

Tepelně akumulční panel a jeho parametry

Thermal Storage Panel and its Parameters

Bc. Martin Koláček

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Koláček**
Osobní číslo: **A12437**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Integrované systémy v budovách**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Tepelně-akumulační panel a jeho parametry**

Zásady pro vypracování:

1. **Popište problematiku tepelné akumulace budov ve vztahu ke spotřebě energie a možnosti jejich změny.**
2. **Zpracujte možnosti uplatnění tepelně-akumulačních panelů v budovách.**
3. **Porovnejte studie vhodných simulačních prostředí.**
4. **Popište vlastnosti tepelně-akumulačních panelů na bázi modifikovaných parafinů.**
5. **Ověřte problematiku přenosu energie z povrchu panelů.**
6. **Proveďte laboratorní ověření poznatků v laboratoři 54/307.**
7. **Navrhňte simulaci aplikace panelu ve vhodném simulačním prostředí.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. DANIELS, K.: **TECHNIKA BUDOV**. Jaga Group, v.o.s. Bratislava 2003. ISBN 80-88905-63-X.
2. **ASHRAE HANDBOOK** . Díl 1 ? 4 . American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1791 Tutlie Circle, N.E., Atlanta, GA 30 329. ISBN 1-931862-73-7. ISSN 1549-2370.
3. CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol.: **Větrání a klimatizace**. Technický průvodce. ČMT Praha 1993. ISBN 80-901574-0-8.
4. RECKNAGEL, SPRENGER, SCHRAMEK. **Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik**. Ouldenbourg Verlag GmbH, Munchen, 2003. ISBN 3-835673104-7.
5. VALENTA, V. a kol.: **TOPENÁŘSKÁ PŘÍRUČKA 1, 2, 3**. Agentura ČSTZ, Praha 2007. ISBN 978-80-86028-13-2.
6. LABOUTKA, K., SUCHÁNEK, T.: **Výpočtové tabulky pro vytápění. Vztahy a pomůcky**. Vydavatelství Společnosti pro techniku prostředí Praha, 2001. ISBN 80-02-01466-9.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Zálešák, CSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

7. března 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2014

Ve Zlíně dne 7. března 2014

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se v teoretické části zabývá problematikou tepelné akumulace budov, nevýhodami dnešních stavebních materiálů a možnosti jejich řešení. Dále je popsán přenos energie z povrchu materiálů prouděním a sáláním. Hlavní činností je výzkum tepelně akumulacních panelů DuPont™ Energain®, jejich vlastností a možnostmi uplatnění. Jsou, zde také popsány simulační prostředí využívána v oblasti projektování budov. Praktická část se zabývá měřením na soustavě s tepelně akumulacními panely DuPont, zkoumání parametrů, časová konstanta a součinitel přestupu tepla. Vlastnosti akumulacních panelů byly ověřeny simulací.

Klíčová slova:

Tepelná akumulace, akumulacní materiál skupenského tepla, součinitel přestupu tepla, časová konstanta, SolidWorks.

ABSTRACT

This diploma thesis deals in theoretical part definition problems of thermal storage buildings, disadvantages of today's building materials and possible solutions. Is described transfer of energy from the surface of the material conduction and radiation. Main activity is research thermal storage panels DuPont™ Energain®, their properties and possibility of use. Practical part deals with measurement the system with heat accumulation panels DuPont, exploration of the parameters, the time constant and heat transfer coefficient. Features storage panels were validated simulation.

Keywords:

Heat accumulation, latent heat storage material, heat transfer coefficient, time constant, SolidWorks.

