V případě metody chráněné teplé skříně se zvolí vzorek o větších rozměrech než je vlastní skříň a utěšňuje se spára v místě mezi skříní a vzorkem. Vzorky zde byly testovány ve svislé poloze, protože se jednalo o vzorky obvodových stěn. Pro vzorky stropů a podlah se používá horizontální poloha ve zkušebním zařízení.



Obrázek 18: Metoda kalibrované teplé skříně

Zdroj: vypracoval autor podle EN ISO 8990



Obrázek 19: Metoda chráněné teplé skříně

Zdroj: vypracoval autor podle EN ISO 8990

Touto metodou se dají měřit tepelné vlastnosti vzorků s přesností $\pm 5\%$ v případě stejnorodého vzorku, to znamená vzorku, který je složen pouze z jednoho materiálu. Pro každou skříň je nutné provést měření se stejnorodým vzorkem o známých vlastnostech. Toto měření se použije pro kalibraci. Pro skříň, která byla vyrobena v rámci této práce, bylo toto kontrolní měření provedeno na vzorku polystyrenu EPS 100 o síle 80 mm. U nestejnorodých vzorků složených z více materiálů o různých vlastnostech je stanovení přesnosti náročnější, protože dochází k odlišnému tepelnému toku v jednotlivých materiálech.

Podstata metody chráněné teplé skříně i kalibrované teplé skříně spočívá v tom, že vzorek je umístěn mezi teplou a chladnou komorou, v nichž jsou známé teploty prostředí. Samotné měření se provádí při ustálené teplotě vzduchu, teplotě na povrchu vzorku a celkovém vstupním tepelném výkonu v teplé skříně. V okolním prostředí skříně je udržována konstantní teplota, která nemusí být nutně stejná jako teplota vzduchu v měřicí skříně, ale u prováděného pokusu byla teplota stejná. Výhodou stejných teplot je, že nebylo nutné provádět kalibraci. V důsledku použití konstrukce skříně s vysokým tepelným odporem je ztrátový tepelný tok stěnami skříně velmi malý.

Z tohoto měření se poté vypočítají tepelně-technické vlastnosti testované stěny. Na povrchu vzorku se teplo šíří prouděním a sáláním. Proudění je ovlivňováno teplotou vzduchu a rychlostí pohybu vzduchu, sálání je taktéž ovlivňováno teplotou a také sálavostí povrchů, které jsou v kontaktu se vzorkem. Výsledkem kombinace těchto dvou jevů je součinitel přestupu tepla na povrchu.

Pro metodu kalibrované teplé skříně je velikost měrné plochy dána vnitřním obvodem měřicí skříně. Chyby měření jsou částečně omezeny při zvětšování měrné plochy. Minimální rozměr měrné plochy při měření v kalibrované teplé skříně je dán větší hodnotou z trojnásobku tloušťky zkušební vzorku nebo rozměru 1x1 metr, který byl použit pro tuto práci. Měření větších vzorků je technicky i ekonomicky náročné.

Čidla, která se používají k měření teploty vzduchu a k měření teploty na povrchu vzorku, je nutné rozmístit rovnoměrně a umístit je vzájemně proti sobě na chladné a teplé straně vzorku. Na jeden metr čtverečný povrchu vzorku musí

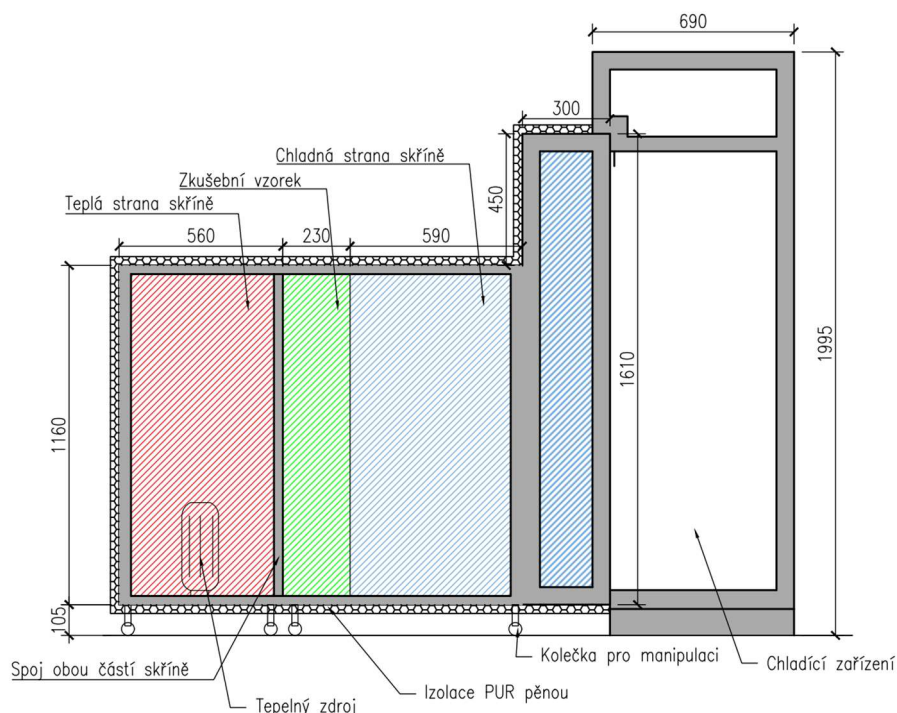
být použita minimálně dvě čidla. Nejmenší možný počet čidel na jeden vzorek je devět.

Podmínky měření se volí se zvážením výsledného použití vzorku, aby se co nejvíce přiblížilo budoucímu užívání měřeného materiálu. Výsledky zkoušky jsou ovlivněny průměrnou teplotou a rozdílem teplot. Pro stavební využití jsou obvyklé rozdíly teplot mezi interiérem a exteriérem 20 a více stupňů Celsia.

Při experimentu je nutné dosáhnout ustáleného tepelného stavu, který je časově závislý na činitelích jako jsou tepelná kapacita vzorku, součinitel prostupu tepla a tepelný odpor. Ustálený tepelný stav nastává v případě, že dvě po sobě jdoucí měření nevykáží větší rozdíl než 1 %.

4.2 Popis výroby a zprovoznění teplé skříně

Samotné měření prostupu tepla u jednotlivých vzorků má dvě části. První část je zhotovení izolované teplé komory, do které se umístí vzorek a pomocí teplotních čidel a měření spotřeby energie je možné vypočítat součinitel prostupu tepla.



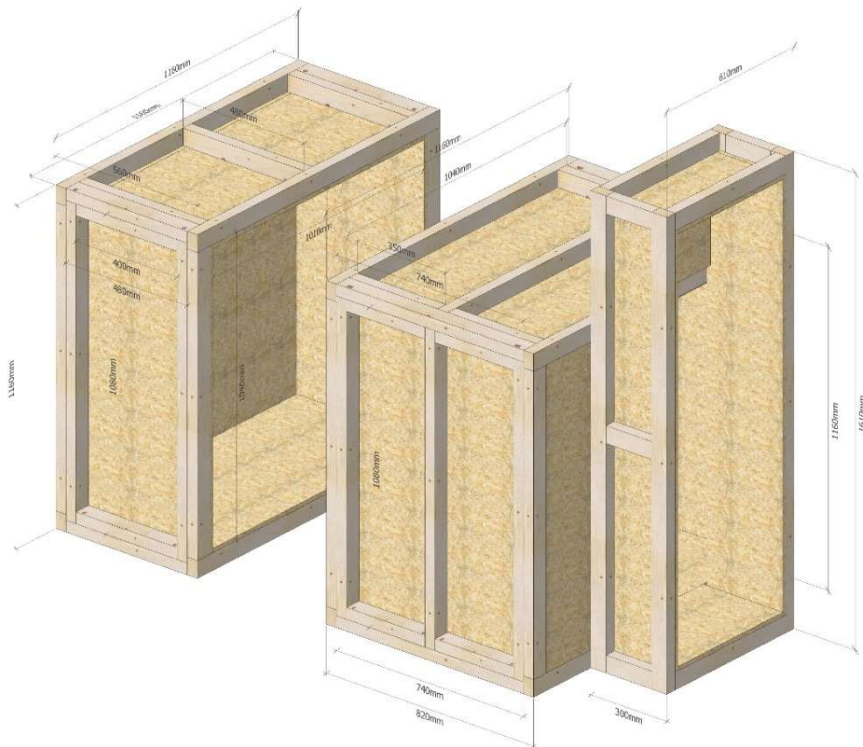
Obrázek 20: Výkres teplé skříně

Zdroj: autor

Návrh skříně byl přizpůsoben rozměru vzorků (1000x1000 mm) a dostupnému vybavení zejména pak chladicímu boxu, který převyšuje vzorek a

na skříně tak bylo nutné navrhnout spojovací část, která by umožnila propojení chladicího boxu a samotné měřicí části skříně.

Podobně jako u návrhu vzorků byl i pro návrh skříně využit program Sketchup, ve kterém byl vytvořen 3D model celé měřicí skříně. Použití 3D softwaru značně usnadnilo návrh konstrukce, protože díky němu je patrné, jak do sebe všechny části výrobku budou zapadat včetně nosné konstrukce a opláštění. Základní půdorysné rozměry vnitřního prostoru skříně jsou 1010x1310 mm a výška 1010 mm. Část, která propojuje chladicí box a měřicí skříně, má rozměry 500x315 mm a 1460 mm na výšku.



Obrázek 21: 3D zobrazení konstrukce teplé skříně

Zdroj: autor

Dřevěné KVH profily 60x40 mm byly nařezány podle nářezového plánu na příslušné délky, poté byly spojeny pomocí vrtů 6x120 mm podle schématického nákresu. Vzniklá nosná konstrukce se z vnitřní strany opláštila OSB deskami síly 15 mm. Desky se připevňovaly pomocí vrtů 5x50 mm. A veškeré spoje se podlepovaly pěnovým polyuretanovým lepidlem.

Následovala nejdůležitější část výroby teplé skříně tedy izolace, která je klíčová pro přesnost měření. Tato izolace se prováděla nástřikem tvrdé polyuretanové pěny v síle 8 – 10 cm. Aplikace byla provedena pomocí zařízení Graco Reactor EXP 2. Po nanesení tepelné izolace byla na teplou skříň ještě namontována kolečka pro snadnější manipulaci a kování umožňující spojení jednotlivých dílů. Pro zabezpečení těsnosti spoje mezi oběma částmi skříně byla použita těsnící polyuretanová páska.



Obrázek 22: Aplikace PUR pěny na skříň

Zdroj: autor

Jednotlivé díly teplé skříně byly převezeny do prostor Dřevařského pavilonu na ČZU, kde probíhalo vlastní měření. Důležité bylo, aby v místnosti, kde měření probíhalo, byla udržována stálá teplota. Výkyvy teplot by totiž mohly ovlivňovat výsledky měření.

V chladné části skříně byla udržována konstantní teplota -13°C prostřednictvím chladícího boxu. Ten byl připevněn na měřicí skříň za pomoci gumového těsnění a přitažen stahovacími kurty, aby se co nejvíce omezily úniky energie.

V teplé části skříně bylo umístěno elektrické topné těleso Eurom RK 500, které bylo zapojeno do panelového PID regulátoru, který pomocí vlastního teplotního čidla umístěného v komoře udržoval stálou teplotu 24°C . Regulátor byl zapojen přes zásuvkový adaptér Power Analyzer Rohde & Schwarz HZC

815 do wattmetru Power Analyzer Rohde & Schwarz HMC 8015, který měřil spotřebu energie topného tělesa.



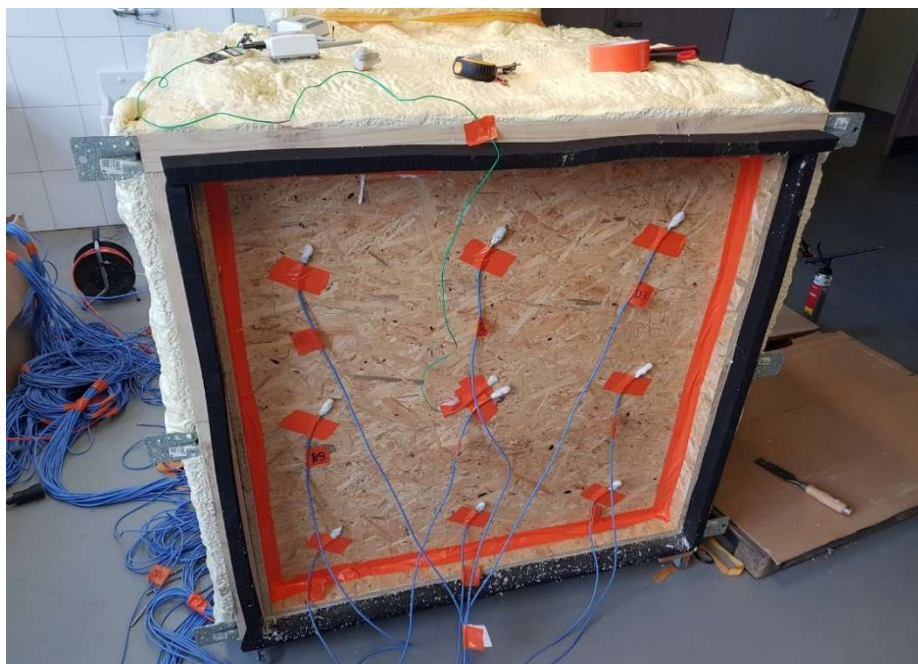
Obrázek 23: Kompletní teplá skříň

Zdroj: autor

Teplota byla měřena současně dvěma přístroji. Každý z těchto přístrojů měl více měřících čidel. Prvním zařízením bylo Testo Saveris, které se skládá ze základní stanice a dvou bezdrátových sběrnic dat, přičemž každá má 2 teplotní čidla s přesností $\pm 0.2^\circ \text{C}$. Měřila se jimi teplota na povrchu panelu z teplé i chladné strany a současně teplota vzduchu z obou stran.

Výhodou tohoto zařízení bylo, že zaznamenávalo data přímo do počítače přes příslušný software po celou dobu pokusu. Omezený počet čidel ale neodpovídá požadavkům normy ČSN EN ISO 8990 (1998).

Druhým zařízením byla sběrnice teplotních a vlhkostních čidel typu THT2 s přesností od $\pm 0.2^\circ \text{C}$ do $\pm 0.4^\circ \text{C}$ od firmy Papouch. Tento přístroj umožňuje využít velký počet teplotních čidel potřebných ke splnění požadavků normy. Pro toto měření bylo využito celkem 26 čidel, 9 čidel na povrchu panelu na každé straně, 3 čidla byla zavěšena ve studené i teplé části komory pro měření teploty vzduchu a 2 čidla pro měření teploty vzduchu v místnosti.



Obrázek 24: Umístění teplotních čidel na teplé straně

Zdroj: autor

Pro první zkušební měření bylo využito pouze zařízení od firmy Testo a jako zkušební vzorek byla zvolena polystyrenová deska typu EPS 100 o síle 80 mm. Na tomto vzorku se odzkoušela funkčnost celého systému.



Obrázek 25: Chladná strana skříně – zkušební měření

Zdroj: autor

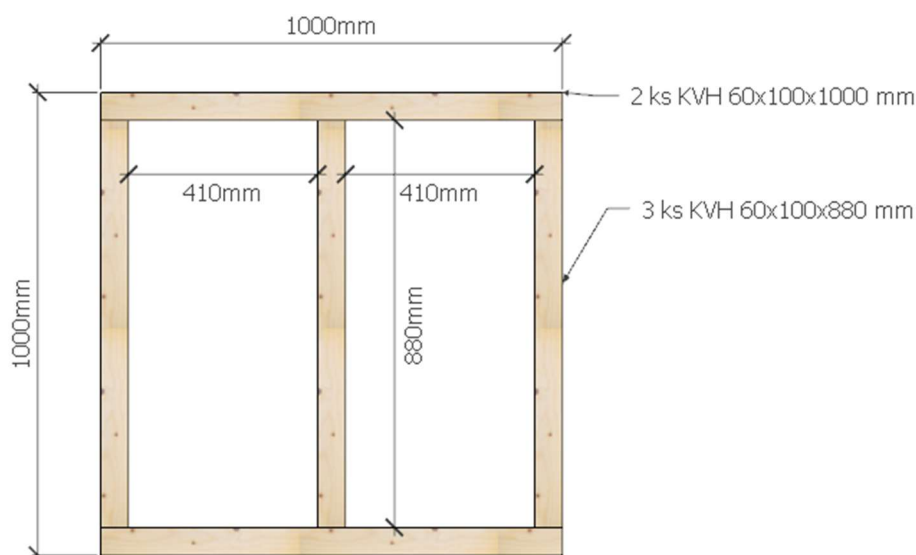
Pro přesnost měření bylo důležité kvalitní utěsnění spáry mezi vzorkem a oběma částmi komory. Proto bylo zvoleno utěsnění prostřednictvím montážní polyuretanové pěny Würth Flexi RAL, kterou se připevnil izolační rámeček z extrudovaného polystyrenu. Po vsazení vzorku do komory byl spoj ještě doplněn z obou stran. Celý spoj byl přelepen ještě těsnící lepící páskou.

Teplotní čidla byla připevněna na povrch vzorku pomocí lepící pásky a pro kvalitní přenos tepla ze vzorku do čidla byla využita plastická hmota.

4.3. Popis testovaných stěnových panelů

Druhy skladeb byly vybrány tak, aby bylo možné otestovat různé typy polyuretanové pěny v kombinaci s dalšími izolačními materiály jako je izolační čedičová vata a pěnový fasádní polystyren (EPS).

Pro výrobu panelů byl připraven nářezový plán. Tento jednoduchý plán byl zhotoven v programu Sketchup, pomocí něhož bylo možné vytvořit 3D model jednotlivých stěn. Pokud by se jednalo o podklady do výroby pro klasickou dřevostavbu, bylo by vhodnější použít specializovaný program, který umožňuje automatické vytvoření nářezového plánu, případně spolupracuje s nářezovým centrem. Další výhodou těchto programů je, že předem vypočtou veškerý materiál potřebný pro výrobu.



Obrázek 26: Nářezový plán vzorků

Zdroj: autor

Všechny vzorky stěn byly vyrobeny z dřevěných KVH profilů 60x100 a 60x160 mm. Jednotlivé části byly nařezány na ruční zkracovací pile. Připravené profily byly následně srovnány na montážní stůl a staženy za pomoci pákových

ručních svorek. Do místa každého spoje bylo rozměřeno umístění spojovacích vrtů a tato místa byla potom předvrtána hadovitým vrtákem do dřeva o průměru 5 mm, tyto otvory byly navrtány do hloubky cca 90 mm. Do vytvořených otvorů byly poté pomocí rázového utahováku zašroubovány vruty do dřeva 6x120 mm. Byl kladen velký důraz na čistotu řezu, protože jedině tak bylo možné dosáhnout co největší přesnosti spoje a omezit tak případné tepelné úniky při měření. Tímto způsobem byl vytvořen nosný rám.

Dalším krokem bylo opláštění OSB deskami v síle 15 mm s perem a drážkou. Byly použity desky vyrobené firmou Kronospan v kvalitě číslo 3. Desky byly nařezány dle nářezového plánu tak, aby vznikl rozměr 1000x1000 mm, pro nařezání byla použita formátovací pila s předřezem Rojek industry. Pro upevnění byly opět použity vruty do dřeva o rozměru 5x50 mm. Před šroubováním bylo na rám z KVH profilů nanášeno pěnové lepidlo od firmy Würth označení 2301, toto lepidlo bylo také nanášeno do drážky OSB desky, aby bylo dosaženo co největší těsnosti spoje.

Po dokončení opláštění OSB deskou z jedné strany stěny byl vzorek otočen a bylo možné přistoupit k výplni stěny vnitřní izolační vrstvou. Po dokončení tohoto úkonu byla stejným způsobem opláštěna i druhá strana stěny OSB deskami 15 mm. Posledním krokem při výrobě vzorku stěny bylo upevnění vnější tepelné izolace, která se lišila podle jednotlivých vzorků.

Pro reálné použití v dřevostavbě by všechny stěny byly z vnitřní strany opláštěny sádkkartonem nebo jinou podobnou deskou a z vnější strany by bylo nataženo lepidlo, perlínka a strukturovaná omítka nebo fasáda řešena jiným způsobem jako například provětrávaná dřevěná fasáda. Pro účely měření ale tyto vrstvy nejsou důležité a spíše by komplikovaly měření a snižovaly jeho přesnost.

Stejným postupem byly vyrobeny i ostatní vzorky stěn se stejnou skladbou materiálů, ale v menším formátu 500 x 500 mm pro měření v topné desce. Tyto vzorky se liší v tom, že v nosném rámu nemají vnitřní příčku z KVH profilu, ale mají pouze obvodový rám.

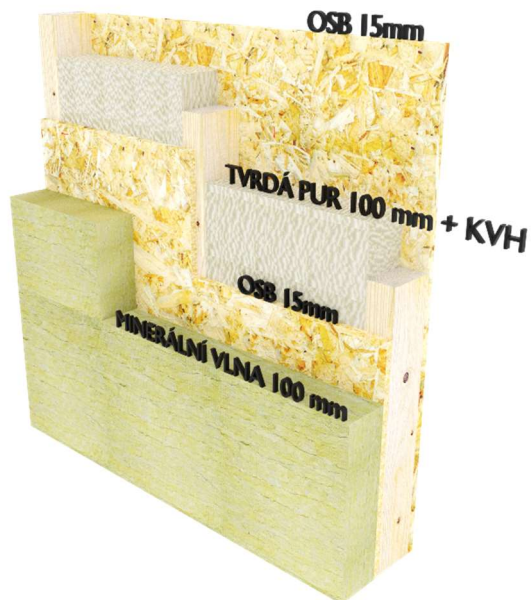
4.3.1. Vzorek 1

1. Vzorek má složení z vnitřku směrem ven: 15 mm OSB, 100 mm tvrdá PUR pěna a nosná konstrukce KVH, OSB 15 mm a 100 mm fasádní čedičová vata.

materiál	součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	hustota ρ [kg/m ³]	faktor difuzního odporu μ [-]	zdroj
dřevěný rám	0,150	2500	450	157	ČSN 73 0540-3
OSB desky	0,130	1600	600	50	www.stavba.tzb-info.cz
tvrdá PUR pěna	0,022	1500	27	70-90	www.polychem-systems.com
minerální vata	0,036	950	110	1	www.rockwool.cz

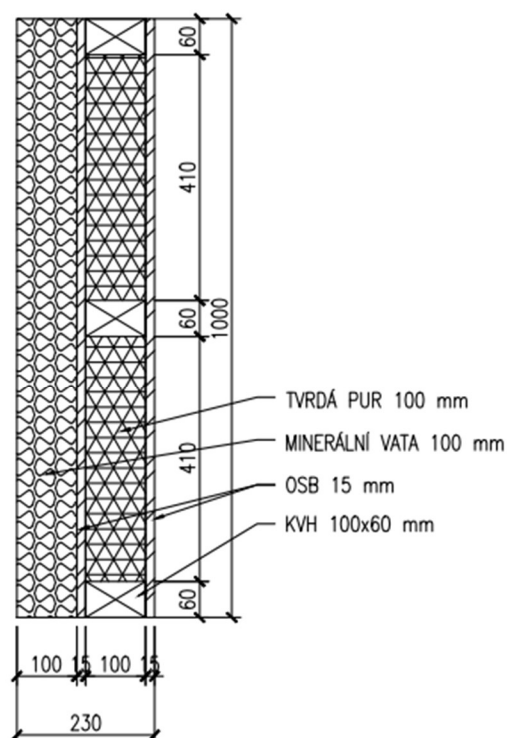
Tabulka 3: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 1

Zdroje jsou uvedeny v tabulce



Obrázek 27: Průřez stěnou číslo 1

Zdroj: autor



Obrázek 28: Technický výkres stěny číslo 1

Zdroj: autor

4.3.2. Vzorek 2

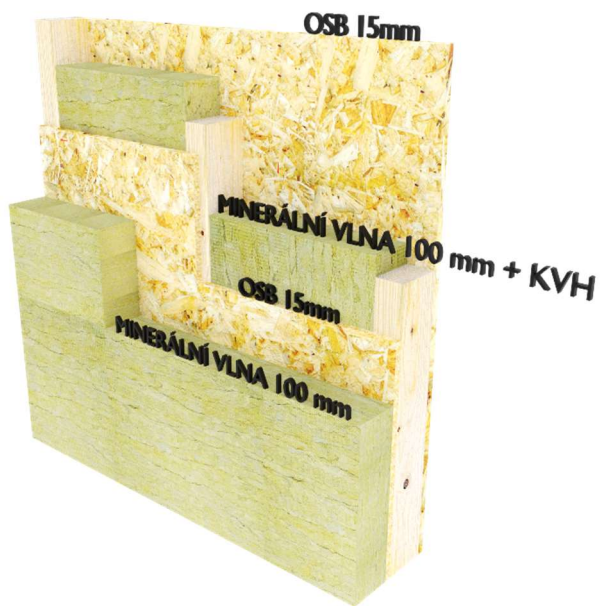
2. Vzorek má složení z vnitřku směrem ven:

15 mm OSB, 160 mm měkká PUR pěna a nosná konstrukce KVH, OSB 15 mm, a 100 mm fasádní čedičová vata.

materiál	součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	hustota ρ [kg/m ³]	faktor difuzního odporu μ [-]	zdroj
dřevěný rám	0,15	2500	450	157	ČSN 73 0540-3
OSB desky	0,13	1600	600	50	www.stavba.tb-info.cz
minerální vata	0,036	950	110	1	www.rockwool.cz

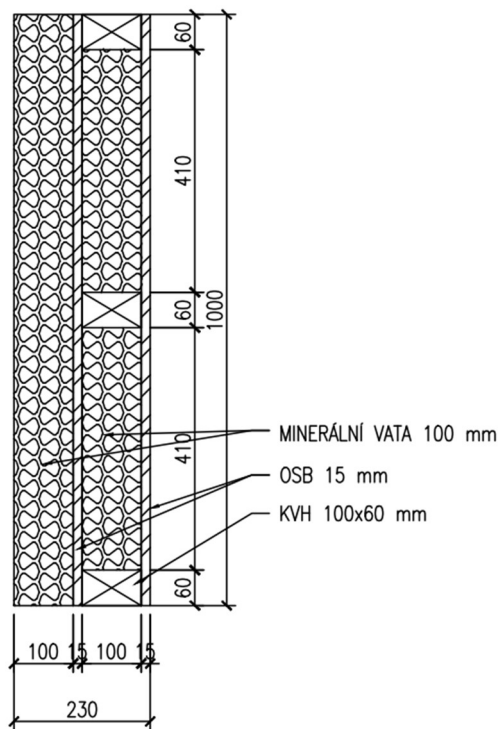
Tabulka 4: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 2

Zdroje jsou uvedeny v tabulce



Obrázek 30: Průřez stěnou číslo 2

Zdroj: autor



Obrázek 29: Technický výkres stěny číslo 2

Zdroj: autor

4.3.3. Vzorek 3

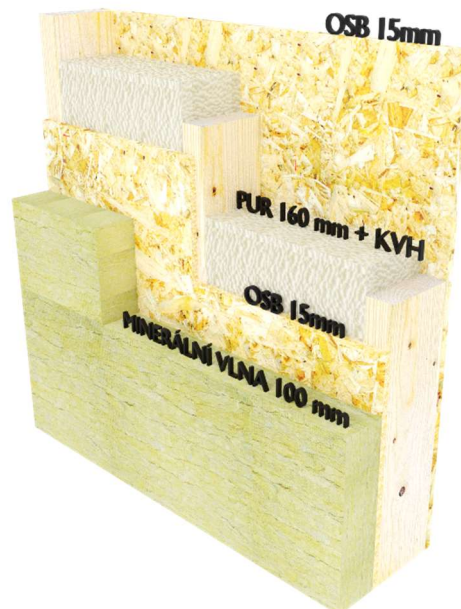
3. Vzorek má složení z vnitřku směrem ven:

15 mm OSB, 160 mm fasádní čedičová vata a nosná konstrukce KVH, OSB 15 mm a opět 100 mm fasádní čedičová vata.

materiál	součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	hustota ρ [kg/m ³]	faktor difuzního odporu μ [-]	zdroj
dřevěný rám	0,15	2500	450	157	ČSN 73 0540-3
OSB desky	0,13	1600	600	50	www.stavba.tz/b-info.cz
měkká PUR pěna	0,038	800	8	4	www.polychem-systems.com
minerální vata	0,036	950	110	1	www.rockwool.cz

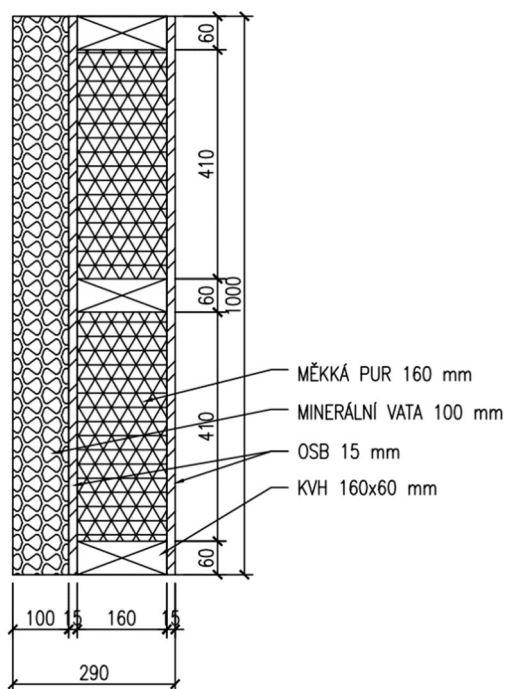
Tabulka 5: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 3

Zdroje jsou uvedeny v tabulce



Obrázek 31: Průřez stěnou číslo 3

Zdroj: autor



Obrázek 32: Technický výkres stěny číslo 3

Zdroj: autor

4.3.4. Vzorek 4

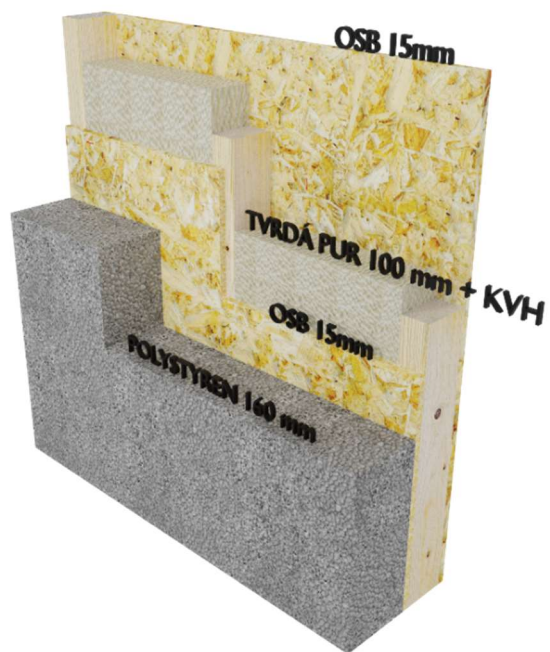
4. Vzorek má složení z vnitřku směrem ven:

15 mm OSB, 100 mm tvrdá PUR pěna a nosná konstrukce KVH, OSB 15 mm a 160 mm fasádní polystyren.

materiál	součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]	měrná tepelná kapacita c [J/kg.K]	hustota ρ [kg/m ³]	faktor difuzního odporu μ [-]	zdroj
dřevěný rám	0,15	2500	450	157	ČSN 73 0540-3
osb desky	0,13	1600	600	50	www.stavba.tb-info.cz
expandovaný polystyren	0,032	1270	14	20-40	www.isover.cz
tvrdá PUR pěna	0,022	1500	27	70-90	www.polychem-systems.com
minerální vata	0,036	950	110	1	www.rockwool.cz

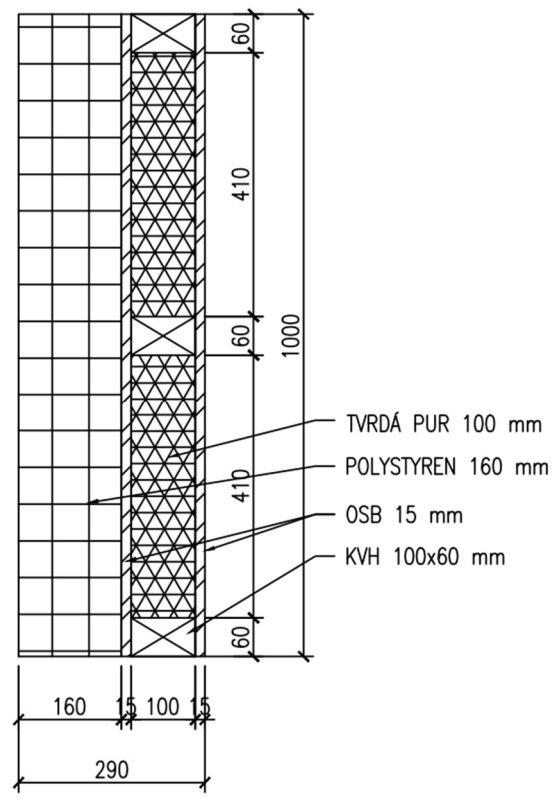
Tabulka 6: Vlastnosti materiálů vzorku číslo 4

Zdroje jsou uvedeny v tabulce



Obrázek 34: Průřez stěnou číslo 4

Zdroj: autor



Obrázek 33: Technický výkres stěny číslo 4

Zdroj: autor

5 Výsledky

5.1 Výsledky měření metodou teplé skříně

V této kapitole jsou v tabulkách vypsány naměřené hodnoty pro každý testovaný vzorek. Měření probíhalo za stacionárních podmínek - 13° C v chladné straně skříně a +24° C v teplé straně skříně. Naměřené hodnoty jsou uvedeny jako průměr ze tří intervalů trvajících tři hodiny, které se vybíraly po dosažení ustáleného teplotního stavu. Bylo vždy vybráno minimálně pět tříhodinových intervalů. Data v tabulkách jsou tři prostřední hodnoty, minimum a maximum bylo pro zpřesnění výsledku vynecháno.

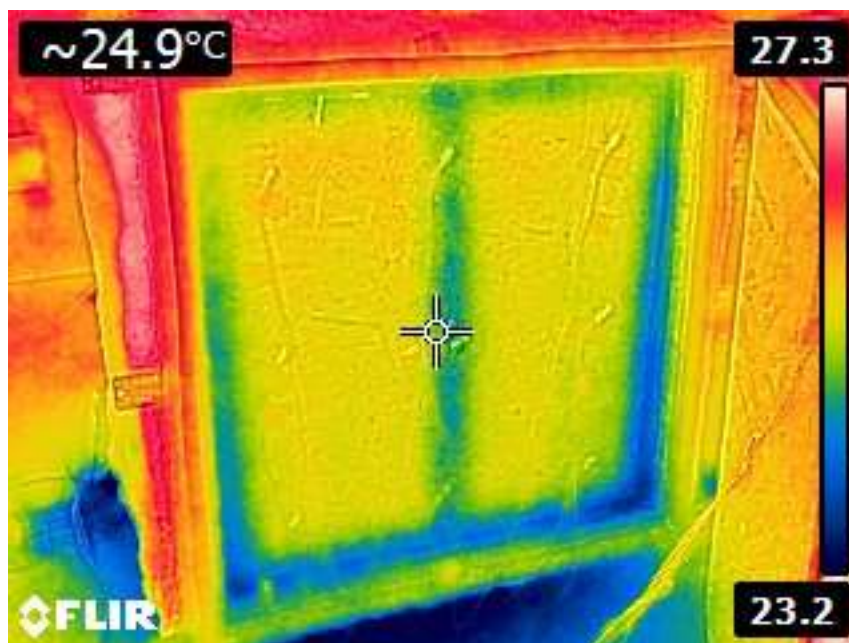
- 1) Sendvičový stěnový panel s výplní tvrdou PUR pěnou 100 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

Průměrný tepelný tok během měření byl 7,51 (W.m⁻²), směrodatná odchylka byla 0,19 (W.m⁻²). Teplota vzduchu v chladné části teplé skříně (tae) byla průměrně -12,11 °C se směrodatnou odchylkou 0,01 °C. Průměrná hodnota z devíti čidel na povrchu vzorku v chladné části skříně (tse) byla -10,51 °C se směrodatnou odchylkou 0,079 °C. Teplota vzduchu v teplé části skříně (tai) byla průměrně udržována na 23,74 °C se směrodatnou odchylkou 0,07 °C. Na povrchu teplé části skříně (tsi) byla průměrná hodnota 22,87 °C se směrodatnou odchylkou 0,07 °C. Na základě tří měření byly vypočítány následující hodnoty. Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla (U_t) vyšla na 0,209 (W.m⁻²K⁻¹) se směrodatnou odchylkou 0,006 (W.m⁻².K⁻¹). Tepelný odpor (R_t) byl vypočten na 4,77 (m².K.W⁻¹) se směrodatnou odchylkou 0,128 (m².K.W⁻¹). Poslední zjištěnou veličinou byl součinitel tepelné vodivosti (λ), který vyšel 0,048 (W.m⁻¹.K⁻¹) se směrodatnou odchylkou 0,001 (W.m⁻¹.K⁻¹).

doba (h)	q (W. m ⁻²)	d (m)	A (m ²)	tae (°C)	tse (°C)	tai (°C)	tsi (°C)	U _t (W.m ⁻² K ⁻¹)	R _t (m ² .K. W ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)
3 h	7,42	0,23	1	-12,1	-10,5	23,69	22,82	0,207	4,825	0,048
3 h	7,78	0,23	1	-12,1	-10,4	23,69	22,82	0,217	4,599	0,050
3 h	7,34	0,23	1	-12,1	-10,6	23,85	22,97	0,204	4,901	0,047

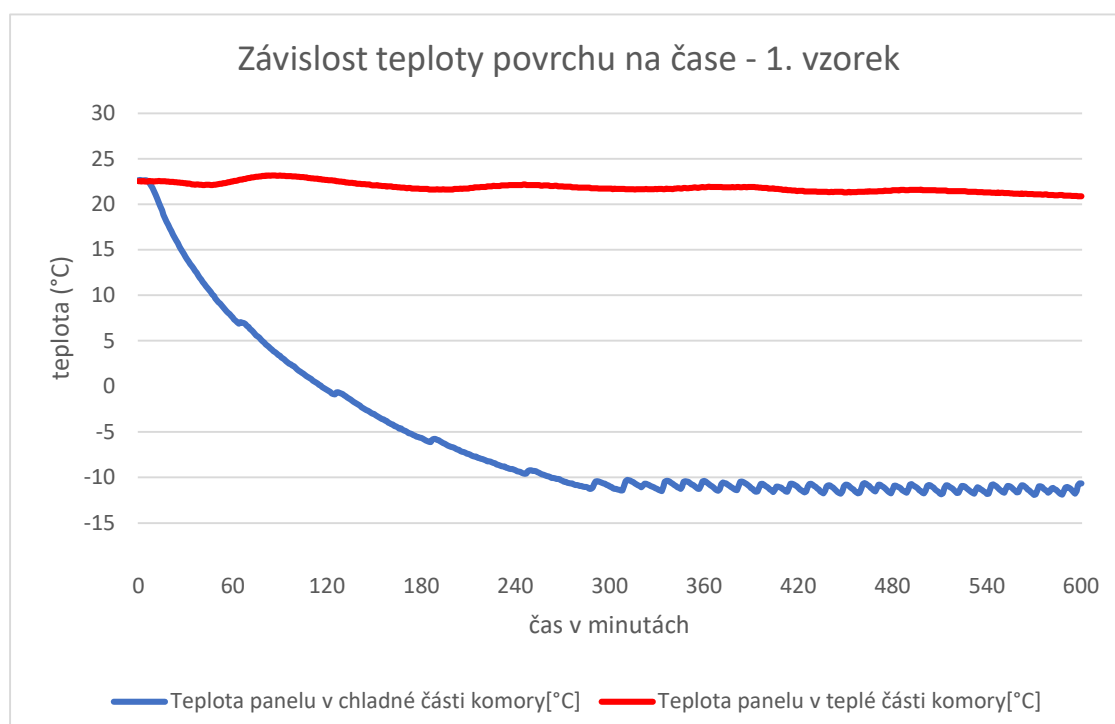
Tabulka 7: Výsledky experimentálního měření - 1. vzorek

Zdroj: autor



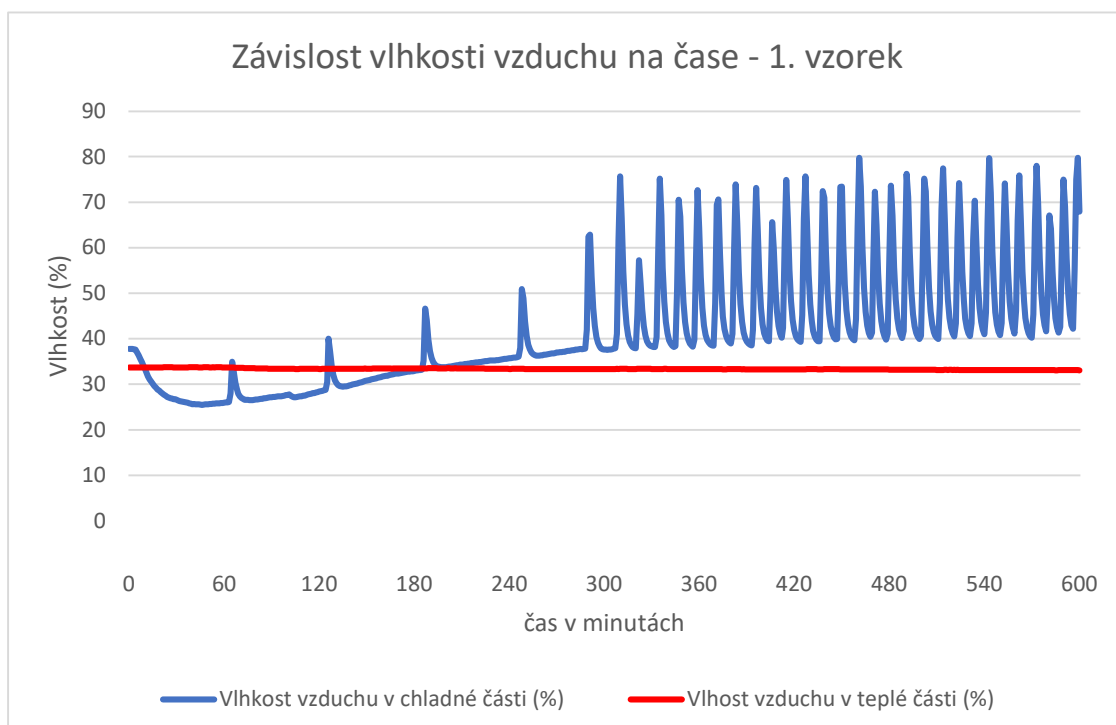
Obrázek 35: Termovizní snímek 1. vzorku

Zdroj: autor



Graf 1: Závislost teploty povrchu na čase - 1. vzorek

Zdroj: autor



Graf 2: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 1. vzorek

Zdroj: autor

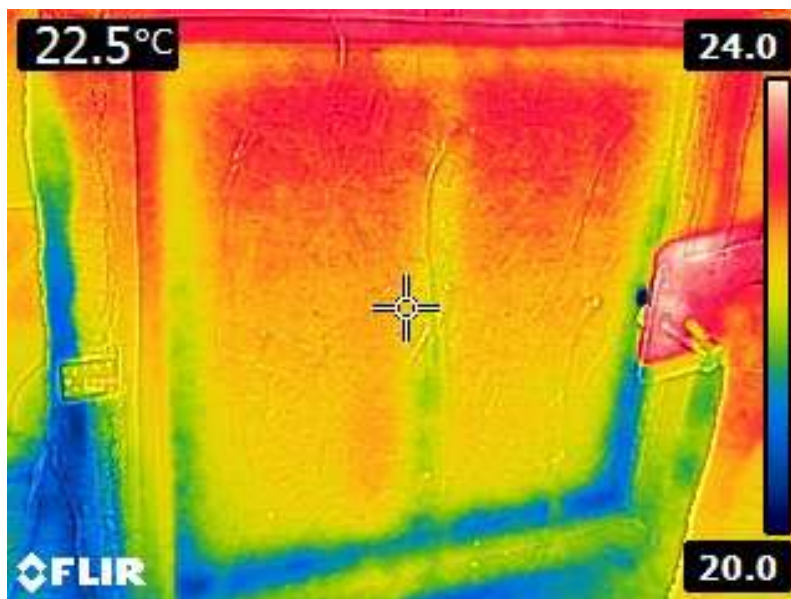
- 2) Sendvičový stěnový panel s výplní minerální vatou 100 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

Průměrný tepelný tok během měření byl $8,69 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$, směrodatná odchylka byla $0,29 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$. Teplota vzduchu v chladné části teplé skříně (t_{ae}) byla průměrně $-12,39 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,33 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hodnota z devíti čidel na povrchu vzorku v chladné části skříně (t_{se}) byla $-11,03 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,31 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota vzduchu v teplé části skříně (t_{ai}) byla průměrně udržována na $23,71 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,06 \text{ }^\circ\text{C}$. Na povrchu teplé části skříně (t_{si}) byla průměrná hodnota $22,72 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,058 \text{ }^\circ\text{C}$. Na základě tří měření byly vypočítány následující hodnoty. Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla (U_t) vyšla na $0,24 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$ se směrodatnou odchylkou $0,007 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$. Tepelný odpor (R_t) byl vypočten na $4,15 \text{ (m}^2\text{.K.W}^{-1}\text{)}$ se směrodatnou odchylkou $0,114 \text{ (m}^2\text{.K.W}^{-1}\text{)}$. Poslední zjištěnou veličinou byl součinitel tepelné vodivosti (λ), který vyšel $0,055 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$ se směrodatnou odchylkou $0,002 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$.

doba (h)	q (W.m ⁻²)	d (m)	A (m ²)	t _{ae} (°C)	t _{se} (°C)	t _{ai} (°C)	t _{si} (°C)	U _t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	R _t (m ² .K.W ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
3 h	8,82	0,23	1	-12,69	-11,33	23,79	22,79	0,242	4,136	0,056
3 h	8,28	0,23	1	-11,90	-10,60	23,73	22,74	0,232	4,307	0,053
3 h	8,98	0,23	1	-12,60	-11,20	23,63	22,65	0,248	4,031	0,057

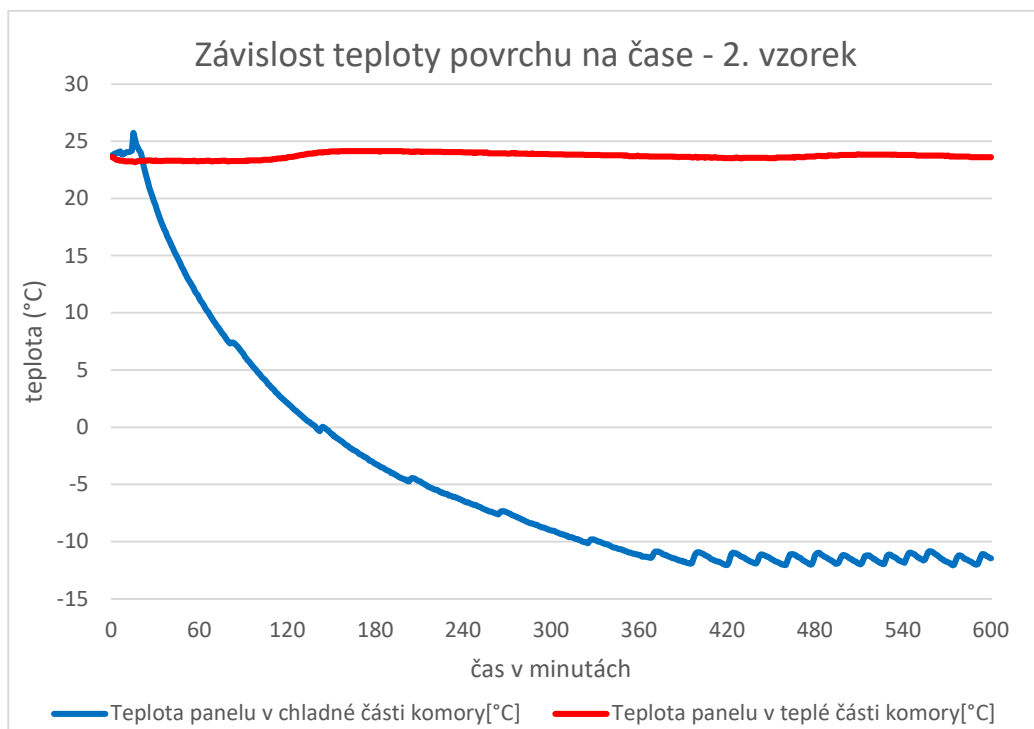
Tabulka 8: Výsledky experimentálního měření - 2. vzorek