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Zálešákovi, Csc, za odborné rady při měření a zpracování celé práce. Dále bych chtěl poděkovat také panu Ing. Stanislavu Sehnálkovi za cenné připomínky a pomoc se simulací.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ | 9 |
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 1 TEPELNÁ AKUMULACE BUDOV | 13 |
| 1.1 BUDOVY S NÍZKOU TEPELNOU AKUMULACÍ..... | 14 |
| 1.2 ÚSPORA ENERGIE, ZAJIŠTĚNÍ TEPELNÉ POHODY..... | 14 |
| 1.2.1 Tepelná zátěž..... | 15 |
| 1.2.2 Akumulace tepla..... | 16 |
| 1.2.3 Vliv slunečního záření na průběh teploty v místnosti..... | 17 |
| 2 PŘENOS ENERGIE | 19 |
| 2.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM | 19 |
| 2.1.1 Stacionární vedení tepla | 19 |
| 2.1.2 Nestacionární vedení tepla | 20 |
| 2.1.2.1 Diferenciální rovnice vedení tepla – první řád | 20 |
| 2.1.2.2 Diferenciální rovnice vedení tepla – druhý řád | 23 |
| 2.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM..... | 25 |
| 2.2.1 Součinitel přestupu tepla | 25 |
| 2.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM | 28 |
| 2.3.1 Výměna tepla sáláním..... | 29 |
| 2.3.2 Přestup tepla sáláním..... | 30 |
| 3 TEPELNĚ AKUMULAČNÍ PANELE | 31 |
| 3.1 PCM AKUMULAČNÍ MATERIÁLY | 31 |
| 3.1.1 Rozdělení PCM materiálu | 32 |
| 3.2 VLASTNOSTI PANELE NA BÁZI MODIFIKOVANÝCH PARAFÍNŮ | 33 |
| 3.3 UPLATNĚNÍ TEPELNĚ AKUMULAČNÍCH PANELE V BUDOVÁCH..... | 35 |
| 4 STUDIUM VHODNÝCH DOSTUPNÝCH SIMULAČNÍCH PROSTŘEDÍ | 40 |
| 4.1 SIMULACE BUDOV V TECHNICE PROSTŘEDÍ | 40 |
| 4.2 SIMULAČNÍ TEST STAVEBNÍ ENERGETIKY (BESTEST)..... | 40 |
| 4.2.1 SolidWorks..... | 41 |
| 4.2.2 Comsol Multiphysics | 42 |
| 4.2.3 ESP-r | 43 |
| 4.2.4 Astra MS software..... | 44 |
| 4.2.5 TRNSYS | 45 |
| 4.2.6 ANSYS Fluent | 45 |
| 4.2.7 NEi Nastran | 46 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 47 |
| 5 MĚŘENÍ TEPELNĚ AKUMULAČNÍHO PANELU | 48 |
| 5.1 POPIS LABORATOŘE D307 A MĚŘÍCÍCH POMŮCEK | 48 |
| 5.2 IDENTIFIKACE SOUSTAVY A NASTAVENÍ PID REGULÁTORU | 50 |
| 5.2.1 Experimentální měření na tepelné soustavě PT100/400°C..... | 50 |
| 5.2.2 Nastavení PID regulátoru tepelně akumulčního panelu | 52 |
| 5.2.3 Identifikace panelu chlazení 35 °C..... | 54 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3 | EMISIVITA POVRCHU MATERIÁLU | 55 |
| 5.3.1 | Měření emisivity | 56 |
| 5.3.1.1 | Metoda využívající kontaktní teploměr | 56 |
| 5.3.1.2 | Metoda využívající termokameru | 57 |
| 5.3.2 | Měření emisivity na akumulacním panelu | 57 |
| 5.4 | OHŘEV PANELU TOPNÝMI FÓLIEMI | 58 |
| 5.4.1 | Součinitel přestupu tepla | 59 |
| 5.4.2 | Časová konstanta..... | 62 |
| 5.4.3 | Měření termokamerou | 65 |
| 5.5 | ZMĚNA POVRCHU AKUMULAČNÍHO PANELU | 67 |
| 5.5.1 | Měření termokamerou | 67 |
| 5.5.2 | Časová konstanta..... | 70 |
| 5.5.3 | Součinitel přestupu tepla | 71 |
| 5.5.4 | Ohřev vodou ze zásobníku | 73 |
| 6 | SIMULACE AKUMULAČNÍHO PANELU | 76 |
| 6.1 | NÁVRH APLIKACE PANELU V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ..... | 76 |
| 6.1.1 | Aplikace modelu tepelně akumulacního panelu | 77 |
| 6.2 | SIMULACE MODELU AKUMULAČNÍ DESKY | 79 |
| 6.2.1 | Model na stěně | 80 |
| 6.2.2 | Model na podlaze | 82 |
| 6.2.3 | Úprava modelu | 83 |
| 6.3 | MODELOVÁ SITUACE LABORATOŘE D307 | 86 |
| | ZÁVĚR | 88 |
| | ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ..... | 90 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 92 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 95 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 96 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 99 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 100 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| <i>Symbol</i> | <i>jednotka</i> | <i>význam</i> |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Q | J | Teplo |
| m | kg | Hmotnost |
| c_p | J.kg.K ⁻¹ | Měrná tepelná kapacita |
| θ | °C | Teplota |
| t | s | Čas |
| d | m | Tloušťka |
| a | m ² .s ⁻¹ | Teplotní vodivost |
| λ | W.m ⁻¹ .K ⁻¹ | Tepelná vodivost |
| x,y,z | 1 | Prostorové souřadnice |
| R | m ² .K.W ⁻¹ | Tepelný odpor |
| Bi | 1 | Biotovo číslo |
| Fo | 1 | Fourierovo číslo |
| Lc | m | Charakteristický rozměr |
| ρ | kg.m ⁻³ | Hustota |
| h | W.m ⁻² .K ⁻¹ | Součinitel přestupu tepla |
| q | W.m ⁻² | Hustota tepelného toku |
| Nu | 1 | Nusseltovo kritérium |
| Gr | 1 | Grashofovo kritérium |
| Pr | 1 | Prandtlovo kritérium |
| g | m ² .s ⁻¹ | Tíhové zrychlení |
| β | K ⁻¹ | Součinitel teplotní roztažnosti |
| ν | m ² .s ⁻¹ | Kinematická viskozita |
| η | Pa.s | Dynamická viskozita |
| T | K | Absolutní teplota |
| E | W.m ⁻² | Intenzita záření |
| σ | W.m ⁻² .K ⁻⁴ | Stefan-Boltzmannova konstanta |
| ε | 1 | Emisivita |
| τ | s | Časová konstanta |
| $a \times b \times c$ | m | Šířka, délka, výška |