Zdroj: autor



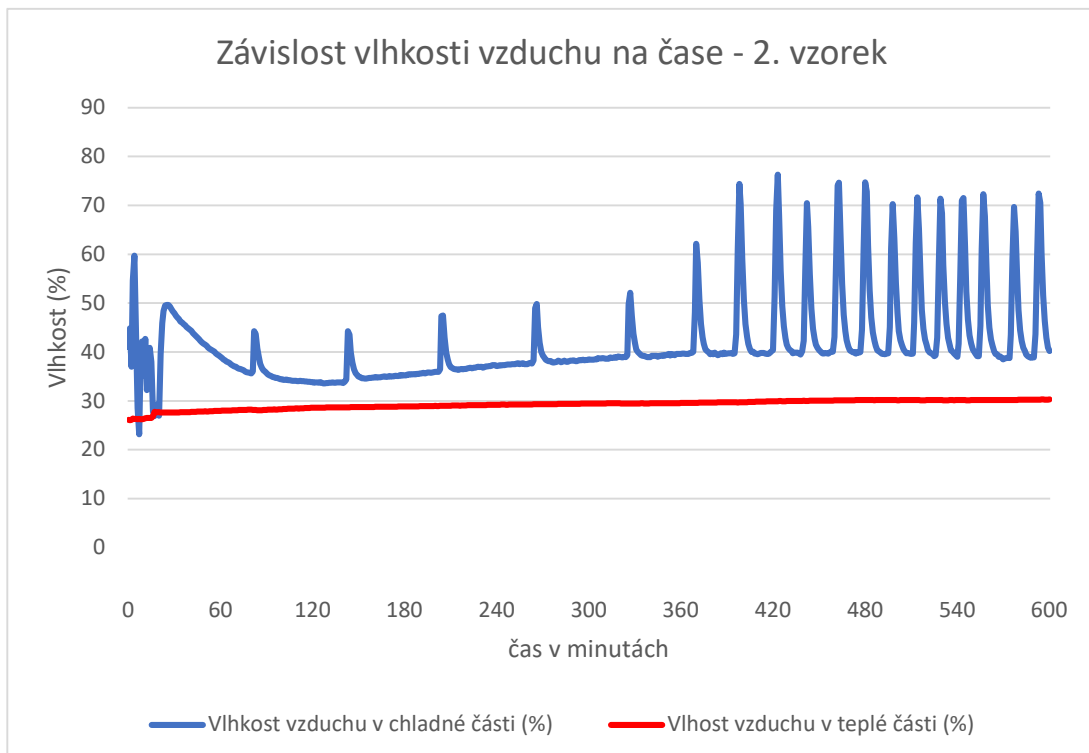
Obrázek 36: Termovizní snímek 2. vzorku

Zdroj: autor



Graf 3: Závislost teploty povrchu na čase - 2. vzorek

Zdroj: autor



Graf 4: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 2. vzorek

Zdroj: autor

3) Sendvičový stěnový panel s výplní měkkou PUR pěnou 160 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

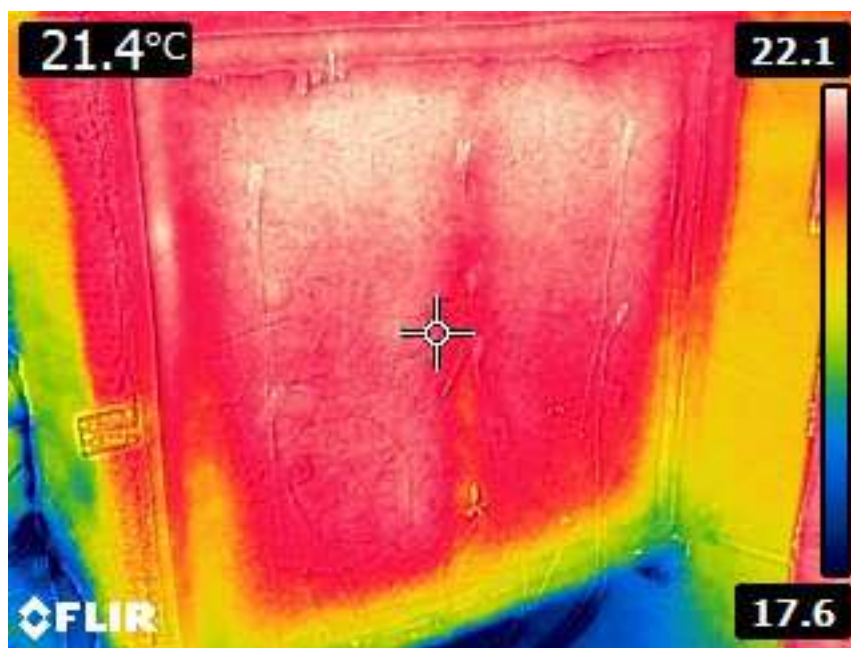
Průměrný tepelný tok během měření byl $8,98 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$, směrodatná odchylka byla $0,31 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$. Teplota vzduchu v chladné části teplé skříně (t_{ae}) byla průměrně $-13,02 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,35 \text{ }^\circ\text{C}$. Průměrná hodnota z devíti čidel na povrchu vzorku v chladné části skříně (t_{se}) byla $-11,98 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,33 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota vzduchu v teplé části skříně (t_{ai}) byla průměrně udržována na $23,45 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Na povrchu teplé části skříně (t_{si}) byla průměrná hodnota $22,41 \text{ }^\circ\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Na základě tří měření byly vypočítány následující hodnoty. Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla (U_t) vyšla na $0,209 \text{ (W.m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$ se směrodatnou odchylkou $0,007 \text{ (W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}\text{)}$. Tepelný odpor (R_t) byl vypočten na $4,064 \text{ (m}^2\text{.K.W}^{-1}\text{)}$ se směrodatnou odchylkou $0,119 \text{ (m}^2\text{.K.W}^{-1}\text{)}$. Poslední

zjištěnou veličinou byl součinitel tepelné vodivosti (λ), který vyšel 0,071 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) se směrodatnou odchylkou 0,002 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

doba (h)	q ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	d (m)	A (m^2)	t _{ae} (°C)	t _{se} (°C)	t _{ai} (°C)	t _{si} (°C)	U _t ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	R _t ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
3 h	8,84	0,29	1	-12,6	-11,60	23,38	22,38	0,246	4,071	0,071
3 h	8,69	0,29	1	-13,0	-12,00	23,55	22,48	0,238	4,206	0,069
3 h	9,43	0,29	1	-13,5	-12,40	23,44	22,39	0,255	3,914	0,074

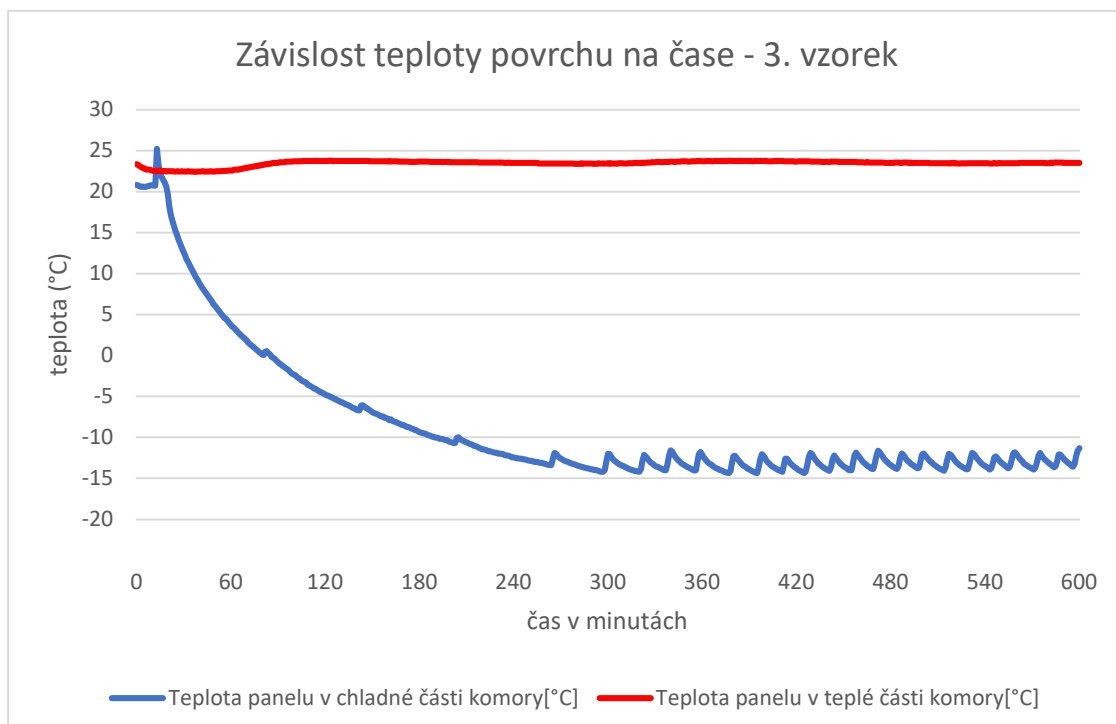
Tabulka 9: Výsledky experimentálního měření - 3. vzorek

Zdroj: autor



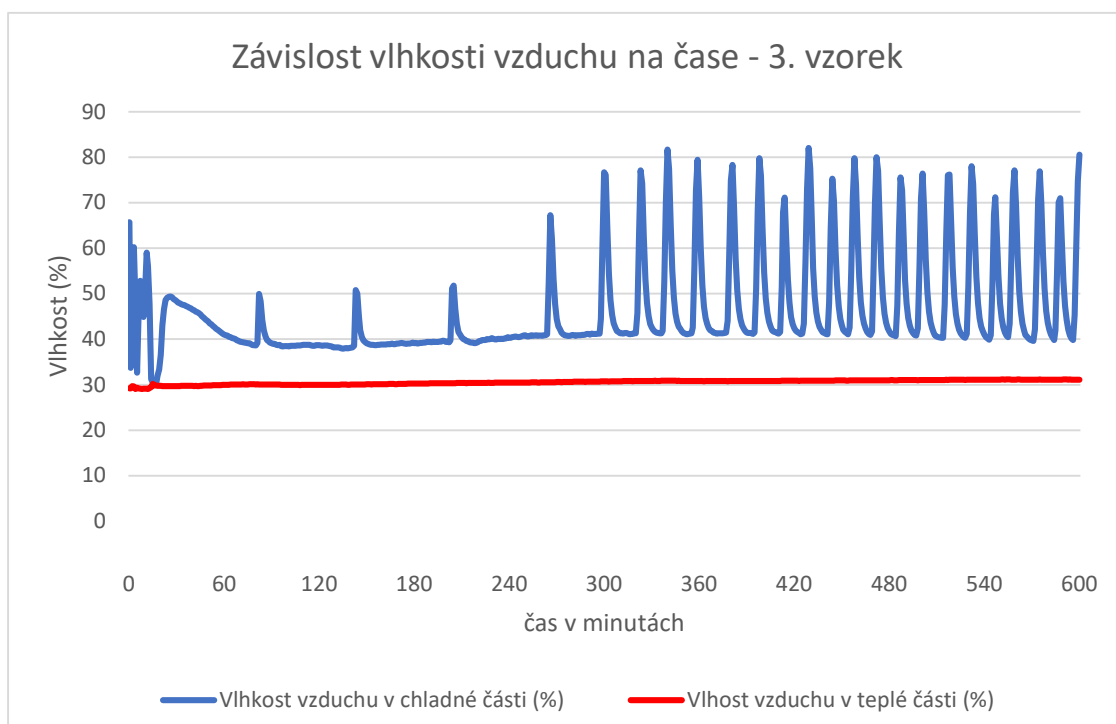
Obrázek 38: Termovizní snímek vzorku číslo 3

Zdroj: autor



Graf 6: Závislost teploty povrchu na čase - 3. vzorek

Zdroj: autor



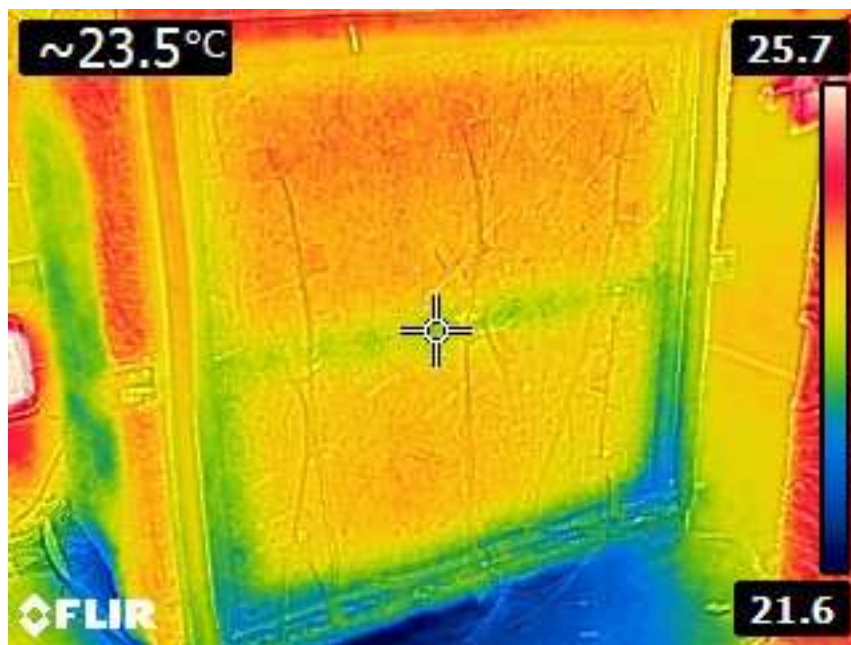
Graf 5: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 3. vzorek

Zdroj: autor

- 4) Sendvičový stěnový panel s výplní tvrdou PUR pěnou 100 mm a venkovním zateplením fasádním polystyrenem 160 mm

Průměrný tepelný tok během měření byl $5,66 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$, směrodatná odchylka byla $0,18 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$. Teplota vzduchu v chladné části teplé skříně (t_{ae}) byla

průměrně $-12,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrná hodnota z devíti čidel na povrchu vzorku v chladné části skříně (t_{se}) byla $-11,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,102\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota vzduchu v teplé části skříně (t_{ai}) byla průměrně udržována na $22,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,128\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na povrchu teplé části skříně (t_{si}) byla průměrná hodnota $22,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ se směrodatnou odchylkou $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základě tří měření byly vypočítány následující hodnoty. Průměrná hodnota součinitele prostupu tepla (U_t) vyšla na $0,16\text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ se směrodatnou odchylkou $0,006\text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$. Tepelný odpor (R_t) byl vypočten na $6,24\text{ (m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1})$ se směrodatnou odchylkou $0,232\text{ (m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1})$. Poslední zjištěnou veličinou byl součinitel tepelné vodivosti (λ), který vyšel $0,037\text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ se směrodatnou odchylkou $0,001\text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$.



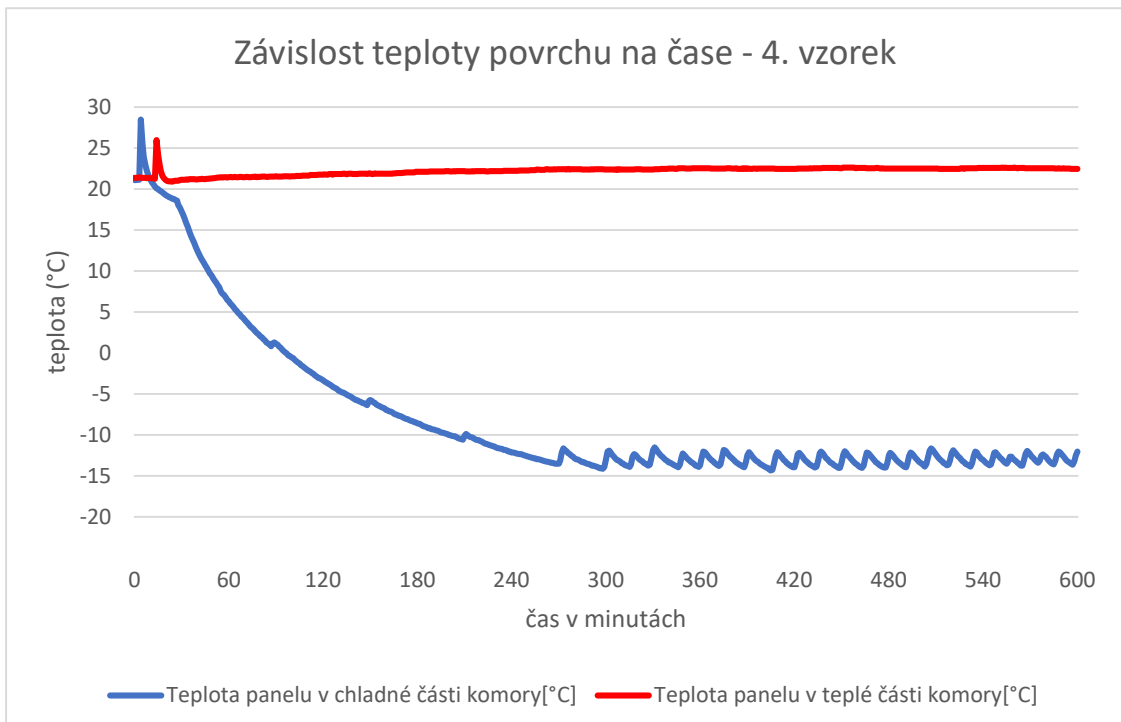
Obrázek 39: Termovizní snímek 4. vzorku

Zdroj: autor

doba (h)	q (W. m ⁻²)	d (m)	A (m ²)	t _{ae} (°C)	t _{se} (°C)	t _{ai} (°C)	t _{si} (°C)	U _t (W.m ⁻² .K ⁻¹)	R _t (m ² .K. W ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
3 h	5,91	0,23	1	-12,3	-11,1	22,87	22,15	0,168	5,954	0,039
3 h	5,61	0,23	1	-12,3	-11,1	22,91	22,16	0,160	6,267	0,037
3 h	5,46	0,23	1	-12,4	-11,3	23,16	22,41	0,153	6,520	0,035

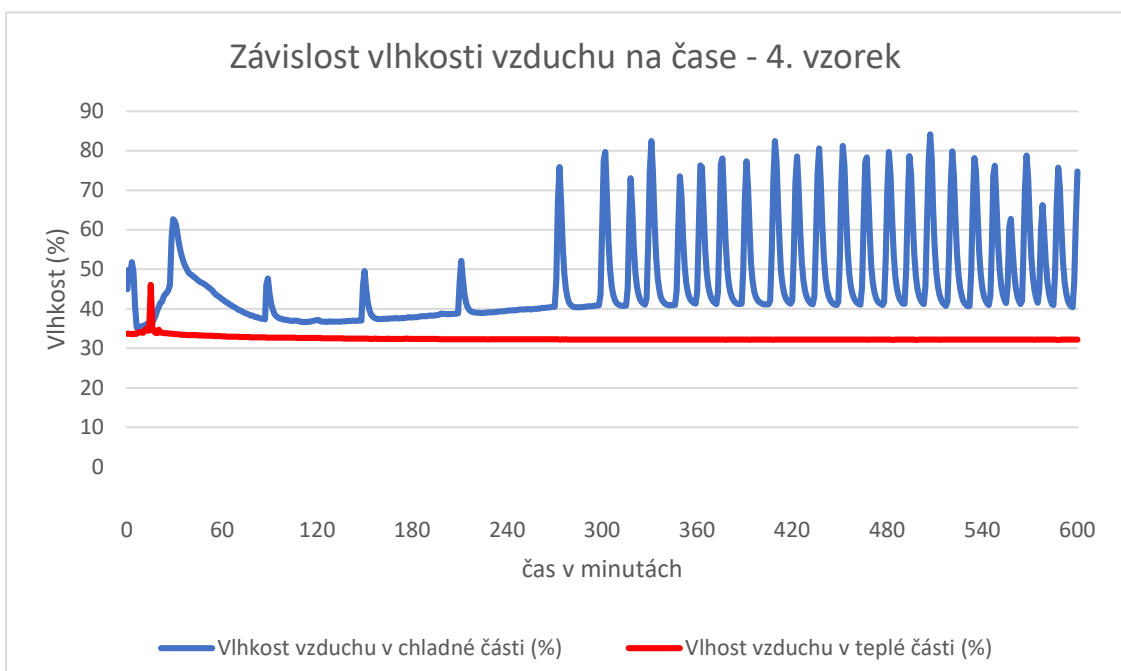
Tabulka 10: Výsledky experimentálního měření - 4. vzorek

Zdroj: autor



Graf 7: Závislost teploty povrchu na čase - 4. vzorek

Zdroj: autor



Graf 8: Závislost vlhkosti vzduchu na čase - 4. vzorek

Zdroj: autor

	Q (W.m ⁻²)	U_t (W.m ⁻² K ⁻¹)	R_t (m ² .K.W ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Vzorek 1	7,513	0,209	4,775	0,048
Vzorek 2	8,693	0,241	4,158	0,055
Vzorek 3	8,987	0,246	4,064	0,071
Vzorek 4	5,660	0,160	6,247	0,037

Tabulka 11: Souhrn výsledků všech vzorků

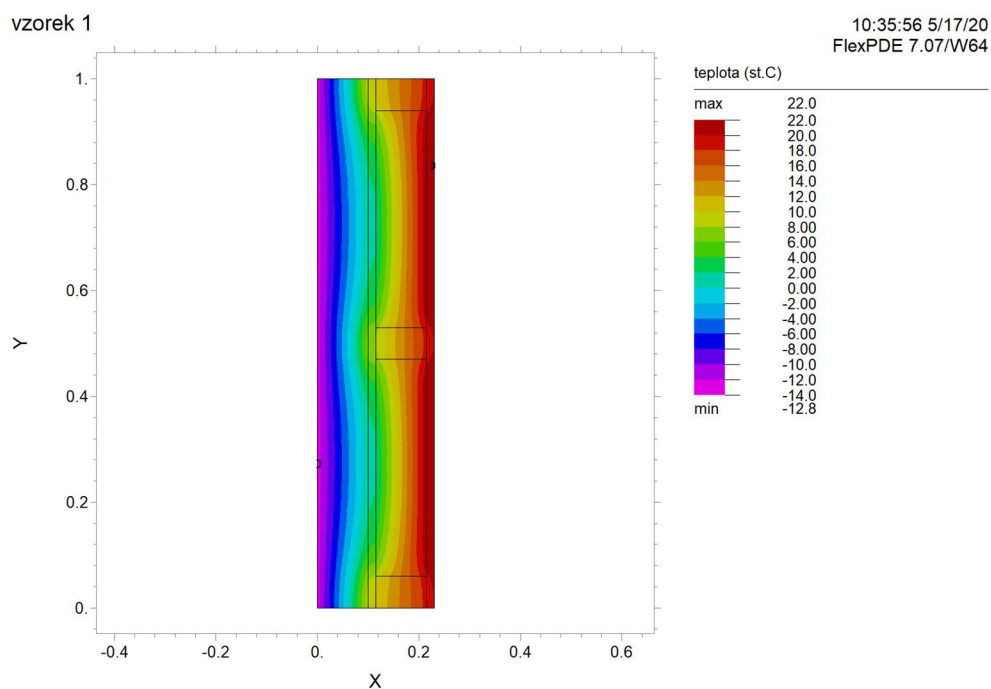
Zdroj: autor

Z uvedeného měření tedy vyplývá, že všechny vzorky s rezervou splňují požadované hodnoty součinitele prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2 z roku 2011, která řeší problematiku tepelné ochrany budov. Nejhorší hodnoty prostupu tepla při experimentálním měření teplou skříní vykázal vzorek číslo 3, který byl složen z 160 mm silné konstrukce z KVH hranolů vyplněné měkkou PUR pěnou z venkovní strany opláštěné fasádní minerální vatou. Podobných hodnot dosáhl vzorek číslo 2, který byl složen z nosné konstrukce o síle 100 mm vyplněné minerální vatou, venkovní strana byla opláštěna opět minerální vatou síly 100 mm. Přibližně o 15 % lepšího výsledku dosáhl vzorek číslo 1, který byl složen z nosné konstrukce o síle 100 mm vyplněné tvrdou PUR pěnou a z venkovní strany opláštěn minerální vatou o síle 100 mm. Tento vzorek při tomto praktickém měření splnil doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla dle normy pro nízkoenergetický dům. Nejlepší výsledek byl naměřen u vzorku číslo 4, který splňuje normu pro pasivní dům. Vzorek byl složen z vnitřní izolace 100 mm tvrdé PUR pěny a 160 mm fasádního polystyrenu.