ÚVOD

Tepelně izolační vlastnosti staveb se staly v současné době jednou z hlavních priorit v oblasti úspory energií a zajištění tepelné pohody. Spousta firem již nabízí celou škálu izolačních materiálů, postupně dochází i k snižování tloušťky těchto materiálů s cílem zajistit ještě vyšší izolační schopnosti. Velkou oblibou se staly dřevostavby, které díky lehkým konstrukcím umožňují velmi rychlou výstavbu, mnohdy i s cenově nižšími náklady, než představují těžké cihelné konstrukce.

Problémem je však v opomíjení tepelně akumulčních vlastností. Lehké konstrukce i přes využití dostatečných izolačních materiálů zaznamenávají velmi špatné akumulční vlastnosti. Horší akumulční vlastnosti vykazují také těžké konstrukce, jako jsou tvárnice nebo i cihly. U dřevostaveb je to patrné v případě horkých letních dnů, kdy dochází k přehřívání místností, to následně vede k využívání klimatizačních jednotek, které poté představují navýšení spotřeby energie. Právě současný trend izolovat dům a aplikovat co nejlépe izolující okna, zapříčiňuje hromadění tepla i v zimním období.

Právě možnost využít teplo, které představuje tepelnou zátěž nebo i ztrátu, je v dnešní době snižování spotřeby energie staveb velmi aktuální. Na trhu se objevují materiály, které umožní špatné akumulční vlastnosti eliminovat a v jistých případech slouží i k chlazení.