5.2 Výsledky teoretického výpočtu metodou konečných prvků – stacionární podmínky

V této kapitole jsou zhodnoceny výsledky teoretického výpočtu metodou konečných prvků za stacionárních podmínek, kde se sleduje výsledek, který nastane po ustálení všech měřených veličin.

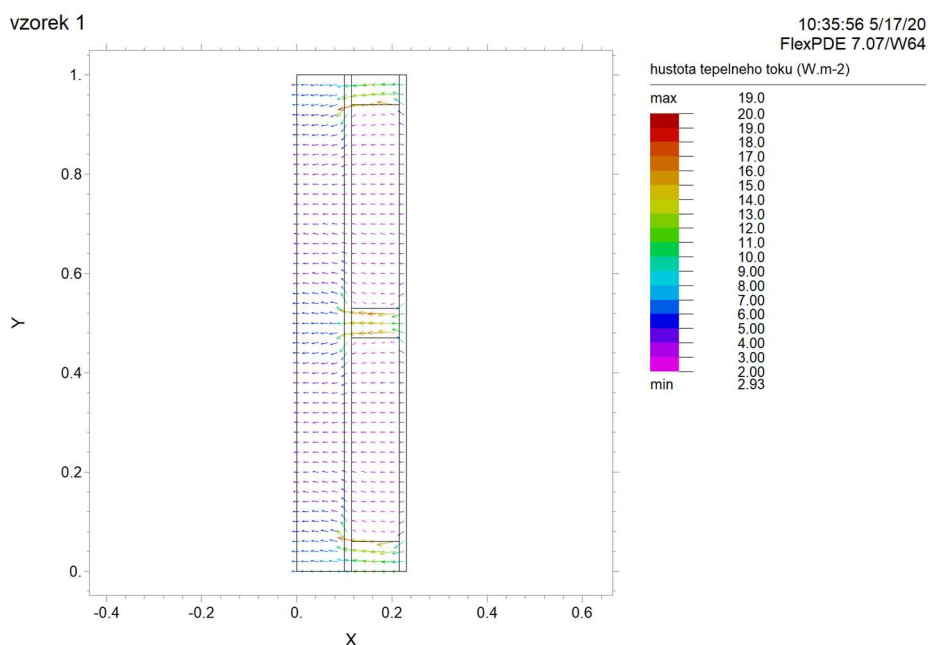
- 1) Sendvičový stěnový panel s výplní tvrdou PUR pěnou 100 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm



Graf 9: Rozložení teplot – 1. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 9 zobrazuje rozložení teplot na řezu vzorkem. Při okrajových podmínkách odpovídajících praktickému pokusu měření teplotou skříní. Graf dobře znázorňuje, že teploty velmi ovlivňuje nosná dřevěná konstrukce, která částečně působí jako tepelný most.

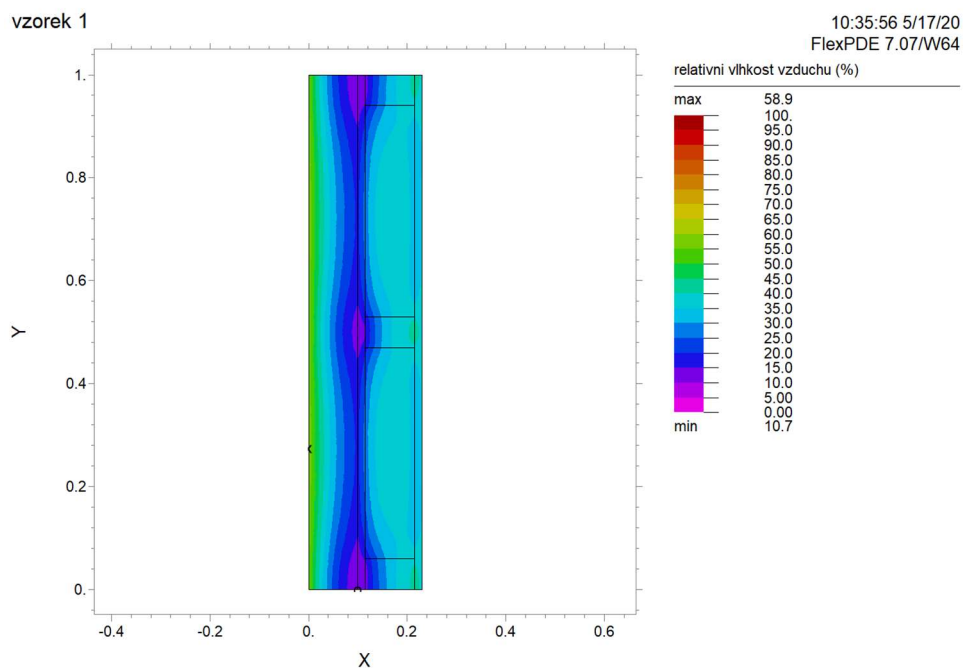


Graf 10: Hustota tepelného toku - 1. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 10 znázorňuje hustotu tepelného toku ve stěnovém panelu. I tento graf jasně ukazuje na místa, kde se teplo znatelněji šíří do chladnější exteriérové části panelu. Jsou to opět místa, kde je nosná dřevěná konstrukce.

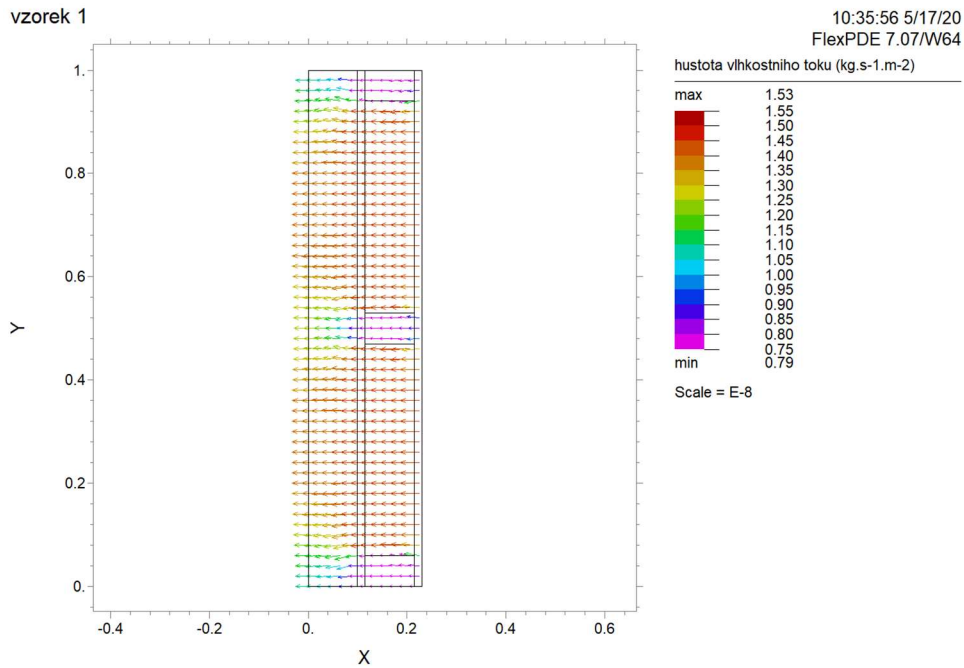
Zatímco v nejlépe izolované části stěny, která je složena pouze z izolačních materiálů, je hustota tepelného toku cca 3 W.m^{-2} , tak v místech, kde je nosná konstrukce, se tato hodnota zvedá až na 17 W.m^{-2} . Průměrná hodnota hustoty tepelného toku dle výpočtu je 5.92 W.m^{-2} . V praktickém měření byl tento výsledek o zhruba 25 % větší, což je pravděpodobně způsobeno nepřesnostmi v měření a nedokonalostmi v provedení vzorku a jeho utěsnění v komoře. Součinitel prostupu tepla dle výpočtu vychází na $0,16 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$, kdežto při praktickém měření vyšla tato hodnota vyšší opět o 25 %.



Graf 11: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 1. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 11 zobrazuje rozložení vlhkosti při řezu vzorkem při okrajových podmínkách, které odpovídají praktickému pokusu měření teplou skříní. Na grafu je zřetelné, že dřevěná nosná konstrukce velmi ovlivňuje vlhkost. Uvedený vzorek vykazuje nejmenší relativní vlhkost v místech vnější části dřevěné konstrukce (11 %). Na vnitřním povrchu stěny je vlhkost přibližně 40 %, na vnějším povrchu stěny je vlhkost 59 %.



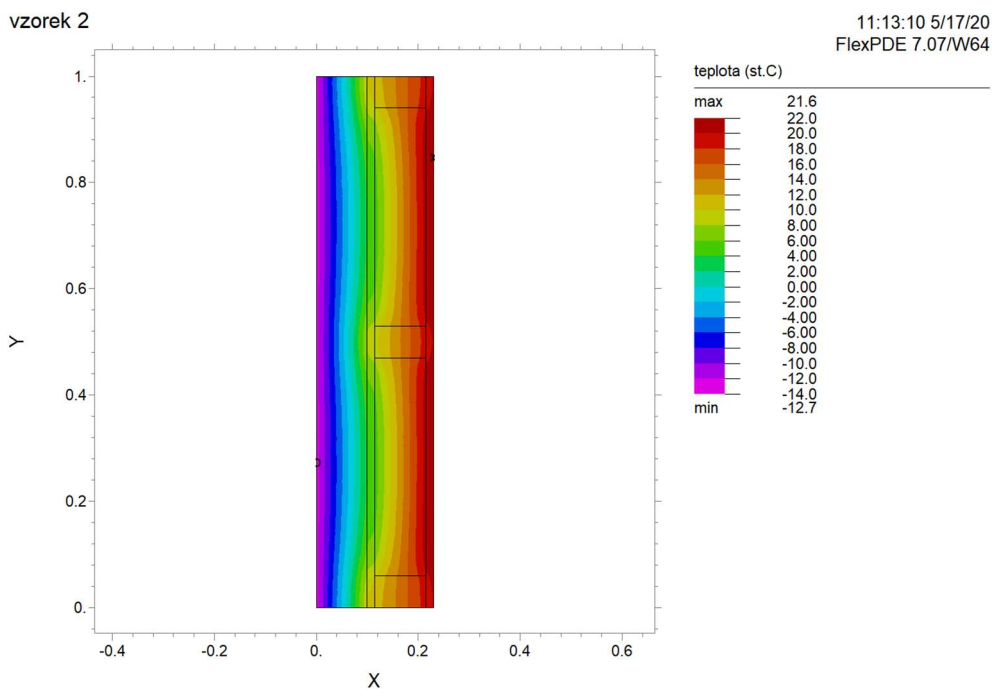
Graf 12: Hustota vlhkostního toku - 1. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 12 popisuje hustotu vlhkostního toku stěnovým panelem. Vypočtené hodnoty odpovídají předchozímu grafu, neboť vlhkostní tok je v místě nosné konstrukce pomalejší ($0,8 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) a v prostorech mezi konstrukcemi je vlhkostní tok nejvyšší ($1,5 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Celková hustota vlhkostního toku celým panelem je $1,37 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Součinitel prostupu vodní páry je celkem $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ s.m}^{-1}$.

2) Sendvičový stěnový panel s výplní minerální vatou 100 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

vzorek 2

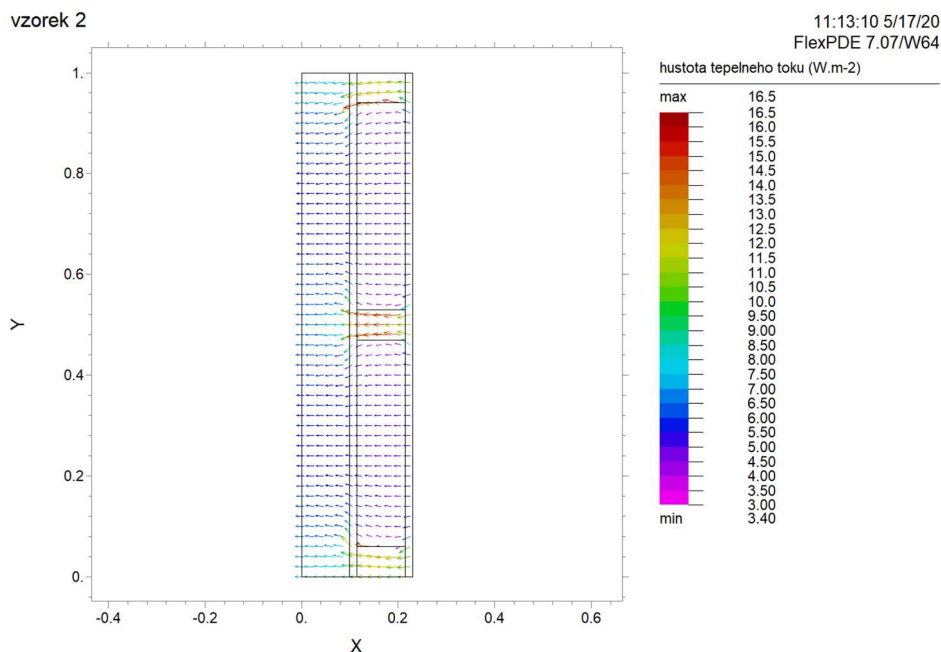


Graf 13: Rozložení teplot - 2. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 13 zobrazuje rozložení teplot na řezu vzorkem. Při okrajových podmínkách odpovídajících praktickému pokusu měření teplotou skříní. Z grafu je dobře vidět, že teploty velmi ovlivňuje nosná dřevěná konstrukce, která částečně působí jako tepelný most.

vzorek 2

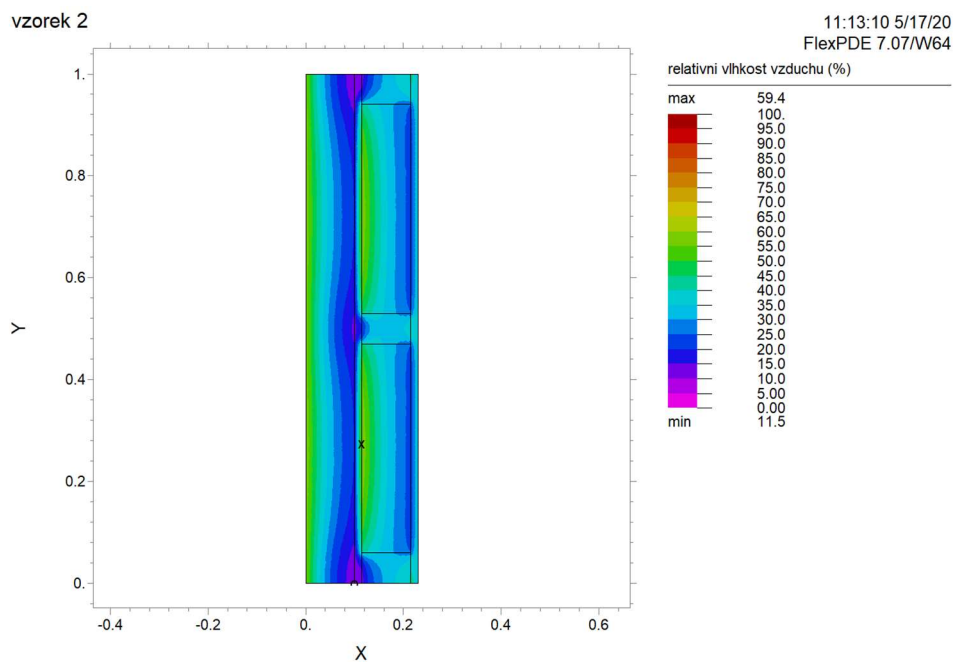


Graf 14: Hustota tepelného toku - 2. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 14 znázorňuje hustotu tepelného toku ve stěnovém panelu. I tento graf jasně ukazuje na místa, kde se teplo ztelněji šíří do chladnější exteriérové části panelu. Jsou to opět místa, kde je nosná dřevěná konstrukce.

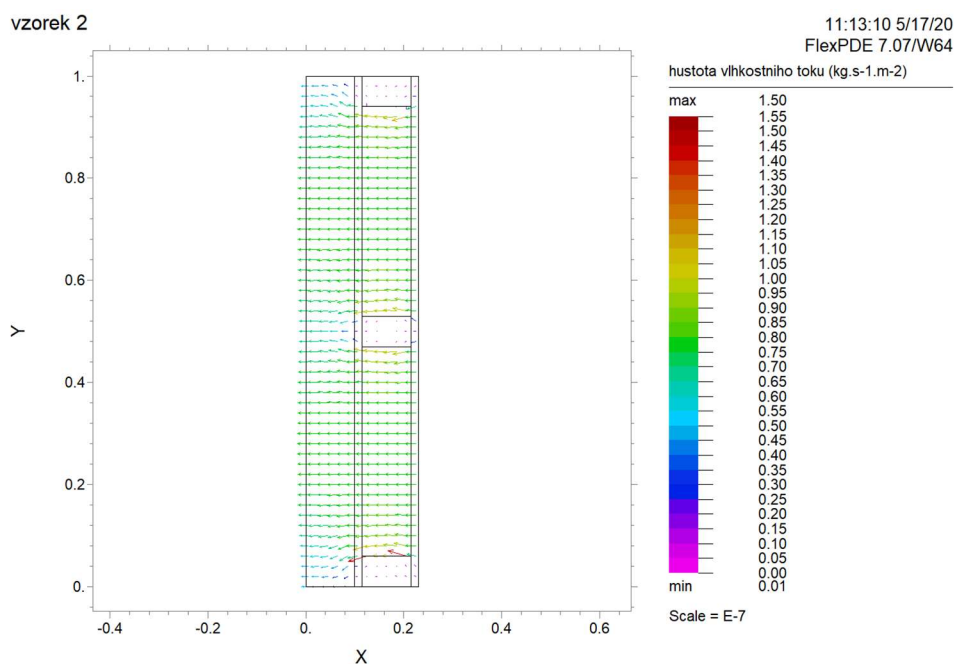
Zatímco v nejlépe izolované části stěny, která je složena pouze z minerální vaty a OSB desek, je hustota tepelného toku cca 4 W.m^{-2} , tak v místech, kde je nosná konstrukce, se tato hodnota zvedá až na 16 W.m^{-2} . Průměrná hodnota hustoty tepelného toku dle výpočtu je 6.75 W.m^{-2} . V praktickém měření byl tento výsledek o zhruba 25 % větší, což je pravděpodobně způsobeno nepřesnostmi v měření a nedokonalostmi v provedení vzorku a jeho utěsnění v komoře. Součinitel prostupu tepla dle výpočtu vychází na $0,187 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$, kdežto při praktickém měření vyšla tato hodnota vyšší o 28 %.



Graf 15: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 2. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 15 zobrazuje rozložení vlhkosti při řezu vzorkem, při okrajových podmínkách, které odpovídají praktickému pokusu měření teplou skříní. Na grafu je zřetelné, že dřevěná nosná konstrukce velmi ovlivňuje vlhkost. Uvedený vzorek vykazuje nejmenší relativní vlhkost v místech vnější části dřevěné konstrukce (11 %). Tento vzorek vykazuje o 25 % vyšší vlhkost při přestupu mezi vnitřní izolací a OSB deskou než předchozí vzorek číslo 1. Na vnitřním povrchu stěny je vlhkost přibližně 25 %, na vnějším povrchu stěny je vlhkost 60 %.



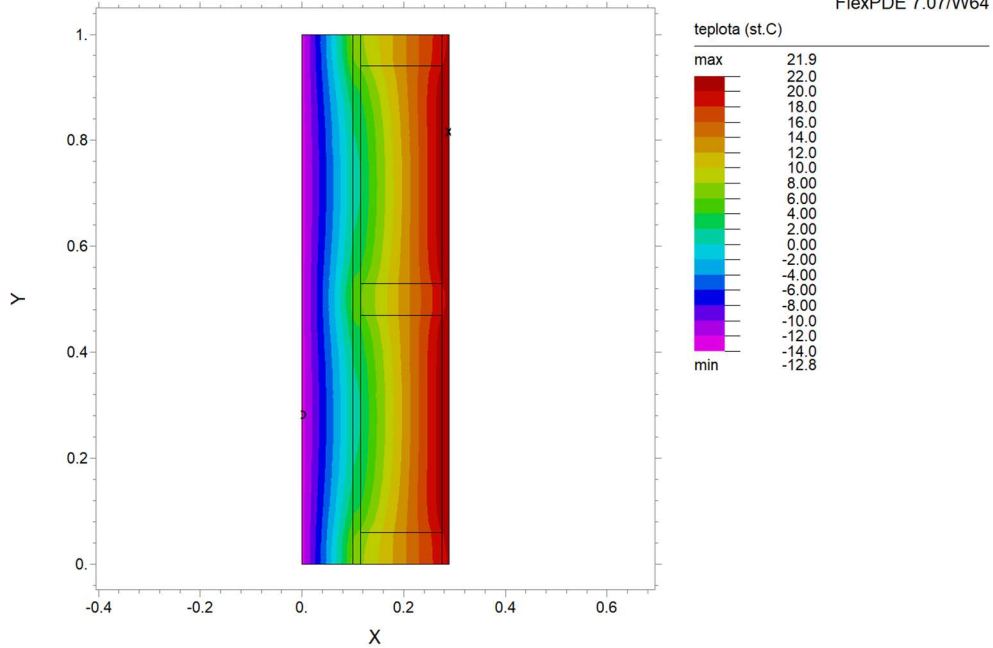
Graf 16: Hustota vlhkostního toku - 2. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 16 popisuje hustotu vlhkostního toku ve stěnovém panelu. Vypočtené hodnoty odpovídají předchozímu grafu, neboť vlhkostní tok je v místě nosné konstrukce pomalejší ($0,5 \cdot 10^{-7} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) a v prostorech mezi konstrukcemi je vlhkostní tok nejvyšší ($0,8 \cdot 10^{-7} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Celková hustota vlhkostního toku celým panelem je $7,37 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Součinitel prostupu vodní páry je celkem $9,12 \cdot 10^{-11} \text{ s.m}^{-1}$. Vzorek číslo 2 byl tedy 8x propustnější pro vodní páru než vzorek číslo 1.