Práce se zabývá problematikou tepelné akumulace a výzkumem parametrů tepelně akumulčních panelů DuPont™ Energain®, které jsou aplikovány v tepelné soustavě v laboratoři UTB Zlín. Nejprve je důležité zajistit správnou regulaci ohřevu těchto panelů. K využití vyšší teploty soustavy je nutné nastavit PID regulátor a zajistit nízký překmit teploty, kvůli maximální teplotě panelů. Parametry tohoto panelu byly určovány z průběhu chlazení. Na panelech bude provedeno také měření pomocí termokamery, s následnou změnou povrchu panelu (natření barvou) a porovnání změny emisivity povrchu na vliv přestupu tepla.

K ověření naměřených a vypočtených poznatků bude provedeno vytvoření téměř totožného modelu akumulčního panelu v prostředí SolidWorks. Zde je nutno nejprve ověřit stacionární chování modelu a porovnat je s reálnými hodnotami panelu, následně model nastavit tak, aby parametry odpovídal reálnému panelu. Pak lze simulovat reálné chování modelu v místnosti, a to i v případě jednoduššího modelu v různých kombinacích a umístěních v místnosti.

Cílem práce je určit parametry tepelně akumulčního panelu a simulací ověřit získané vlastnosti s možností následné studie chování akumulčních desek v místnosti. Práce na těchto panelech bude pokračovat i v navazujícím doktorském studiu, kde bude probíhat měření panelu také ve funkci chlazení. A dále výzkum povrchových emisních a konvektivních parametrů se zřetelem k řízení přenosu energie mezi prostředím a tepelně akumulčním prvkem.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPELNÁ AKUMULACE BUDOV

Tepelná akumulace je důležitou vlastností budovy, představuje hromadění tepla v konstrukcích, které se při poklesu teploty následně uvolňují do prostoru, tedy odevzdávají teplo zpět. K předání naakumulovaného tepla dochází například při přerušeném vytápění, intenzivním větráním, nebo v případě letního období následkem poklesu teploty venkovního vzduchu během noci. Principem akumulačních vlastností je, ochlazenému vnitřnímu vzduchu, nebo poklesu venkovní teploty, zajistit aby nedocházelo k citelnému ochlazení povrchu vnitřních stěn. Teplotní spád vnitřního a vnějšího prostředí budovy dosahuje mnohdy velmi vysokých hodnot, konstrukce je během celého roku ohřívána nerovnoměrně, přesto stabilizaci teploty akumulovaným teplem zajišťuje jen část konstrukce.

V současné době se většina staveb zaobírá především vysokou úrovní tepelné izolace, což mnohdy zapříčiňuje, že tyto stavby se vyznačují velmi nízkou tepelnou akumulační schopností. Hlavní problém je ve využívání konstrukčních materiálů, především na bázi dřeva s kombinací izolačních látek. Například dřevostavby, kde skelet domu je tvořen dřevěným rámem, příčky jsou tvořeny tzv. sendvičovou konstrukcí s kombinací izolačních materiálů, polystyren a minerální vlna. Další stavby, které disponují horšími akumulačními vlastnostmi, jsou zděné konstrukce využívající pórobetonové tvárnice.

U takovýchto konstrukcí tak dochází k velmi rychlé odezvě na změnu vnitřní a vnější tepelné zátěže. Tepelná izolace samozřejmě minimalizuje tepelnou výměnu budovy s vnějším prostředím, ovšem tepelné ztráty v zimě způsobují zvýšení spotřeby energie, nebo naopak v létě tepelné zisky zapříčiňují přehřívání prostoru.

Možným řešením úspory energie a zvýšení tepelné pohody v budově, jsou akumulační materiály skupenského tepla, PCM (Phase Change Materials) materiály měnící skupenství. Těmito materiály může být voda, parafín, solné hydráty, umožňují absorbovat, zadržet a poté uvolnit určité množství energie. Tato energie může být ve formě tepla i chladu, k této změně dochází při zdánlivě malé teplotní změně. Jedná se o změnu fyzikálního skupenství daného materiálu, především z pevného skupenství na kapalné. Při této změně skupenství dochází k velké spotřebě energie, materiály ji odebírají z okolního prostředí, tedy dochází k tepelné akumulaci.

1.1 Budovy s nízkou tepelnou akumulací

Tepelná akumulace budov zjednodušeně popisuje problém, který nastává v konstrukcích budov. Tyto problémy jsou spojeny s časově proměnlivým průběhem teplot a tepelných toků. Nejen proměnlivý průběh venkovních teplot působící na povrchovou teplotu konstrukce, ale i přerušené vytápění, nebo i intenzivní větrání způsobují, že tepelný stav v konstrukci budovy i jednotlivých místnostech je neustálý. Lze říct, že tepelná akumulace vyjadřuje řešení tepelně technických problémů staveb, vzhledem ke skutečným podmínkám. V technice je však velmi často uplatňován přístup za idealizovaných podmínek, podmínky za ustáleného stavu. U některých případů je to však jediný možný způsob, nelze řešit daný problém detailněji.

Použití odlehčených konstrukcí budov (dřevo, pórobetonové tvárnice), zapříčinilo významnější změnu tepelného stavu v obvodových konstrukcích v porovnání s těžkými konstrukcemi (cihly) ,a to v případě stejných izolačních schopností. Kupříkladu, kolísání vnější teploty vzduchu o ± 5 °C, tato změna vyvolá v případě použití cihelné stěny kolísání teploty na vnitřním povrchu stěny jen o $\pm 0,5$ °C, v opačném případě v použití lehké konstrukce je to až $\pm 1,8$ °C. Horším případem je otopná přestávka, kde u lehké konstrukce v porovnání s cihelnou konstrukcí je pokles teploty na vnitřní straně stěny velmi vysoký. Přerušování vytápění a následně výrazný pokles teplot v případě lehkých konstrukcí, byl hlavním podmětem k hodnocení staveb, nejen z hlediska tepelné izolace, ale i tepelné akumulace. [4]

1.2 Úspora energie, zajištění tepelné pohody

Zvýšení tepelně akumulačních vlastností budov může zajistit, nejen úsporu energie, ale také zajistit tepelnou pohodu, nedochází tak k přehřívání místností. Spotřeba energie na vytápění a chlazení představuje téměř 70 % celkové spotřeby všech energií. Možnost, jak snížit energii na vytápění nebo minimalizovat potřebu chlazení, má vysoký potenciál pro budoucnost v oblasti spotřeby energie a snižování emisí CO_2 .

Využití akumulačních materiálů, ať už jsou implementovány přímo během stavby, nebo jsou instalovány dodatečně, umožňují udržovat stabilní klima uvnitř místnosti. Mohou tak zajistit snížení typického kolísání teplot, jehož výsledkem je snížení spotřeby energie pro vytápění i chlazení. Místnost, která je vybavena PCM materiály, dokáže

v letním období snížit teplotní špičky uvnitř budovy až o 6 °C, snížení spotřeby energie až o 15 %, náklady na klimatizaci se sníží až o 35 %.

V oblasti dřevostaveb je využíváno dřevovláknitých desek a izolací. Předností takovýchto materiálů je nejen vysoká tepelně izolační a akustická vlastnost, ale také i schopnost tepelné akumulace. Především v letním období dokážou tyto materiály zpomalit prostup tepla konstrukcí. Výhodou je také ekologičnost, hlavní dřevní surovina je vyráběná technologickým procesem nevyužívající žádné škodliviny. [13]

1.2.1 Tepelná zátěž

Tepelná výměna mezi zdrojem s vyšším energetickým potenciálem a vnitřním prostorem budovy se označuje jako tepelná zátěž. Lze ji dělit podle zdroje na tepelnou zátěž vnitřní a vnější. Tepelné toky vnějšího prostředí působí skrz stěnové konstrukce budovy, ale především skrz prosklené části konstrukce (okna). Tato složka je tedy tvořena zejména sluneční radiací, ostatní tvoří konvekce a infiltrace venkovního vzduchu.

Tepelné zisky, které jsou tvořeny vnitřními zdroji tepla, jsou složeny ze složek produkce tepla osobami, stroji, zařízení a tepelnými zisky ze sousedních místností. Produkce tepla strojů a zařízení je tvořena produkcí tepla svítidly, tepelnými zisky ze strojů a přístrojů, tepelnými zisky z proudění látek a přepravy materiálů a ostatní zdroje tepelných zisků.