- 3) Sendvičový stěnový panel s výplní měkkou PUR pěnou 160 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

Vzorek 3

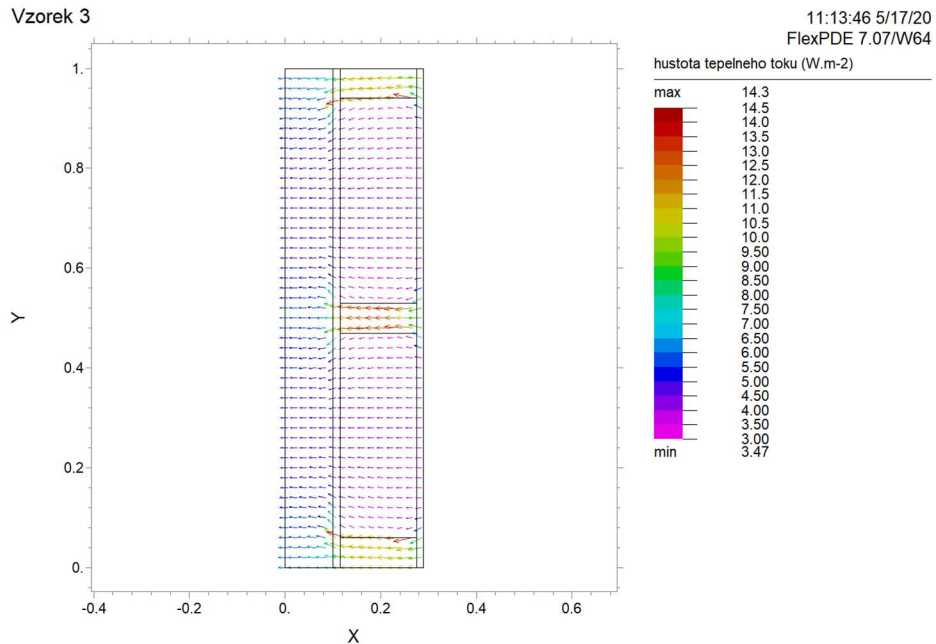


Graf 17: Rozložení teplot - 3. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 17 zobrazuje rozložení teplot na řezu vzorkem. Při okrajových podmínkách odpovídajících praktickému pokusu měření teplotou skříní. Z grafu je dobře vidět, že teploty velmi ovlivňuje nosná dřevěná konstrukce, která částečně působí jako tepelný most. Nosná konstrukce je u tohoto vzorku o 60 % silnější, dřevěné hranoly tak propustí méně tepla na interiérovou stranu než předchozí vzorky.

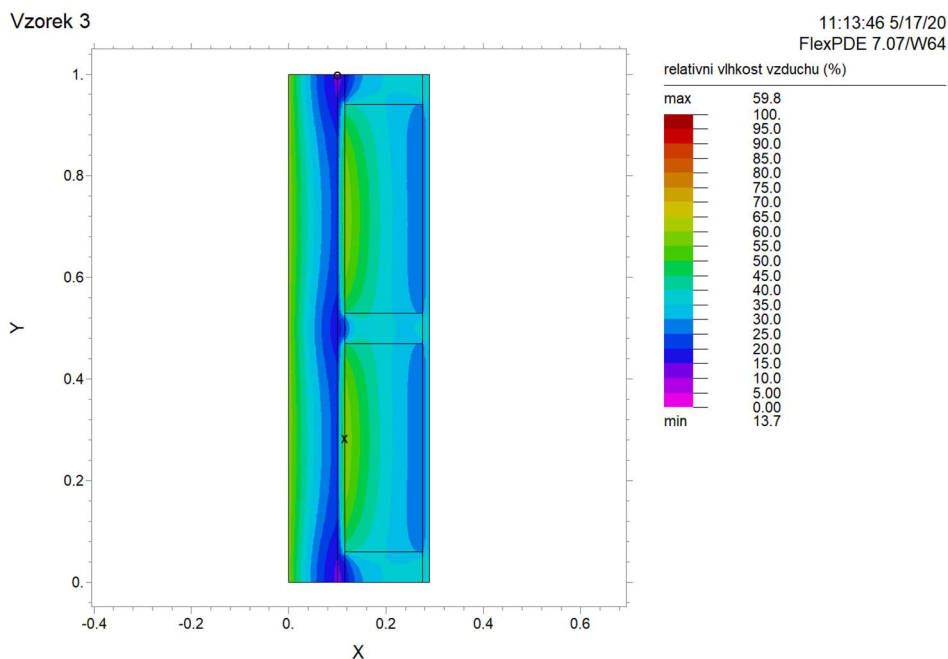
Vzorek 3



Graf 18: Hustota tepelného toku - 3. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 18 znázorňuje hustotu tepelného toku stěnovým panelem. I tento graf jasně ukazuje na místa, kde se teplo znatelněji šíří do chladnější exteriérové části panelu. Jsou to opět místa, kde je nosná dřevěná konstrukce. V nejlépe izolované části stěny, která je složena pouze z izolačních materiálů, tedy měkké PUR pěny a fasádní vaty je hustota tepelného toku cca $3,5 \text{ W.m}^{-2}$. V místech, kde je nosná konstrukce, je tato hodnota 13 W.m^{-2} , což dokazuje, že dřevěná konstrukce u tohoto vzorku propustí méně tepla než u předchozích vzorků. Průměrná hodnota hustoty tepelného toku dle výpočtu je $5,69 \text{ W.m}^{-2}$. V praktickém měření byl tento výsledek o přibližně 57 % větší, což je výrazně větší rozdíl než u předchozích vzorků. Tento rozdíl byl nejspíše způsoben chybou v utěsnění vzorku v topné komoře. Součinitel prostupu tepla dle výpočtu vychází na $0,158 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Při praktickém měření vyšla tato hodnota vyšší o 55 %. To opět poukazuje na chybu v praktickém měření.

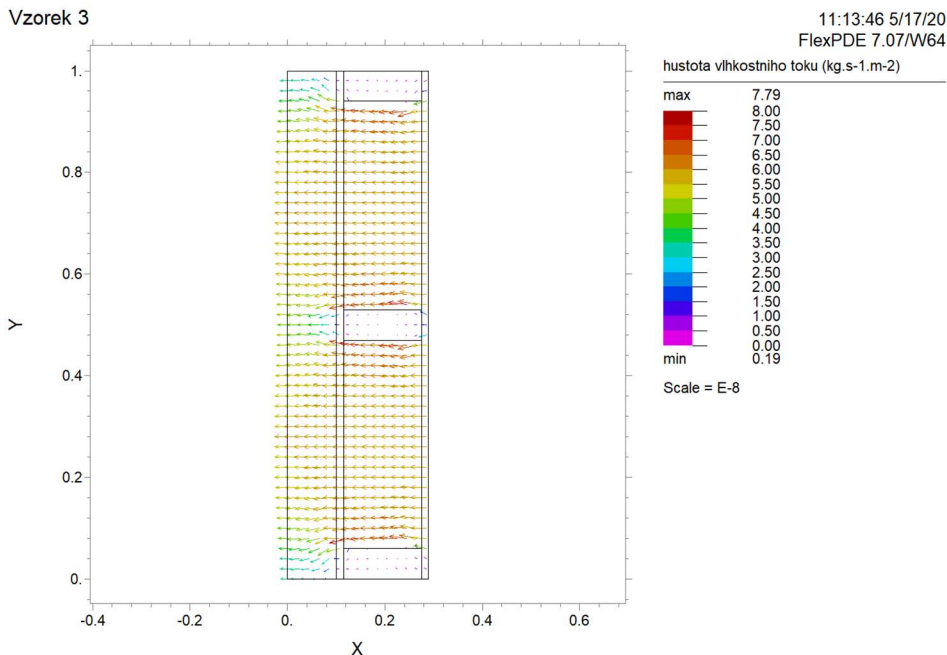


Graf 19: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 3. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 19 zobrazuje rozložení vlhkosti při řezu vzorkem při okrajových podmínkách, které odpovídají praktickému pokusu měření teplou skříní. Na grafu je zřetelné, že dřevěná nosná konstrukce velmi ovlivňuje vlhkost. Uvedený vzorek vykazuje mírně vyšší vlhkost u konstrukčních hranolů než předchozí vzorky (15 – 20 %). Na vnitřním povrchu stěny je vlhkost přibližně 40 %, na vnějším povrchu stěny je vlhkost 55 %.

Vzorek 3



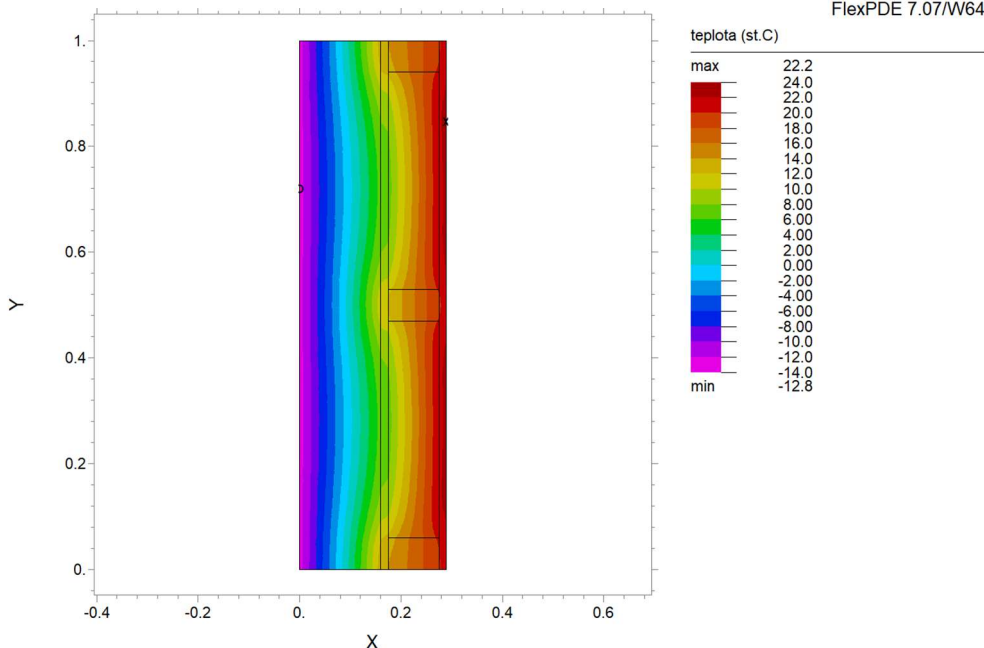
Graf 20: Hustota vlhkostního toku - 3. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 20 popisuje hustotu vlhkostního toku ve stěnovém panelu. Vlhkostní tok je v místě nosné konstrukce pomalejší ($0,5 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) a v prostorech mezi konstrukcí je vlhkostní tok nejvyšší ($6 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Celková hustota vlhkostního toku celým panelem je $5,52 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Součinitel prostupu vodní páry je celkem $6,84 \cdot 10^{-11} \text{ s.m}^{-1}$. Tento vzorek je tedy pro vlhkost výrazně více propustný než vzorek číslo 1, ale má mírně menší propustnost než vzorek číslo 2.

- 4) Sendvičový stěnový panel s výplní tvrdou PUR pěnou 100 mm a venkovním zateplením fasádním polystyrenem 160 mm

Vzorek 4

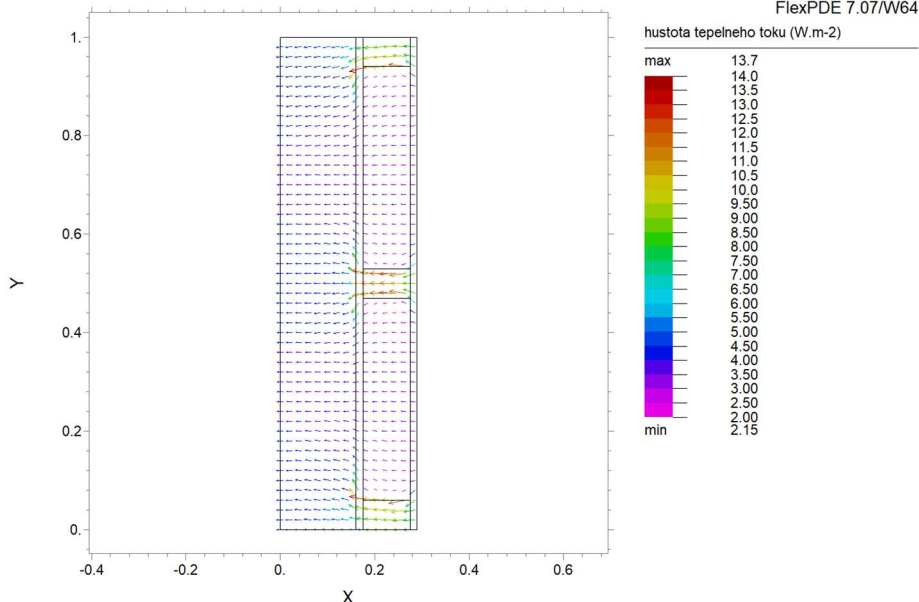


Graf 21: Rozložení teplot - 4. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 21 zobrazuje rozložení teplot na řezu vzorkem. Při okrajových podmínkách odpovídajících praktickému pokusu měření teplotou skříní. Teplota se v silnější fasádní izolaci (polystyren 160 mm) rozkládá pozvolněji. Nosná konstrukce opět propouští teplo více než izolace ve stěně.

Vzorek 4

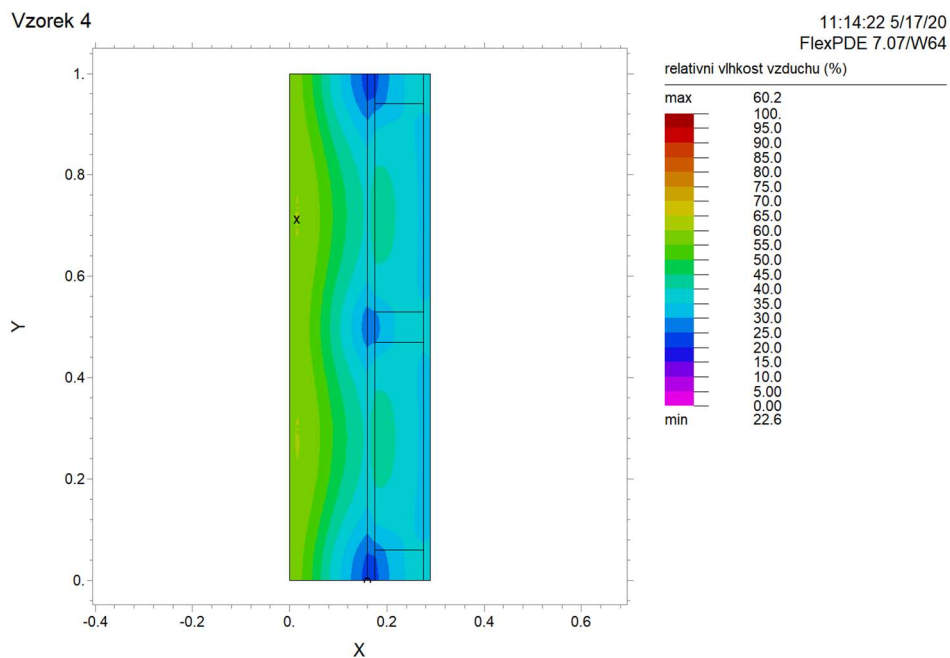


Graf 22: Hustota tepelného toku - 4. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 22 znázorňuje hustotu tepelného toku ve stěnovém panelu. I tento graf jasně ukazuje na místa, kde se teplo ztelněji šíří do chladnější exteriérové části panelu. Jsou to opět místa, kde je nosná dřevěná konstrukce.

V částech stěny, která je složena pouze z izolačních materiálů tedy tvrdé PUR pěny a fasádního polystyrenu, je hustota tepelného toku cca $3,5 \text{ W.m}^{-2}$. V místech, kde je nosná konstrukce, je hustota tepelného toku 13 W.m^{-2} . Průměrná hodnota hustoty tepelného toku dle výpočtu je $4,3 \text{ W.m}^{-2}$. V praktickém měření byl tento výsledek o zhruba 30 % větší, což je pravděpodobně způsobeno nepřesnostmi v měření a nedokonalostmi v provedení vzorku a jeho utěsnění v komoře. Součinitel prostupu tepla dle výpočtu vychází na $0,12 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Při praktickém měření vyšla tato hodnota

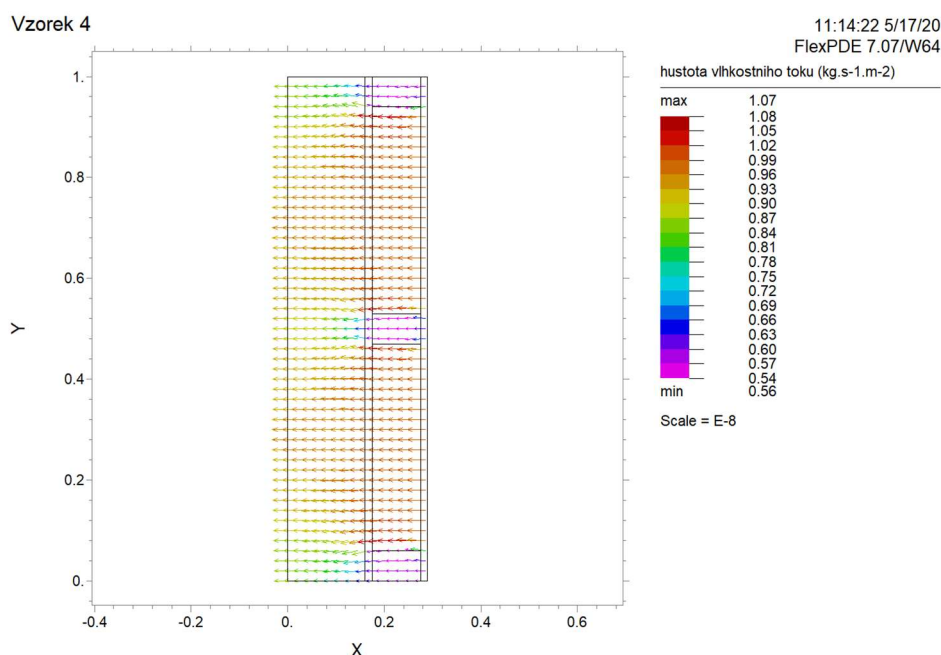


Graf 23: Rozložení relativní vlhkosti vzduchu - 4. vzorek

Zdroj: autor

vyšší opět o 30 %.

Graf číslo 23 zobrazuje rozložení vlhkosti při řezu vzorkem při okrajových podmínkách, které odpovídají praktickému pokusu měření teplou skříní. Na grafu je zřetelné, že dřevěná nosná konstrukce velmi ovlivňuje vlhkost. Uvedený vzorek vykazuje nejmenší relativní vlhkost v místech vnější části dřevěné konstrukce (20 %). Na vnitřním povrchu stěny je vlhkost přibližně 35 %, na vnějším povrchu stěny je vlhkost 60 %.



Graf 24: Hustota vlhkostního toku - 4. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 24 popisuje hustotu vlhkostního toku ve stěnovém panelu. Vypočtené hodnoty odpovídají předchozímu grafu, neboť vlhkostní tok je v místě nosné konstrukce pomalejší ($0,5 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) a v prostorech mezi konstrukcemi je vlhkostní tok rychlejší ($1,05 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Celková hustota vlhkostního toku celým panelem je $9,48 \cdot 10^{-9} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, což je řádově menší hodnota než u všech ostatních vzorků, je to způsobeno propustností fasádního polystyrenu. Součinitel prostupu vodní páry je celkem $1,17 \cdot 10^{-11} \text{ s.m}^{-1}$.

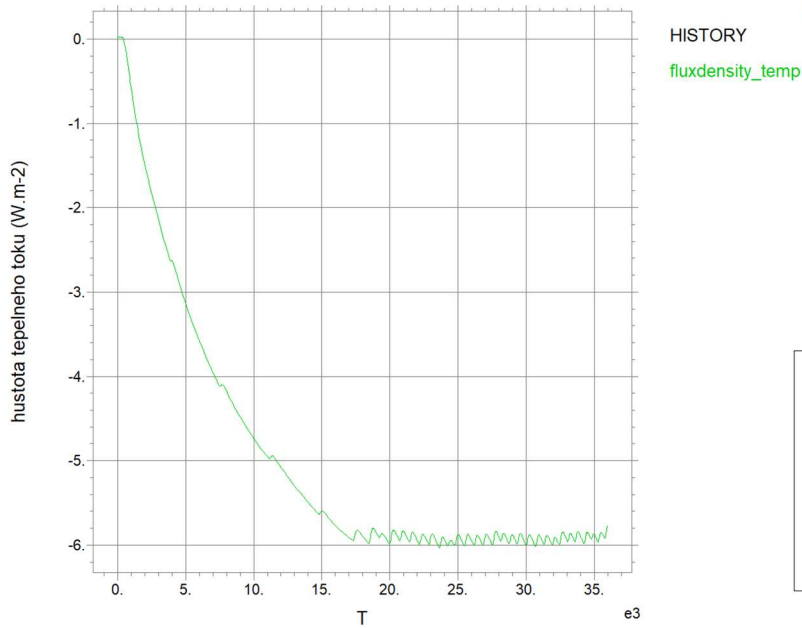
5.3 Výsledky teoretického výpočtu metodou konečných prvků – nestacionární podmínky

Tato kapitola vyhodnocuje výsledky teoretického výpočtu metodou konečných prvků nestacionární metodou, kde se sleduje výsledek v časovém období. V tomto případě bylo sledováno prvních 10 hodin pokusu.

- 1) Sendvičový stěnový panel s výplní tvrdou PUR pěnou 100 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

vzorek 1

11:15:05 5/17/20
FlexPDE 7.07/W64



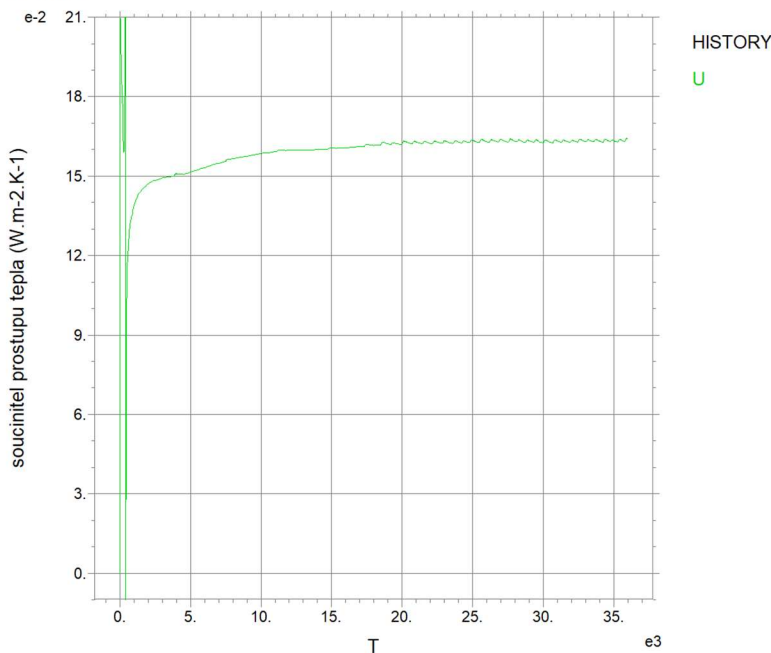
Graf 25: Závislost hustoty tepelného toku na času – 1. vzorek

Zdroj: autor

Dle grafu číslo 25 se hustota tepelného toku z počáteční nulové hodnoty postupně rovnoměrně zvětšovala až na hodnotu 6 W.m^{-2} . Této hodnoty bylo dosaženo přibližně po pěti hodinách od začátku měření. V dalším průběhu pokusu byla hustota tepelného toku již ustálena a odpovídala hustotě tepelného toku za stacionárních podmínek.

vzorek 1

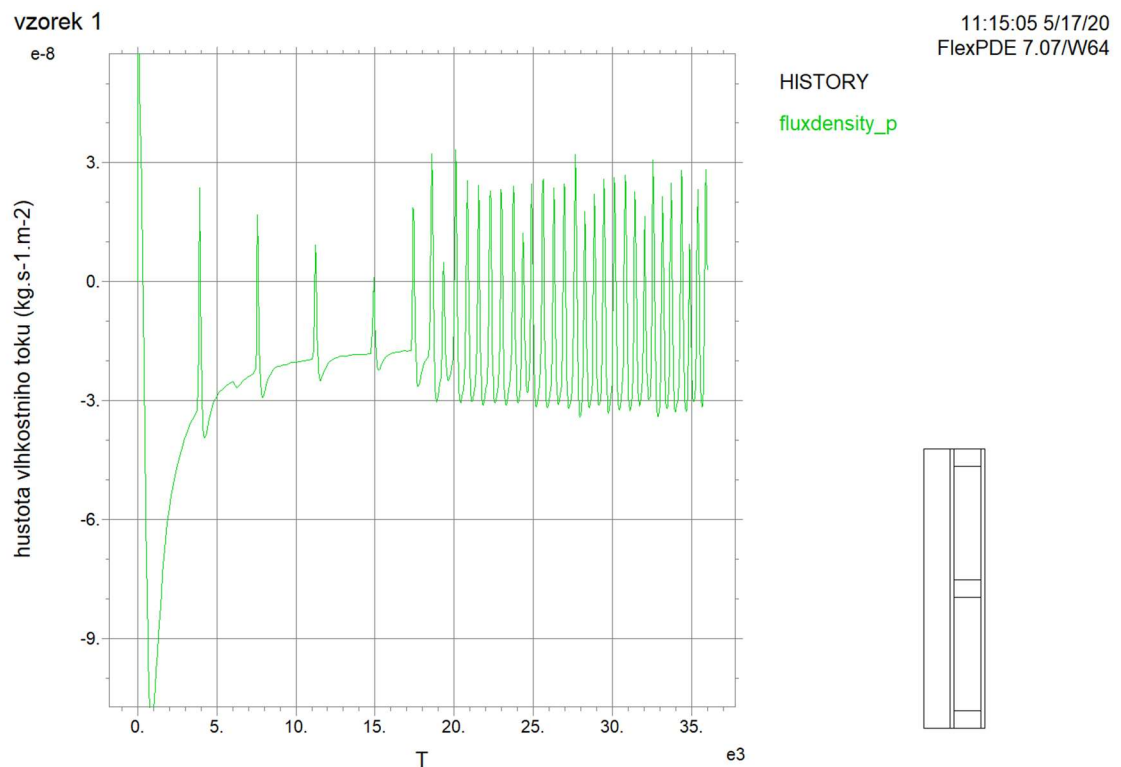
11:15:05 5/17/20
FlexPDE 7.07/W64



Graf 26: Závislost součinitele prostupu tepla na času - 1. vzorek

Zdroj: autor

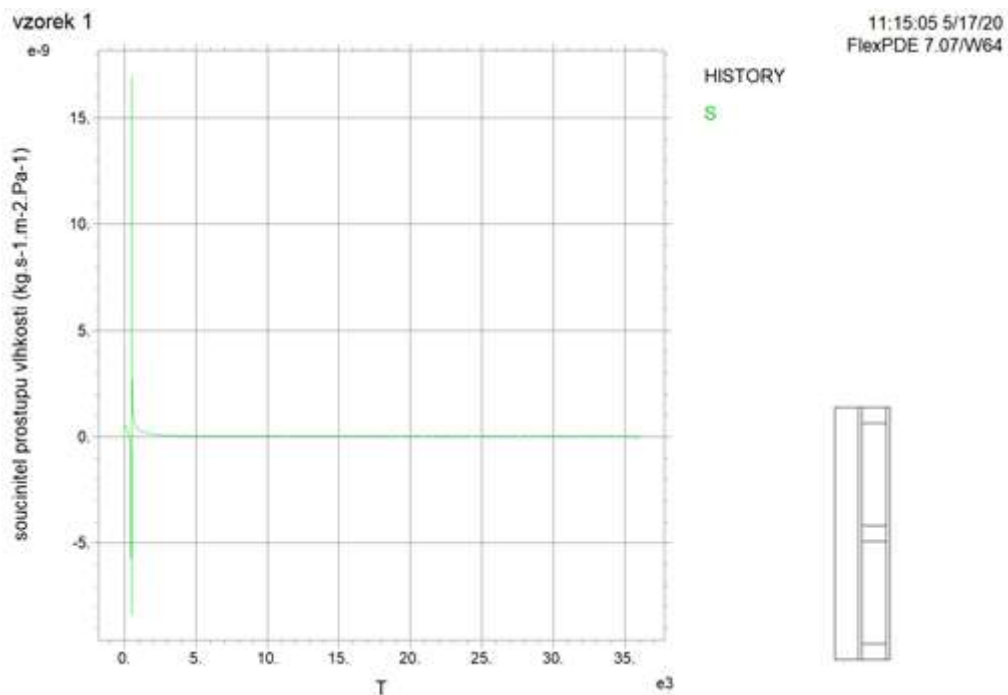
Graf číslo 26 znázorňuje průběh hodnoty součinitele prostupu tepla. Hodnota začíná na $0,12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a po pěti a půl hodinách se ustálí na hodnotě $0,15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, což opět odpovídá hodnotě stacionárního výpočtu.



Graf 27: Závislost hustoty vlhkostního toku na času - 1. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 27 znázorňuje, že vlhkostní tok se v těchto teoretických podmínkách nikdy zcela neustálí. Již po hodině se směr vlhkostního toku obrací a vlhkost začíná střídavě proudit do a z panelu rychlostí zhruba mezi $3 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ a $-3 \cdot 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$.



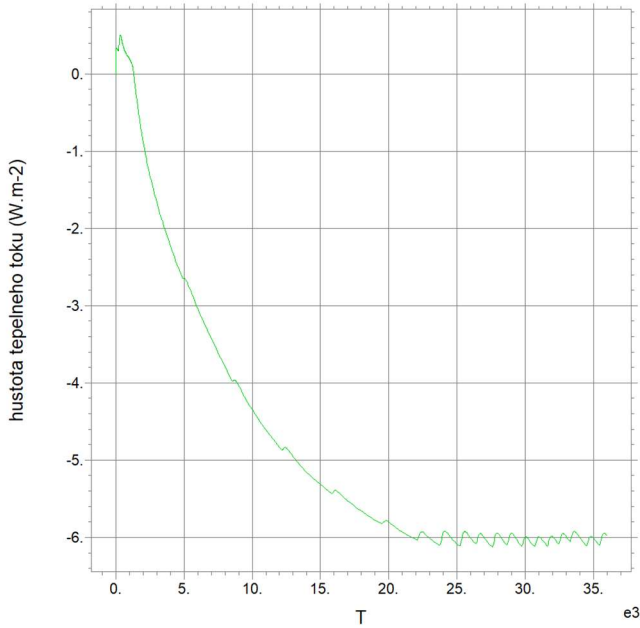
Graf 28: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 1. vzorek

Zdroj: autor

Součinitel prostupu vlhkosti je dle grafu 28 po celou dobu pokusu ustálený. Jeho hodnota se pohybuje již dle stacionárního výpočtu okolo $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ s.m}^{-1}$, proto je na tomto grafu viditelný jako 0.

- 2) Sendvičový stěnový panel s výplní minerální vatou 100 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

vzorek 2

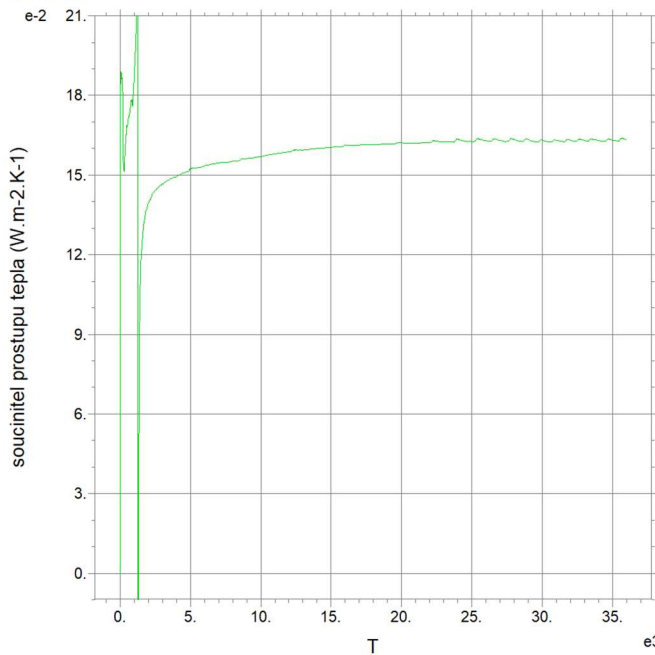


Graf 29: Závislost hustoty tepelného toku na času – 2. vzorek

Zdroj: autor

Dle grafu číslo 29 se hustota tepelného toku z počáteční nulové hodnoty postupně rovnoměrně zvětšovala až na hodnotu 6 W.m^{-2} . Této hodnoty bylo dosaženo přibližně po šesti hodinách od začátku měření. V dalším průběhu pokusu byla hustota tepelného toku již ustálená a odpovídala hustotě tepelného toku za stacionárních podmínek.

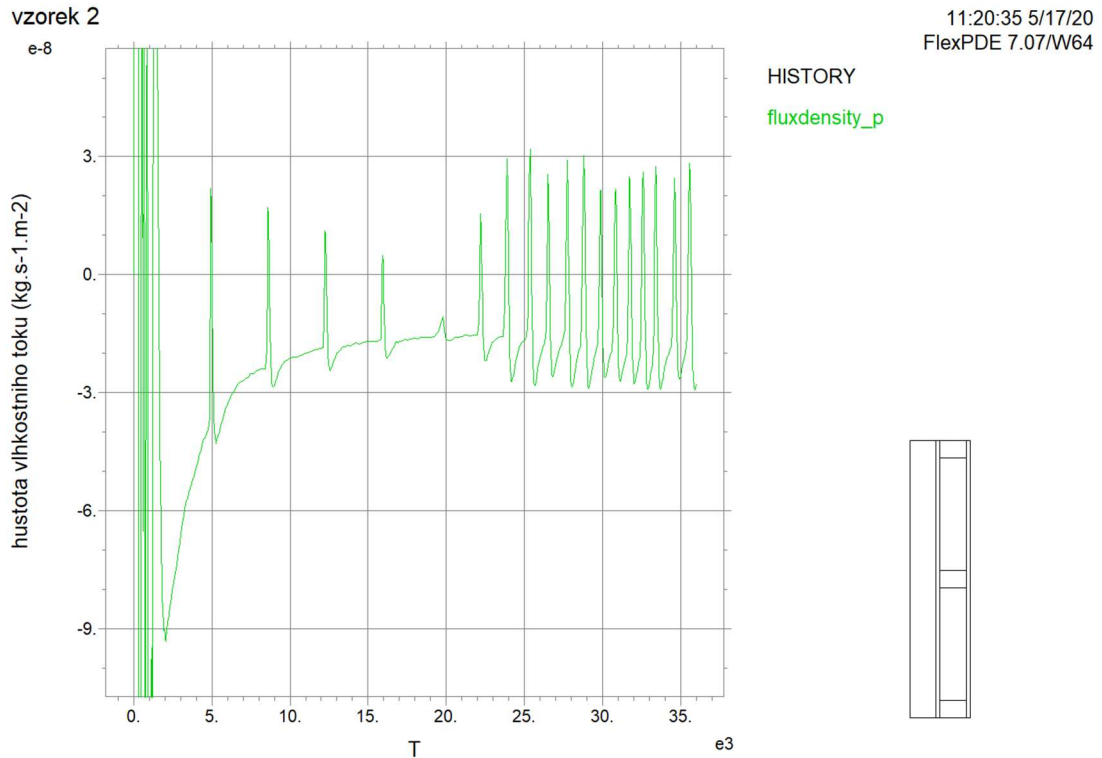
vzorek 2



Graf 30: Závislost součinitele prostupu tepla na času - 2. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 30 znázorňuje průběh hodnoty součinitele prostupu tepla. Hodnota začíná na $0,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a až po 10 hodinách se začíná ustalovat na hodnotě $0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, což je o $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ méně než při stacionární metodě výpočtu.

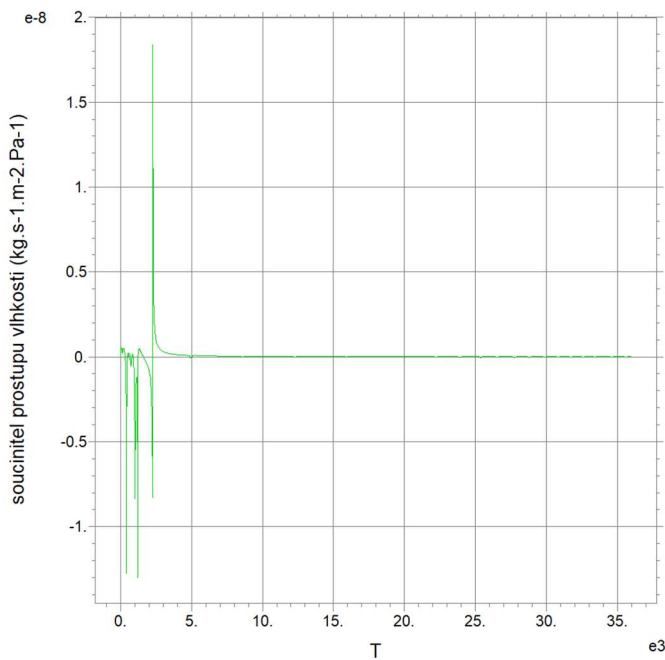


Graf 31: Závislost hustoty vlhkostního toku na času - 2. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 31 znázorňuje, že vlhkostní tok se v těchto teoretických podmínkách nikdy zcela neustálí. Již po 2 hodinách se směr vlhkostního toku obrací a vlhkost začíná střídavě proudit do a z panelu rychlostí zhruba mezi $3\cdot 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a $-3\cdot 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

vzorek 2



11:20:35 5/17/20
FlexPDE 7.07/W64

HISTORY

S



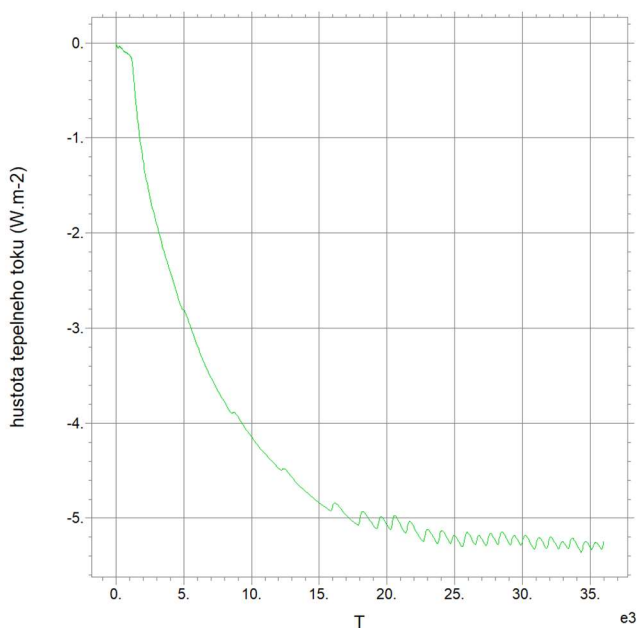
Graf 32: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 2. vzorek

Zdroj: autor

Součinitel prostupu vlhkosti je dle grafu číslo 32 po celou dobu pokusu ustálený. Jeho hodnota se pohybuje již dle stacionárního výpočtu okolo $9,1 \cdot 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, proto je na tomto grafu viditelný jako 0.

- 3) Sendvičový stěnový panel s výplní měkkou PUR pěnou 160 mm a venkovním zateplením fasádní minerální vatou 100 mm

vzorek 3

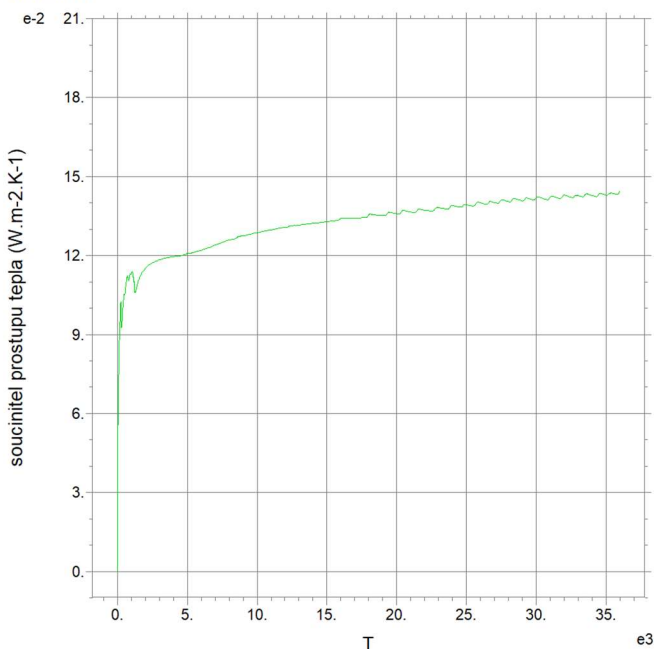


Graf 33: Závislost hustoty tepelného toku na času – 3. vzorek

Zdroj: autor

Dle grafu číslo 33 se hustota tepelného toku z počáteční nulové hodnoty postupně rovnoměrně zvětšovala až na hodnotu 5,6 W.m⁻², což je hodnota, které bylo dosaženo při stacionární metodě výpočtu. Ani po 10 hodinách ještě není hustota tepelného toku zcela vyrovnána.

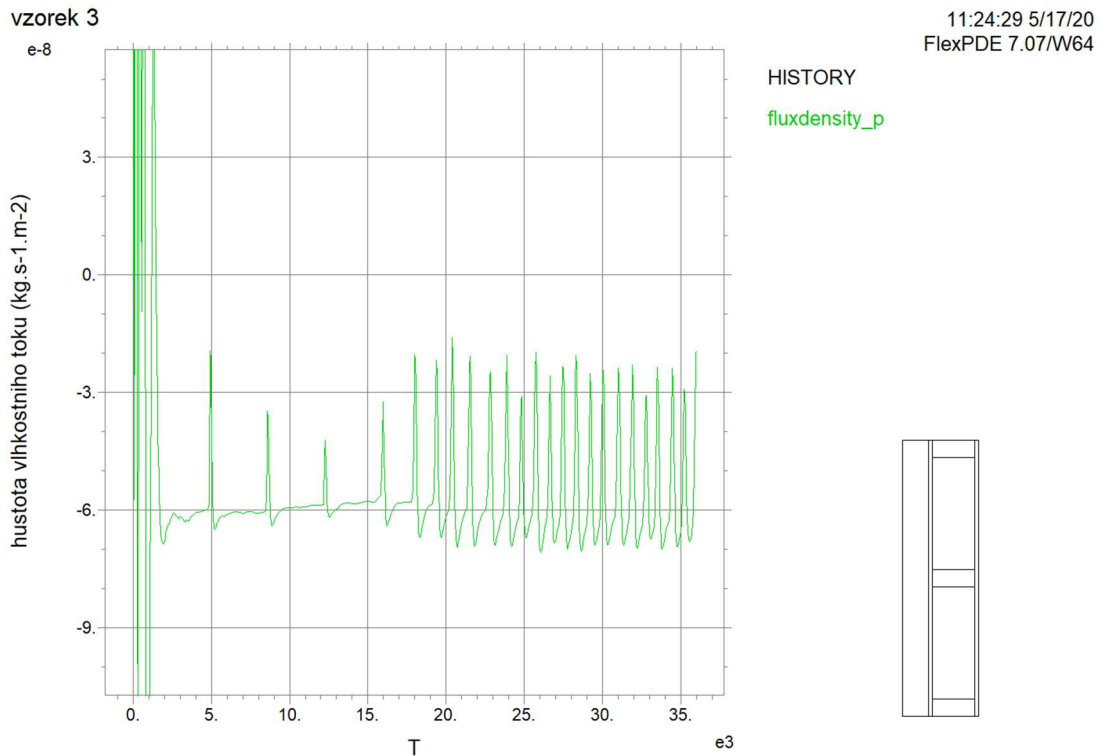
vzorek 3



Graf 34: Závislost součinitele prostupu tepla na času - 3. vzorek

Zdroj: autor

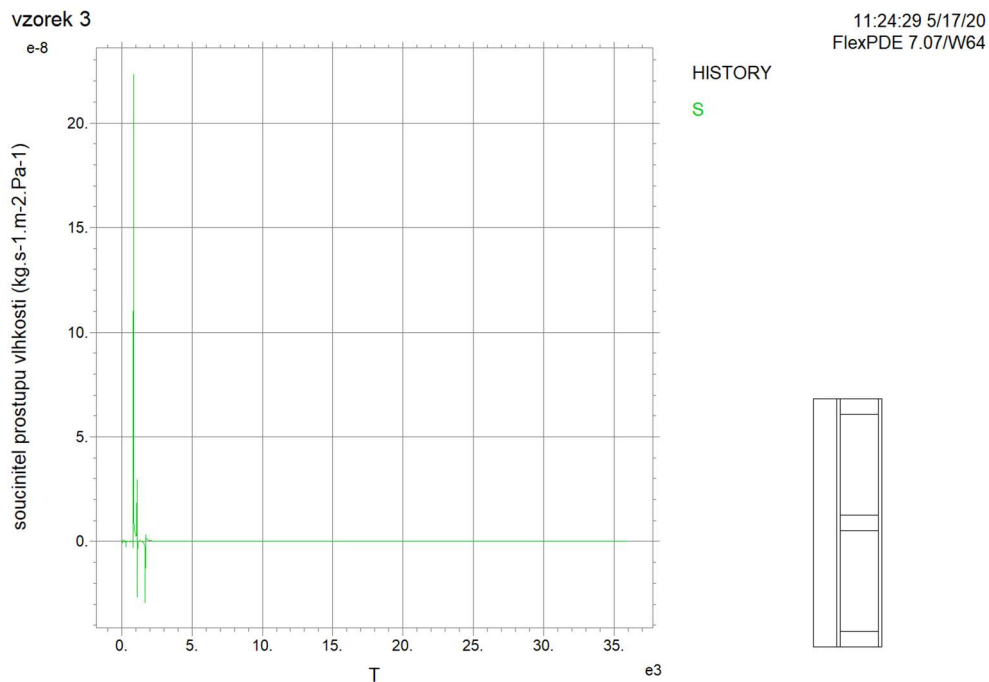
Graf číslo 34 znázorňuje průběh hodnoty součinitele prostupu tepla. Hodnota začíná na $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a po deseti hodinách dosahuje hodnoty $0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, která ale ještě není zcela ustálená, nicméně je to stejná hodnota, která vyšla při výpočtu za stacionárních podmínek.



Graf 35: Závislost hustoty vlhkostního toku na času - 3. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 35 znázorňuje, že vlhkostní tok se v těchto teoretických podmínkách nikdy zcela neustálí. Průběh je ale rozdílný od předchozích vzorků. Směr toku zůstává stejný, pouze hodnota se mění mezi $-6\cdot 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a $3\cdot 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.



Graf 36: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 3. vzorek

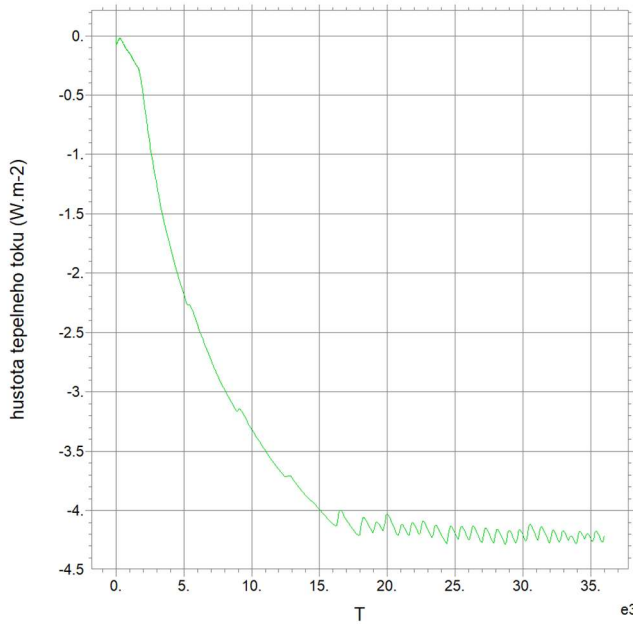
Zdroj: autor

Součinitel prostupu vlhkosti je dle grafu 36 po celou dobu pokusu ustálený. Jeho hodnota se pohybuje již dle stacionárního výpočtu okolo $6,8 \cdot 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, proto je na tomto grafu viditelný jako 0.

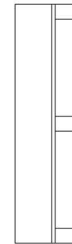
- 4) Sendvičový stěnový panel s výplní tvrdou PUR pěnou 100 mm a venkovním zateplením fasádním polystyrenem 160 mm

vzorek 4

11:29:39 5/17/20
FlexPDE 7.07/W64



HISTORY
fluxdensity_temp



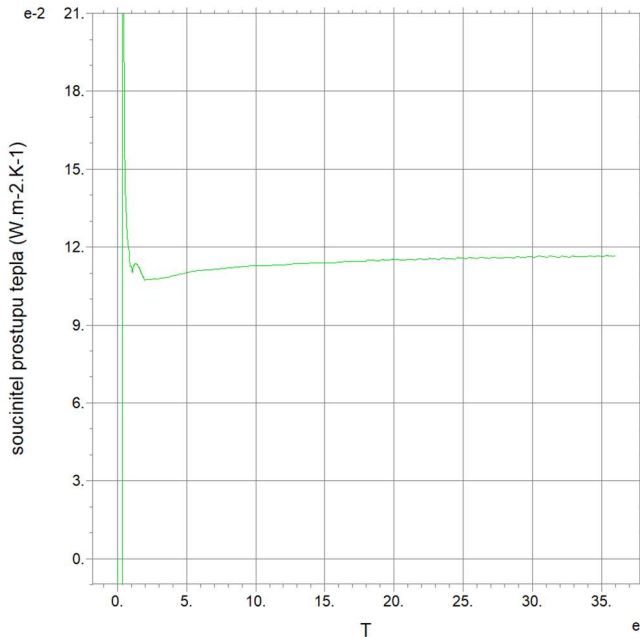
Graf 37: Závislost hustoty tepelného toku na času – 4. vzorek

Zdroj: autor

Dle grafu číslo 37 se hustota tepelného toku z počáteční nulové hodnoty postupně rovnoměrně zvětšovala až na hodnotu $4,25 \text{ W.m}^{-2}$. Této hodnoty bylo dosaženo přibližně po pěti a půl hodinách od začátku měření. V dalším průběhu pokusu byla hustota tepelného toku již ustálená a odpovídala hustotě tepelného toku za stacionárních podmínek.

vzorek 4

11:29:39 5/17/20
FlexPDE 7.07/W64



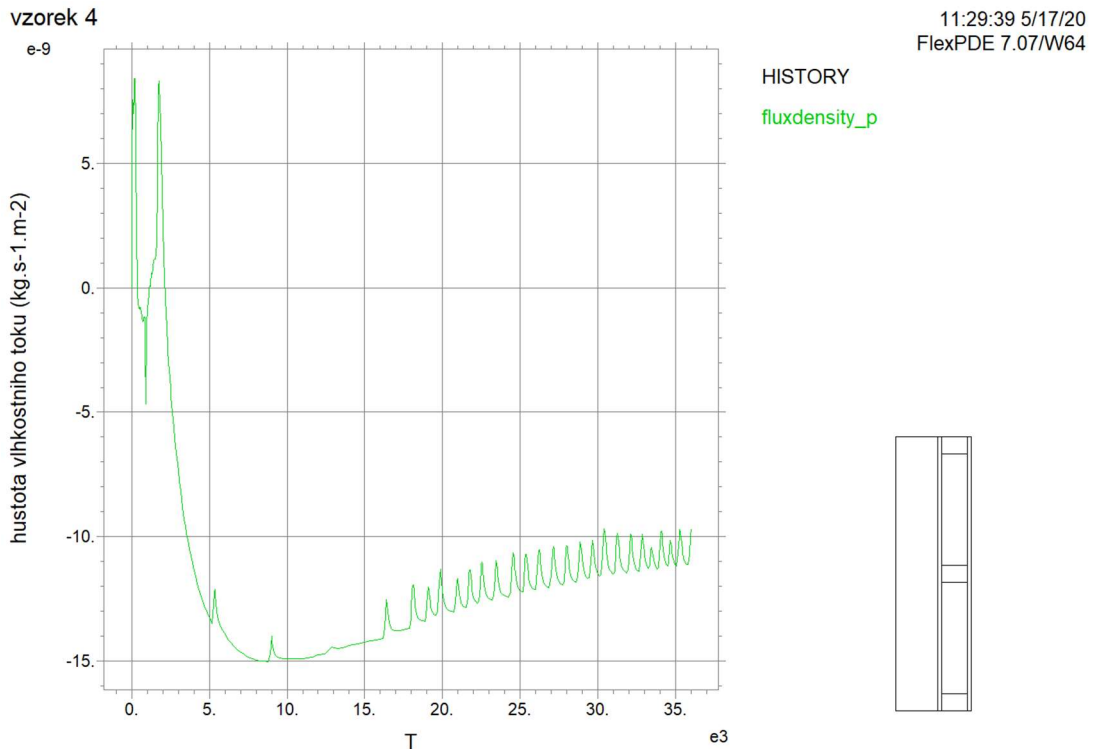
HISTORY
U



Graf 38: Závislost součinitele prostupu tepla na času - 4. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 38 znázorňuje průběh hodnoty součinitele prostupu tepla. Hodnota začíná na $0,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ až po deseti hodinách se ustálí na hodnotě $0,12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, což opět odpovídá hodnotě stacionárního výpočtu.



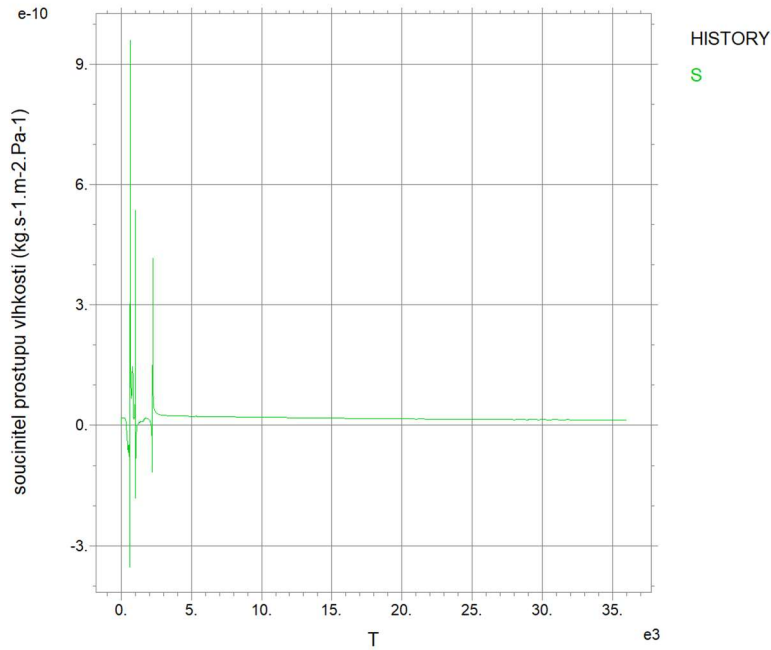
Graf 39: Závislost hustoty vlhkostního toku na času - 4. vzorek

Zdroj: autor

Graf číslo 39 znázorňuje, že vlhkostní tok není ustálený ani po 10 hodinách. Vlhkostní tok začne po třech hodinách pozvolna klesat od hodnoty $15\cdot 10^{-9} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ k hodnotě $10\cdot 10^{-9} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, což odpovídá hodnotě vypočtené stacionární metodou. Vlhkostní tok stále směřuje z interiéru do exteriéru.

vzorek 4

11:29:39 5/17/20
FlexPDE 7.07/W64



Graf 40: Závislost součinitele prostupu vlhkosti na času - 4. vzorek

Zdroj: autor

Součinitel prostupu vlhkosti je dle grafu 40 po celou dobu pokusu ustálený. Jeho hodnota se pohybuje již dle stacionárního výpočtu okolo $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, proto je na tomto grafu viditelný jako 0.

5.4 Ekonomické zhodnocení

Ekonomická analýza jednotlivých druhů skladeb stěn bude provedena na vzorovém domě o rozměrech 8,3 x 12,3 metru a výšce 2,9 metru. Testované skladby se týkají pouze vnějších stěn, proto do materiálu nejsou zahrnuty vnitřní příčky.

Konstrukce stěn byla navržena v programu Pamir. Tento software vypočítal čistý objem dřevěných prvků na 2,39 m³ pro konstrukci z KVH hranolů 60x100 mm a 3,824 m³ pro konstrukci z KVH hranolů 60x160 mm. Vzniká tím prostor pro vyplnění izolací o celkovém objemu 9,61 m³ pro typ skladby s užším dřevěným profilem a 15,38 m³ pro typ skladby s širším profilem.



Obrázek 40: Nákres konstrukce vzorového domu

Zdroj: autor

Skladba stěny 1	Množství	Cena za materiál	Cena za práci
KVH 60x100	2,39 m ³	23 900 Kč	32 000 Kč
PUR tvrdá 100 mm	9,62 m ³	35 594 Kč	14 430 Kč
OSB 15 mm z obou stran	240 m ²	37 200 Kč	19 200 Kč
Minerální vlna fasádní 100 mm	12 m ³	39 600 Kč	21 600 Kč
Celkem		136 294 Kč	87 230 Kč
Cena celkem za materiál i práci		223 524 Kč	

Tabulka 12: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 1

Zdroj: autor

Skladba stěny 2	množství	cena za materiál	cena za práci
KVH 60x100	2,39 m ³	23 900 Kč	32 000 Kč
Minerální vlna 100 mm	9,62 m ³	21 164 Kč	13 468 Kč
OSB 15 mm z obou stran	240 m ²	37 200 Kč	19 200 Kč
Minerální vlna fasádní 100 mm	12 m ³	39 600 Kč	21 600 Kč
Celkem		121 864 Kč	86 268 Kč
Cena celkem za materiál i práci	208 132 Kč		

Tabulka 13: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 2

Zdroj: autor

Skladba stěny 3	množství	cena za materiál	cena za práci
KVH 60x160	3,824 m ³	38 240 Kč	32 000 Kč
PUR měkká 160 mm	15,39 m ³	18 468 Kč	18 468 Kč
OSB 15 mm z obou stran	240 m ²	37 200 Kč	19 200 Kč
Minerální vlna fasádní 100 mm	12 m ³	39 600 Kč	21 600 Kč
Celkem		133 508 Kč	81 668 Kč
Cena celkem za materiál i práci	224 776 Kč		

Tabulka 14: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 3

Zdroj: autor

Skladba stěny 4	množství	cena za materiál	cena za práci
KVH 60x100	2,39 m ³	23 900 Kč	32 000 Kč
PUR tvrdá 100 mm	9,62 m ³	35 594 Kč	14 430 Kč
OSB 15 mm z obou stran	240 m ²	37 200 Kč	19 200 Kč
Fasádní polystyren 160 mm	19,2 m ³	53 760 Kč	19 200 Kč
Celkem		150 454 Kč	84 830 Kč
Cena celkem za materiál i práci	235 284 Kč		

Tabulka 15: Náklady na vzorový dům při skladbě stěny 4

Zdroj: autor

Z hlediska ekonomiky výroby je nejlevnější vzorek číslo 2, který se skládá z nosné konstrukce síly 100 mm vyplněné izolací z minerální vaty, jako fasádní izolace je použita také minerální vata v síle 100 mm. Vzorky číslo 1 a 3 jsou o 7% dražší. Výhodou vzorku číslo 3 je, že má silnější nosnou konstrukci, což může být výhodné z hlediska statiky stavby. Výhodou vzorku číslo 1 je, že při menší celkové síle stěny je možné dosáhnout podobných tepelně izolačních vlastností. Cenově nejdražší je vzorek číslo 4, složený z 100 mm silné nosné

konstrukce, vyplněné tvrdou PUR pěnou. Fasádní izolaci tvoří 160 mm polystyrenu. Tato skladba je o 5% dražší než skladba 1 a 3, a o 12% dražší než skladba 2. Součinitel prostupu tepla této skladby již splňuje normu na pasivní dům a má z testovaných vzorků nejlepší tepelné vlastnosti.

6 Diskuse

Výsledných tepelných vlastností daných vzorků stěn bylo dosaženo pomocí dvou metod. První byla experimentální metoda měření pokusných vzorků v teplé skříni a druhou metodou byl teoretický výpočet.

Měření v teplé skříni probíhalo za stacionárních podmínek, tedy po dosažení ustáleného teplotního stavu. V tomto měření se zjišťovaly pouze tepelné vlastnosti stěnových panelů, vlhkost měřena nebyla. Byla použita metoda kalibrované teplé skříně. V tomto způsobu měření je důležité dosáhnout co nejlepšího utěsnění vzorku v teplé skříni. To se ukázalo jako poměrně obtížné, protože u jednoho vzorku se výsledky výrazně lišily od ostatních vzorků ve srovnání s teoretickým výpočtem. Pro zpřesnění měření tímto způsobem by bylo vhodné měření každého vzorku vícekrát opakovat. Výhodné by také bylo provést měření vzorků metodou chráněné teplé skříně (viz. kapitola 5.1.) k čemuž se dá použít stejné zařízení, a potom porovnat výsledky obou měření.

V teoretickém výpočtu byly vlastnosti daných vzorků řešeny jak z hlediska prostupu tepla, tak z hlediska prostupu vlhkosti a to za stacionárních i nestacionárních podmínek. K tomuto výpočtu byl využit počítačový program pro řešení diferenciálních rovnic FlexPDE. Do tohoto programu byly zadány jednotlivé skladby stěnových panelů a vlastnosti materiálů v nich obsažené. Výstupem z tohoto programu jsou detailní grafy, které zobrazují prostup tepla a vlhkosti stěnovým panelem v celém jeho průřezu. To umožňuje v předstihu odhalit místa, kde má stěna slabiny, jak z pohledu tepla, tak prostupu vlhkosti.

V porovnání výsledků obou metod bylo ale zjištěno, že teoretický výpočet vykazoval vždy lepší výsledky než experimentální měření. Rozdíl mezi oběma metodami byl u třech vzorků přibližně 25 %, ale u jednoho vzorku byl rozdíl více než 50 %. To je pravděpodobně způsobeno nedokonalostmi v utěsnění jednotlivých vzorků v teplé komoře. Také to poukazuje na to, že provedení stavebních konstrukcí v praxi má vždy určité nepřesnosti, s nimiž je nutné při navrhování konstrukce budov počítat.

Prodyšnost vodních par se v současnosti často marketingově využívá jako konkurenční výhody jednotlivých výrobců dřevostaveb. V této práci byla

nejprodyšnější skladbou varianta číslo 2, která se skládala pouze z minerální vaty (hustota vlhkostního toku $7,372 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) a nejméně prodyšná skladba číslo 4 složená z tvrdé PUR pěny a polystyrenu (hustota vlhkostního toku $9,483 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$). Na hodnotě těchto čísel je zřejmé, že v praxi je naprosto nereálné, aby dům dokázal stěnami propustit všechnu vlhkost, která v něm vzniká (dýchání, vaření, sprchování atd..). Do těchto hodnot navíc není započítána vnější omítka a vnitřní opláštění sádkartonem, tím se prostup vodní páry stěnou ještě sníží. Z toho vyplývá, že pro udržení optimálních vlhkostních podmínek v budově je vždy rozhodující kvalitní větrání.

7 Závěr

Úkolem této práce byla teoretická a experimentální analýza přestupu tepla a vlhkosti přes sendvičový stěnový panel s využitím tepelné izolace stříkanou PUR pěnou. Teoretické analýzy bylo dosaženo vytvořením matematického modelu stěny, na kterém se pomocí metody konečných prvků simuloval současně přenos tepla a vlhkosti za stacionárních i nestacionárních podmínek. Výhodou tohoto řešení je zobrazení přenosu tepla i vlhkosti v celém průřezu stěnového panelu.

Pro ověření a porovnání výsledků teoretického výpočtu byla vyrobena teplá komora dle normy EN ISO 8990 z roku 1998, což je zařízení umožňující simulovat různé teplotní podmínky pro interiér i exteriér budovy. Dále byly navrženy a vyrobeny čtyři vzorky sendvičových stěn. Při jejich navrhování byla zohledněna stavební norma ČSN 73 0540-2, aby dané skladby splňovaly minimálně doporučenou hodnotu součinitele prostupu tepla pro nízkoenergetické budovy. Tři vzorky stěnových panelů obsahovaly jako výplň nosné konstrukce PUR pěnu. Jeden vzorek byl složen pouze z minerální vaty pro porovnání vlastností s konvenční skladbou dřevěných stěn.

Měření a výpočet tepelných vlastností	Experimentální měření		Teoretický výpočet	
	Hustota tepelného toku	Součinitel prostupu tepla	Hustota tepelného toku	Součinitel prostupu tepla
	\vec{q} (W.m ⁻²)	U_t (W.m ⁻² K ⁻¹)	\vec{q} (W.m ⁻²)	U_t (W.m ⁻² K ⁻¹)
1. vzorek	7,513	0,209	5,925	0,164
2. vzorek	8,693	0,241	6,754	0,187
3. vzorek	8,987	0,246	5,692	0,158
4. vzorek	5,660	0,160	4,326	0,120

Tabulka 16: Souhrn tepelných výsledků

Zdroj: autor

Měření a výpočet vlhkostních vlastností	Experimentální měření		Teoretický výpočet	
	Hustota vlhkostního toku	Součinitel prostupu vodní páry	Hustota vlhkostního toku	Součinitel prostupu vodní páry
	\vec{j} (kg.s ⁻¹ .m ⁻²)	U _{Do} (s.m ⁻¹)	\vec{j} (kg.s ⁻¹ .m ⁻²)	U _{Do} (s.m ⁻¹)
1. vzorek			1,378.10 ⁻⁸	1,706.10 ⁻¹¹
2. vzorek			7,372.10 ⁻⁸	9,126.10 ⁻¹¹
3. vzorek			5,525.10 ⁻⁸	6,840.10 ⁻¹¹
4. vzorek			9,483.10 ⁻⁹	1,173.10 ⁻¹¹

Tabulka 17: Souhrn vlhkostních výsledků

Zdroj: autor

První stěna, která se skládala ze 100 mm tvrdé pěny v nosné konstrukci a 100 mm fasádní minerální vaty vykazala v teoretickém výpočtu třetí nejvyšší hustotu (5,925 W.m⁻²) tepelného toku a druhou nejmenší hustotu vlhkostního toku (1,378.10⁻⁸ kg.s⁻¹.m⁻²). Hodnota součinitele prostupu tepla byla dle teoretického výpočtu 0,164 W.m⁻²K⁻¹. Tato skladba dle normy ČSN 73 0540-2 tedy splňuje doporučenou hodnotu pro pasivní budovy (0,12 – 0,18 W.m⁻²K⁻¹). Při experimentálním měření byl ale výsledek horší o přibližně 25 % (0,209 W.m⁻²K⁻¹), což stále splňuje doporučenou hodnotu pro nízkoenergetické domy (0,2 - 0,25 W.m⁻²K⁻¹). Tato skladba stěny byla z porovnávaných vzorků druhá nejlevnější. Stěna vykazuje dobré výsledky v poměru fyzikálních vlastností a ceny a její výhodou je také relativně malá tloušťka. To umožňuje vytěžit více užitečného prostoru na zastavěné ploše.

Druhá stěna se skládala ze 100 mm minerální vaty v nosné konstrukci a 100 mm minerální vaty na vnějším plášti. Dle teoretického výpočtu měla nejvyšší hustotu tepelného toku (6,754 W.m⁻²) i hustotu vlhkostního toku (1,378.10⁻⁸ kg.s⁻¹.m⁻²). Hodnota součinitele prostupu tepla je dle teoretického výpočtu 0,187 W.m⁻²K⁻¹, což dle stavební normy těsně nedosahuje požadavků na pasivní budovy (0,12 – 0,18 W.m⁻²K⁻¹). V praktickém měření byl výsledek opět o 25 % horší (0,241 W.m⁻²K⁻¹). Tato skladba byla z porovnávaných vzorků nejlevnější. Největší odlišností od ostatních stěn je vysoká propustnost vodní páry.

Třetí stěna byla složena z 160 mm měkké PUR pěny v nosné konstrukci a opláštěná 100 mm fasádní minerální vaty. Součinitel prostupu tepla je dle teoretického výpočtu 0,158 W.m⁻²K⁻¹. To splňuje normu součinitele prostupu

tepla pro pasivní budovy ($0,12 - 0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$) a má druhou nejnižší hodnotu hustoty tepelného toku ($5,692 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$) a druhou nejvyšší hodnotu hustoty vlhkostního toku ($1,378\cdot 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). To je způsobeno větší prodyšností měkké PUR pěny. V experimentálním měření byla u tohoto vzorku výraznější odchylka ve sledovaných hodnotách než u ostatních vzorků, a to o cca 50 %. Hustota tepelného toku byla $8,987 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a součinitel prostupu tepla $0,246 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. To bylo zřejmě způsobeno nepřesností měření (viz diskuse). Z ekonomického hlediska tato skladba vychází podobně jako 1. vzorek, ale výhodou je větší síla nosné konstrukce.

Poslední čtvrtý vzorek byl složen z 100 mm tvrdé PUR pěny v nosné konstrukci a byl opláštěn fasádním polystyrenem silným 160 mm. Podle teoretického výpočtu měl nejnižší hodnotu tepelného toku ($4,326 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a nejnižší hodnotu vlhkostního toku ($9,483\cdot 10^{-9} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). Jako jediný z testovaných vzorků splnil normu pro pasivní budovu ($0,12 - 0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$). i v experimentálním měření ($0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$). Z ekonomického hlediska byl nejdražší, ale rozdíl oproti dalším skladbám nebyl zásadní.

Vzorky, kde byla použita PUR pěna, vykázaly v teoretickém výpočtu výsledky splňující požadavky pro konstrukci stěn pasivního domu. Nejlepšího výsledku dosáhl vzorek číslo 4 (kombinace tvrdé pěny a polystyrenu), který tento předpoklad potvrdil i v experimentálním měření. Z hlediska difúze vodní páry žádný ze vzorků nevykazoval tendenci ke kondenzaci vody v konstrukci.

Z naměřených a vypočtených údajů lze říci, že použití PUR pěny v konstrukci dřevostaveb vykazuje dobré výsledky. Je tedy nepochybně perspektivní a bylo by vhodné vyvíjet a testovat další varianty těchto skladeb stěn, aby bylo dosaženo optimálních výsledků.

8 Seznam literatury

- Albert, Alain. 2010.** *Understanding CNC Routers: Demystifying CNC Wood Router Technology.* místo neznámé : FPInnovations, 2010.
- Böhm, Reisner, Bomba. 2012.** *Materiály na bázi dřeva.* Praha : ČZU, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.
- Brandner, Reinhard. 2016.** *Cross Laminated (CLT): Overview and Development.* místo neznámé : European Journal of wood and Wood Products, 2016.
- Burch, Monte. 1984.** *Complete guide to building log homes.* 1984.
- Copper, Jim. 2000.** *Log Homes made easy.* místo neznámé : Stackpole Books, 2000. ISBN 0-8117-2847-1.
- Gagnon, Sylvian. 2011.** *CLT Handbook: Cross Laminated Timber.* 2011.
- Guertin, Arnold. 2001.** *Precision Framing.* místo neznámé : Taunton's, 2001.
- Horáček, Petr. 2004.** *Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva.* Kostelec nad Černými lesy : Lesnická práce, 2004. ISBN 80-86386-59-7.
- Houdek, Dalibor a Koudelka, Otakar. 2013.** *Srubové domu z kulatin. Vážany nad Litavou :* JoshuaCreative, 2013. ISBN 978-80-904414-6-0.
- Hudec, Mojmír. 2008.** *Pasivní rodinný dům proč a jak stavět.* Praha : Grada Publishing a.s., 2008. ISBN 978-80-247-2555-0.
- Hudec, Mojmír, Johanisová, Blanka a Mansbart, Tomáš. 2013.** *Pasivní domy z přírodních materiálů.* Praha : Grada Publishing a.s., 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
- Chybík, Josef. 2009.** *Přírodní stavební materiály.* Praha : Grada, 2009. ISBN 978-80-247-2532-1.
- Kolář, Karel a Reiterman, Pavel. 2012.** *Stavební materiály pro SPŠ stavební.* Praha : Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4070-6.
- Kolb, Josef. 2010.** *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště 2. aktualizované vydání.* Praha : Grada Publishing a.s., 2010. ISBN 978-80-247-4071-3.

- Kottjé, Johannes. 2008.** *Jak se staví dřevěný dům: od projektu k nastěhování.* Praha : Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2531-4.
- Kubečková, Darja a Marcela, Halířová. 2012.** *Konstrukce ze sádrokartonu.* Praha : Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3831-4.
- Kulhánek, František. 2011.** *Stavební fyzika II. Stavební tepelná technika, 5. přepracované vydání.* Praha : nakladatelství ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04957-0.
- Lehmann. 2012.** *Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems.* 2012.
- Linhart, Ladislav. 2010.** *Zateplování budov.* Praha : Grada Publishing a.s., 2010. ISBN 978-80-247-3361-6.
- Mackie, Allan. 1977.** *Building with logs.* místo neznámé : Firefly Books, 1977. ISBN 9781552091029.
- Márton, Jan. 2014.** *Stavby ze slaměných balíků: slaměné izolace v nízkoenergetických a pasivních domech.* Liberec : autor neznámý, 2014. ISBN 978-80-260-5713-0.
- Mayo, Joseph. 2015.** *Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design.* místo neznámé : Routledge, 2015. ISBN 978-0-415-72529-3.
- McElroy, Kimpflen. 1990.** *Insulation Materials, Testing and applications.* Philadelphia : ASTM, 1990.
- Mrlík, František. 1984.** *Stavební tepelná technika a stavební akustika 2. vyd.* Brno : Vysoké učení technické, 1984.
- Nagy, Eugen. 2015.** *Manuál ekologickej výstavby: navrhovanie a výstavba trvalo udržateľných ľudských sídiel.* Liberec : Alter Nativa Brdárka spolu s o.s. Ekovesnice, 2015. ISBN 978-80-971724-0-4.
- Novák, Jiří. 2008.** *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov.* Praha : Grada Publishing a.s., 2008. ISBN 978-80-247-1953-5.
- Novotný, Marek, a další. 1994.** *Tepelné izolace a stavební tepelná technika.* Praha : ABF, 1994. ISBN 80-901608-0-8.
- Nyč, Miroslav. 2005.** *Sádrokarton.* Praha : Grada, 2005. ISBN 80-247-0986-4.
- Pavlas, Marek. 2016.** *Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: technologie CLT.* Praha : Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-271-0055-2.

Pešta, Jan. 2013. *Rekonstrukce roubených staveb.* Praha : Grada, 2013. ISBN 978-80-247-3239-8.

Roy, Rob. 2004. *Timber Framing for the rest of us.* místo neznámé : New society publishers, 2004. ISBN: 0-86571-508-4.

Růžička, Martin. 2006. *Stavíme dům ze dřeva.* Praha : Grada, 2006. ISBN 80-247-1461-2.

Simpson. 2007. *Coplete Book of Framing: An illustrated Guide for Residential Construction.* místo neznámé : RDMeans, 2007.

Skulinová, Darja a Marcela, Halířová. 2012. *Konstrukce ze sádrokartonu.* Praha : Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3831-4.

Smith, Ryan. 2010. *Prefab Architecture.* Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-88046-3.

Straka, Bohumil. 2013. *Konstrukce šikmých střech.* Praha : Grada Publishing a.s., 2013. ISBN 978-80-247-4205-2.

Šubrt, Roman a kolektiv. 2011. *Tepelné mosty pro nízkoenergetické a pasivní domy.* Praha : Grada Publishing a.s., 2011. ISBN 978-80-247-4059-1.

Vaverka, Jiří, Havířová, Zdeňka a Miroslav, Jindrák. 2008. *Dřevostavby pro bydlení.* Praha : Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2205-4.

Vaverka, Jiří, Chybík, Josef a Mrlík, František. 2000. *Stavební Fyzika 2.* Brno : Vutium, 2000. ISBN 80-214-1649-1.

Wagner. 1998. *House Framing.* místo neznámé : Creative homeowner, 1998.

Zahradníček a Horák. 2000. *Moderní dřevostavby.* Brno : Aurora, 2000. ISBN 978-80-251-3568-6.

Internetové Zdroje:

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. 2020-03-15]. Dostupné z: http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/stavebni-fyzika-resene-priklady-zs+jn2014.08.31_04.pdf

Srubový dům Tomáš na klíč | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby. *Dřevostavby - Portál* | *Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby* [online]. Copyright © 2020 Kladenská 107, Praha 6 [cit.

14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/katalog/domy/srubovy-dum-tomas>

Pravé hrázděné stavby jsou již historií | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby. *Dřevostavby - Portál | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby* [online]. Copyright © 2020 Kladenská 107, Praha 6 [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/2524-prave-hrazdene-stavby-jsou-jiz-historii>

DEKPANEL: Skutečná dřevostavba | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby. *Dřevostavby - Portál | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby* [online]. Copyright © 2020 Kladenská 107, Praha 6 [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/konstrukce-drevostaveb/3248-dekpanel-skutecna-drevostavba>

Sádrokartonová deska RBI 12,5 x 1250 x 2000 mm - Sádrokarton, Suchá výstavba, Stavební materiály, Stavba. *UNI HOBBY* [online]. Dostupné z: <https://eshop.unihobby.cz/stavba-stavebni-materialy-sucha-vystavba-sadrokarton-sadrokartonova-deska-rbi-12-5-x-1250-x-2000-mm/143307p/>

Podlahová sádrovláknitá deska Fermacell E25 (1500x500x25) mm | Stavebniny DEK. *Stavebniny DEK* [online]. Copyright © 2020 DEK a.s. [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: https://www.dek.cz/produkty/detail/3630453205-fermacell-e25-podl-prvek-1500x500x25mm-2e22?tab_id=popis

Cementotřísková deska Cetris Basic 12 mm (3350x1250) mm | drevoonline.cz - prodej dřeva a veškerého stavebního řeziva s dodáním po celé ČR. *drevoonline.cz - prodej dřeva a veškerého stavebního řeziva s dodáním po celé ČR* [online]. Copyright © 2010 [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.drevoonline.cz/drevoonline/eshop/24-1-CETRIS/-4-/5/703-Cementotriskova-deska-Cetris-Basic-12-mm-3350x1250-mm>

Dřevovlákn: Ekologická a účinná izolace | Dřevostavby, časopis o bydlení - DřevoStavby. *Dřevostavby - Portál | Dřevostavby, časopis o bydlení -*

DřevoStavby [online]. Copyright © 2020 Kladenská 107, Praha 6 [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/izolace/3622-drevovlakno-ekologicka-a-ucinna-izolace>

Foukaná izolace: cena není jedinou výhodou!. *Zdravá a přírodní foukaná izolace. Až 60% úspora energie - Climatizer Plus* [online]. Dostupné z: <https://www.climatizer.cz/foukana-izolace-cena-neni-jedinou-vyhodou/>

Extrudovaný polystyren FIBRAN XPS ETICS GF | WOODCOTE Stavebniny. *Stavíme vás na první místo | WOODCOTE Stavebniny* [online]. Copyright © 1992 [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.woodcote.cz/stavebniny/extrudovany-polystyren-fibran-xps-etics-gf>

Neubau - DIETZ HOLZBAU GmbH - Neubau, Modernisierung, Aufstockung, Anbau und Umbau. Home - DIETZ HOLZBAU GmbH - Neubau, Modernisierung, Aufstockung, Anbau und Umbau [online]. Copyright © 2016 [cit. 14.06.2020]. Dostupné z: <https://www.dietzholzbau.de/neubau.html>

9 Přílohy

9.1 Stacionární výpočet

```
TITLE 'vzorek 1'

SELECT
    errlim=1e-3
    painted
    cell_limit=10000

VARIABLES
    temp
    p
    q
    j

DEFINITIONS
temp_ini=273.15+22.5
!tempin=table ('tempin_1.tbl')
!tempout=table ('tempout_1.tbl')
tempin=273.15+23
tempout=273.15-13
f_ini=0.35
!fin=table ('fin_1.tbl')
!fout=table ('fout_1.tbl')
fin=0.33
fout=0.6

{obvodovy panel}
izolace1=0.1
OSB=0.015
izolace2=0.1
KVHd=0.1
KVHh=0.06

tloustka=izolace1+OSB+izolace2+OSB
vyska=1

R=8.31441
M=0.0180153
{univerzalni plynova konstanta}
{molarni hmotnost vodni pary}

p0_ini = if (temp_ini>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp_ini-273.15)/(237.3+(temp_ini-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temp_ini-273.15)/(265.5+(temp_ini-273.15)))
p_ini=f_ini*p0_ini

p0in = if (tempin>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempin-273.15)/(237.3+(tempin-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(tempin-273.15)/(265.5+(tempin-273.15)))
p0out = if (tempout>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempout-273.15)/(237.3+(tempout-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(tempout-273.15)/(265.5+(tempout-273.15)))

pout=p0out*fout
pin=p0in*fin

p0 = if (temp>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp-273.15)/(237.3+(temp-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temp-273.15)/(265.5+(temp-273.15)))
f=p/p0

kx
ky
cw
Gw

deltax
deltay

htin=1/0.25
htout=1/0.04
hpin=2.04e-6*htin/temp
hpout=2.04e-6*htout/temp

temp_KVH1_prum=integral(temp,5)/(KVHd*KVHh)-273.15
```

```

temp_KVH1_max=globalmax(temp,5)-273.15
temp_KVH1_min=globalmin(temp,5)-273.15
f_KVH1_prum=integral(f,5)/(KVHd*KVHh)*100
f_KVH1_max=globalmax(f,5)*100
f_KVH1_min=globalmin(f,5)*100

temp_KVH2_prum=integral(temp,7)/(KVHd*KVHh)-273.15
temp_KVH2_max=globalmax(temp,7)-273.15
temp_KVH2_min=globalmin(temp,7)-273.15
f_KVH2_prum=integral(f,7)/(KVHd*KVHh)*100
f_KVH2_max=globalmax(f,7)*100
f_KVH2_min=globalmin(f,7)*100

flux_temp=vector(-kx*dx(temp),-ky*dy(temp))
fluxdensity_temp=integral(q)/(tloustka*vyska)
U=fluxdensity_temp/(tempout-tempin)                                {soucinitel prostupu tepla, W.m-2.K-1}

flux_p=vector(-deltax*dx(p),-deltay*dy(p))
fluxdensity_p=integral(j)/(tloustka*vyska)
S=fluxdensity_p/(pout-pin)

INITIAL VALUES
temp=temp_ini                {pocatecni teplota}
p=p_ini                        {pocatecni parcialni tlak vodnich par}

EQUATIONS
!temp:  dx(kx*dx(temp))+dy(ky*dy(temp))-Gw*cw*dt(temp)=0
!p:      dx(deltax*dx(p))+dy(deltay*dy(p))-M/(R*temp)*dt(p)=0
temp:    dx(kx*dx(temp))+dy(ky*dy(temp))=0
p:        dx(deltax*dx(p))+dy(deltay*dy(p))=0
q:        kx*dx(temp)+ky*dy(temp)+q=0
j:        deltax*dx(p)+deltay*dy(p)+j=0

BOUNDARIES
REGION 1 {izolace1}
kx=0.036
ky=kx
cw=950
Gw=110
deltax=0.178e-9
deltay=deltax
start (0,0)
natural(temp)=0
        natural(p)=0
        line to (izolace1,0)
line to (izolace1,vyska)
line to (0,vyska)
        natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
        natural(p)=-hpout*(p-pout)
! value(p)=pout
line to close

REGION 2 {OSB}
kx=0.13
ky=kx
cw=1600
Gw=600
deltax=0.00356e-9
deltay=deltax
start (izolace1,0)
        natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB,0)
line to (izolace1+OSB,vyska)
line to (izolace1,vyska)
line to close

REGION 3 {izolace2}
kx=0.0226
ky=kx
cw=1500
Gw=27
deltax=0.002225e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,0)
        natural(temp)=0

```

```

        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+izolace2,0)
line to (izolace1+OSB+izolace2,vyska)
line to (izolace1+OSB,vyska)
line to close

REGION 4 {OSB}
kx=0.13
ky=kx
cw=1600
Gw=600
deltax=0.00356e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB+izolace2,0)
    natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+izolace2+OSB,0)
    natural(temp)=-htin*(temp-tempin)
    natural(p)=-hpin*(p-pin)
! value(p)=pin
line to (izolace1+OSB+izolace2+OSB,vyska)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+izolace2,vyska)
line to close

REGION 5 {KVH1}
kx=0.15
ky=kx
cw=2500
Gw=450
deltax=0.001135e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,0)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+KVHd,0)
line to (izolace1+OSB+KVHd,KVHh)
line to (izolace1+OSB,KVHh)
line to close

REGION 6 {KVH3}
kx=0.15
ky=kx
cw=2500
Gw=450
deltax=0.001135e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,vyska)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska)
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska-KVHh)
line to (izolace1+OSB,vyska-KVHh)
line to close

REGION 7 {KVH2}
kx=0.15
ky=kx
cw=2500
Gw=450
deltax=0.001135e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,vyska/2-KVHh/2)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska/2-KVHh/2)
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska/2+KVHh/2)
line to (izolace1+OSB,vyska/2+KVHh/2)
line to close

PLOTS
contour(temp-273.15) as "teplota (st.C)"
contour(f*100) fixed range (0,100) as "relativni vlhkost vzduchu (%)"
contour(p) as "parcialni tlak nenasycenych vodnich par (Pa)"
contour(p0) as "parcialni tlak nasycenych vodnich par (Pa)"

```

```

vector(flux_temp) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
vector(flux_p) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"
elevation(p0,p) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "parcialni tlak vodnich par (Pa)" !export format
"#x#b#1" file="tlak vodnich par.txt"
elevation(temp-273.15) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "teplotni spad (st.C)" !export format "#x#b#1"
file="teplota.txt"
elevation(temp-273.15) from (0,0) to (0,vyska) as "povrchova teplota (st.C)" !export format "#y#b#1" file="povrchova
teplota1.txt"
elevation(temp-273.15) from (tloustka,0) to (tloustka,vyska) as "povrchova teplota (st.C)" !export format "#y#b#1"
file="povrchova teplota2.txt"
elevation(f*100) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "spad RVV (%)" !export format "#x#b#1"
file="rel.vzdus.vlhkost.txt"

```

```

elevation (q) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
elevation (j) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"
elevation (fluxdensity_temp) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
elevation (fluxdensity_p) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"

```

```

elevation (U) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "soucinitel prostupu tepla (W.m-2.K-1)"
elevation (S) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "soucinitel prostupu vlhkosti (kg.s-1.m-2.Pa-1)"

```

SUMMARY

```

report (fluxdensity_temp) as "hustota tepelneho toku (W.m-2) "
report (fluxdensity_p)as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2) "
report ""
report (U) as "soucinitel prostupu tepla (W.m-2.K-1) "
report (S) as "soucinitel prostupu vodni pary (s.m-1) "

```

END

9. 2 Nestacionární výpočet

```

TITLE 'vzorek 1'

SELECT
    errlim=1e-3
    painted
    cell_limit=10000

VARIABLES
    temp
    p
    q
    j

DEFINITIONS
temp_ini=273.15+22.5
tempin=table ('tempin_1.tbl')
tempout=table ('tempout_1.tbl')
f_ini=0.35
fin=table ('fin_1.tbl')
fout=table ('fout_1.tbl')

{obvodovy panel}
izolace1=0.1
OSB=0.015
izolace2=0.1
KVHd=0.1
KVHh=0.06

tloustka=izolace1+OSB+izolace2+OSB
vyska=1

konstanta}
R=8.31441
M=0.0180153
E0=43470
p0_ini = if (temp_ini>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp_ini-273.15)/(237.3+(temp_ini-273.15))) else 610.5*EXP(21.875*(temp_ini-273.15)/(265.5+(temp_ini-273.15)))

{univerzalni plynova
{molarni hmotnost vodni pary}
{vyparne teplo}

```



```

p_ini=f_ini*p0_ini

p0in = if (tempin>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempin-273.15)/(237.3+(tempin-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(tempin-273.15)/(265.5+(tempin-273.15)))
p0out = if (tempout>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(tempout-273.15)/(237.3+(tempout-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(tempout-273.15)/(265.5+(tempout-273.15)))

pout=p0out*fout
pin=p0in*fin

p0 = if (temp>=273.15) then 610.5*EXP(17.269*(temp-273.15)/(237.3+(temp-273.15))) else
610.5*EXP(21.875*(temp-273.15)/(265.5+(temp-273.15)))
f=p/p0

kx
ky
cw
Gw
deltax
deltay

htin=1/0.25
htout=1/0.04
hpin=2.04e-6*htin/temp
hpout=2.04e-6*htout/temp

temp_KVH1_prum=integral(temp,5)/(KVHd*KVHh)-273.15
temp_KVH1_max=globalmax(temp,5)-273.15
temp_KVH1_min=globalmin(temp,5)-273.15
f_KVH1_prum=integral(f,5)/(KVHd*KVHh)*100
f_KVH1_max=globalmax(f,5)*100
f_KVH1_min=globalmin(f,5)*100

temp_KVH2_prum=integral(temp,7)/(KVHd*KVHh)-273.15
temp_KVH2_max=globalmax(temp,7)-273.15
temp_KVH2_min=globalmin(temp,7)-273.15
f_KVH2_prum=integral(f,7)/(KVHd*KVHh)*100
f_KVH2_max=globalmax(f,7)*100
f_KVH2_min=globalmin(f,7)*100

flux_temp=vector(-kx*dx(temp),-ky*dy(temp))
fluxdensity_temp=integral(q)/(tloustka*vyska)
U=fluxdensity_temp/(tempout-tempin)

2.K-1} {soucinitel prostupu tepla, W.m-

flux_p=vector(-deltax*dx(p),-deltay*dy(p))
fluxdensity_p=integral(j)/(tloustka*vyska)
S=fluxdensity_p/(pout-pin)

INITIAL VALUES
temp=temp_ini {pocatecni teplota}
p=p_ini {pocatecni parcialni tlak vodnich par}

EQUATIONS
temp: dx(kx*dx(temp))+dy(ky*dy(temp))-Gw*cw*dt(temp)=0
p: dx(deltax*dx(p))+dy(deltay*dy(p))-M/(R*temp)*dt(p)=0
q: ky*dx(temp)+kx*dy(temp)+q=0
j: deltax*dx(p)+deltay*dy(p)+j=0

BOUNDARIES
REGION 1 {izolace1}
kx=0.036
ky=kx
cw=950
Gw=110
deltax=0.178e-9
deltay=deltax
start (0,0)
natural(temp)=0
natural(p)=0
line to (izolace1,0)
line to (izolace1,vyska)
line to (0,vyska)
natural(temp)=-htout*(temp-tempout)
natural(p)=-hpout*(p-pout)

```

```

! value(p)=pout
line to close

REGION 2 {OSB}
kx=0.13
ky=kx
cw=1600
Gw=600
deltax=0.00356e-9
deltay=deltax
start (izolace1,0)
    natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB,0)
line to (izolace1+OSB,vyska)
line to (izolace1,vyska)
line to close

REGION 3 {izolace2}
kx=0.0226
ky=kx
cw=1500
Gw=27
deltax=0.002225e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,0)
    natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+izolace2,0)
line to (izolace1+OSB+izolace2,vyska)
line to (izolace1+OSB,vyska)
line to close

REGION 5 {OSB}
kx=0.13
ky=kx
cw=1600
Gw=600
deltax=0.00356e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB+izolace2,0)
    natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+izolace2+OSB,0)
    natural(temp)=-htin*(temp-tempin)
    natural(p)=-hpin*(p-pin)
! value(p)=pin
line to (izolace1+OSB+izolace2+OSB,vyska)
    natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+izolace2,vyska)
line to close

REGION 5 {KVH1}
kx=0.15
ky=kx
cw=2500
Gw=450
deltax=0.001135e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,0)
    natural(temp)=0
        natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+KVHd,0)
line to (izolace1+OSB+KVHd,KVHh)
line to (izolace1+OSB,KVHh)
line to close

REGION 6 {KVH3}
kx=0.15
ky=kx
cw=2500
Gw=450
deltax=0.001135e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,vyska)

```

```

    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska)
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska-KVHh)
line to (izolace1+OSB,vyska-KVHh)
line to close

REGION 7 {KVH2}
kx=0.15
ky=kx
cw=2500
Gw=450
deltax=0.001135e-9
deltay=deltax
start (izolace1+OSB,vyska/2-KVHh/2)
    natural(temp)=0
    natural(p)=0
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska/2-KVHh/2)
line to (izolace1+OSB+KVHd,vyska/2+KVHh/2)
line to (izolace1+OSB,vyska/2+KVHh/2)
line to close

TIME
0 to 36000

PLOTS
for t = 0 by 1000 to 36000
    contour(temp-273.15) as "teplota (st.C)"
    contour(f*100) fixed range (0,100) as "relativni vlhkost vzduchu (%)"
    contour(p) as "parcialni tlak nenasycenych vodnich par (Pa)"
    contour(p0) as "parcialni tlak nasycenych vodnich par (Pa)"
    vector(flux_temp) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
    vector(flux_p) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"
    elevation(p0,p) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "parcialni tlak vodnich par (Pa)" !export
format "#x#b#1" file="tlak vodnich par.txt"
    elevation(temp-273.15) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "teplotni spad (st.C)" !export format
"#x#b#1" file="teplota.txt"
    elevation(temp-273.15) from (0,vyska/4) to (tloustka,vyska/4) as "teplotni spad (st.C)" !export format
"#x#b#1" file="teplota.txt"
    elevation(temp-273.15) from (0,0) to (0,vyska) as "povrchova teplota (st.C)" !export format "#y#b#1"
file="povrchova teplota1.txt"
    elevation(temp-273.15) from (tloustka,0) to (tloustka,vyska) as "povrchova teplota (st.C)" !export format
"#y#b#1" file="povrchova teplota2.txt"
    elevation(f*100) from (0,vyska/2) to (tloustka,vyska/2) as "spad RVV (%)" !export format "#x#b#1"
file="rel.vzdus.vlhkost.txt"
    elevation(f*100) from (0,vyska/4) to (tloustka,vyska/4) as "spad RVV (%)" !export format "#x#b#1"
file="rel.vzdus.vlhkost.txt"

HISTORIES
history (tempin-273.15, tempout-273.15)
history (fin*100, fout*100)
history (temp-273.15) at (0,vyska/2) (izolace1,vyska/2) (izolace1+OSB,vyska/2)
(izolace1+OSB+izolace2,vyska/2) (tloustka,vyska/2) as "prubeh teplot (°C)" export format "#t#r#b#i" file="teplota1.txt"
history (temp-273.15) at (0,vyska/4) (izolace1,vyska/4) (izolace1+OSB,vyska/4)
(izolace1+OSB+izolace2,vyska/4) (tloustka,vyska/4) as "prubeh teplot (°C)" export format "#t#r#b#i" file="teplota2.txt"
history (f*100) at (0,vyska/2) (izolace1,vyska/2) (izolace1+OSB,vyska/2) (izolace1+OSB+izolace2,vyska/2)
(tloustka,vyska/2) as "prubeh rel. vzdus. vlhkosti (%)" export format "#t#r#b#i" file="rvv1.txt"
history (f*100) at (0,vyska/4) (izolace1,vyska/4) (izolace1+OSB,vyska/4) (izolace1+OSB+izolace2,vyska/4)
(tloustka,vyska/4) as "prubeh rel. vzdus. vlhkosti (%)" export format "#t#r#b#i" file="rvv2.txt"
history (temp_KVH1_prum, temp_KVH1_max, temp_KVH1_min,temp_KVH2_prum, temp_KVH2_max,
temp_KVH2_min)
history (f_KVH1_prum, f_KVH1_max, f_KVH1_min,f_KVH2_prum, f_KVH2_max, f_KVH2_min)
history (fluxdensity_temp) as "hustota tepelneho toku (W.m-2)"
history (fluxdensity_p) fixed range (-1e-7,5e-8) as "hustota vlhkostniho toku (kg.s-1.m-2)"
history (U) fixed range (0,0.2) as "soucinitel prostupu tepla (W.m-2.K-1)"
history (S) as "soucinitel prostupu vlhkosti (kg.s-1.m-2.Pa-1)"

```

END