Tepelná zátěž místnosti se tedy skládá ze dvou částí, konvekční a radiační zátěže. Konvekční tepelnou zátěž představuje tzv. volná konvekce. Jde o volné proudění vyvolané pouze rozdílem teplot, jednoduše řečeno, jedná se o tepelnou energii přijatou přímo vzduchem místnosti. Tato tepelná energie se tak stává tepelnou zátěží pro systém chlazení. Konvekční tepelná zátěž působí také na akumulární materiály uvnitř konstrukce místnosti. Zátěž tak v závislosti na akumulárních schopnostech těchto materiálů a prostupu tepla působí tlumivě, je schopna snižovat teploty v místnosti.

Radiační složka tepelné zátěže působí prostřednictvím vlnového záření, ať už krátkovlnného, nebo dlouhovlnného tepelného záření. Ovlivnitelnost teploty vzduchu v místnosti není přímá, protože energii záření musí nejprve pohltit absorbující materiály a následně ji transformovat na konvekční tepelný tok. [1]

Tepelná zátěž způsobuje nárůst teplot interiéru, proto je nutno využívat klimatizačních zařízení, nebo nuceného větrání. Omezit tyto metody, kompenzace nárůstu teplot, lze právě využitím akumulace tepla.

1.2.2 Akumulace tepla

Akumulaci tepla, lze definovat jako dočasné uložení tepelné energie. Zjednodušeně jde o nahromadění tepla v určitém tělese, konkrétně ve stavební konstrukci, kde při poklesu teploty v okolním prostoru dochází k odevzdání tepla do místnosti. Při plánování budov lze minimalizovat použití chladících zařízení, nebo dokonce se jim vyhnout úplně, a to především díky velmi dobrým akumulačním vlastnostem konstrukčních materiálů.

Akumulace tepla je důležitá právě kvůli vzniku tepelné zátěže uvnitř budovy, ať v důsledku sluneční radiace, nebo při samotné změně teploty v místnosti. V těchto případech se prostřednictvím časově závislé funkce akumulace tepla mění zátěž tak, že z časové funkce zátěže vzniká časová funkce potřeby chladu. U výpočtů tepelné zátěže je akumulace tepla zohledněna použitím různých přístupů, jako jsou, akumulační součinitel místnosti, nebo akumulační součinitel vnější stěny. Místnost zachycuje na vnitřních obvodových stěnách teplo ze sluneční radiace, které na místnost působí prostřednictvím oken, tzv. přímé a difuzní sluneční záření, teplo z osvětlení, od osob, ze strojů (tepelné záření). Tepelné záření proniká v závislosti na konstrukci stěny a časovém průběhu intenzity záření více, nebo méně do hloubky stěny, přičemž přispívá k zvýšení povrchové teploty stěn. Stěny poté na sebe působí vzájemným sáláním. Dle teploty vzduchu v místnosti a teploty stěn dochází k přenosu tepla konvekcí mezi stěnou a vzduchem a naopak.

V místnostech je často velmi proměnlivá teplota vzduchu, což znamená při zvýšení teploty, snížení tepelné zátěže v důsledku akumulace tepla. Naopak dochází-li ke snížení teploty v místnosti, znamená to zvýšení tepelné zátěže v důsledku uvolňování akumulovaného tepla. Hlavním znakem těchto tepelných toků je zpětný tepelný tok, konvekční odevzdání tepla tedy nastává na stejné straně stěny, jako příjem tepla. [1]

Množství akumulovaného tepla závisí na měrné tepelné kapacitě, velikosti změny teploty a množství akumulačního materiálu. Lze jej vyjádřit matematicky:

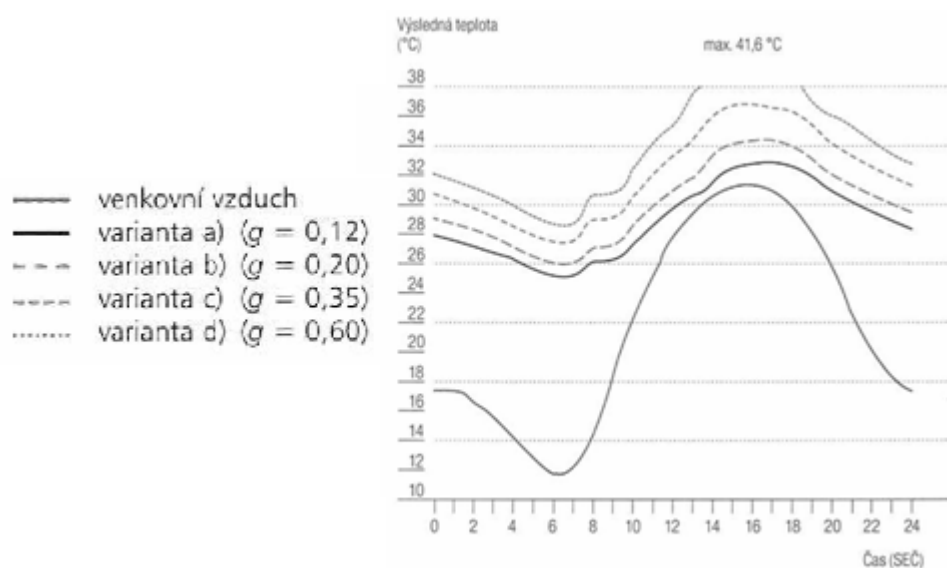
$$Q = m \cdot c_p \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (1.1)$$

- kde Q akumulované teplot v J
 m hmotnost akumulčního materiálu v kg
 c_p průměrná měrná tepelná kapacita v rozdílu teplot θ_1 a θ_2 v $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 θ_1 počáteční teplota v K
 θ_2 konečná teplota v K

[21]

1.2.3 Vliv slunečního záření na průběh teploty v místnosti

Množství sluneční energie a difuzního záření dopadajícího do místnosti značně závisí na dosažené celkové propustnosti okna. Celková propustnost sluneční energie se značí g .



Obrázek 1 Průběh teploty v místnosti po 5 dnech slunného letního počasí. Teploty v místnosti se udávají jako operativní teploty, tedy s přihlédnutím k povrchovým teplotám povrchů stavebních konstrukcí. [1]

Obrázek 1 představuje očekávaný průběh teploty během letního dne, při jižní orientaci místnosti se středně velkou schopností akumulace tepla v závislosti na různé celkové propustnosti sluneční energie. Z obrázků jsou patrné velké rozdíly v protisluneční ochraně, mezi nejnižší a nejvyšší (žaluzie nebo závěsy) celkové propustnosti. Maximální teplotní

rozdíly mezi protisluneční ochranou mohou být až 10 K, to z hlediska tepelné pohody uvnitř místnosti představuje vysoký rozdíl.

[1]

Na základě hodnocení z hlediska vlivu slunečního záření, je patrný vyšší nárok na dimenzování větrání a chladicího zařízení, což představuje vyšší investiční náklady na stavbu samotnou. Využití akumulčních materiálů umožní snížit zvýšení teploty uvnitř místnosti v letních dnech akumulací této tepelné energie do konstrukce.

Rozdílné chování z hlediska tepelné akumulace bude různé, je-li místnost prosklená v celé výšce, nebo zda je vyžita parapetní konstrukce. Velmi zjednodušeně to lze označit, jako „zvýšení“ akumulční schopnost místnosti snížením množství slunečního záření pronikajícího do interiéru. Snižovat využívání denního světla není příliš vhodné, a to nejen z hlediska správného fyziologického, ale i psychologického fungování organismu, které pro člověka denní světlo představuje. Z hlediska časové analýzy, je snížení teploty v důsledku akumulace závislé na orientování místnosti na světové strany.

Pro zvýšení akumulčních schopností místností je vhodné přes noc, kdy je venkovní vzduch chladný, účelově větrat. Lze tak výrazně snížit spotřebu energie v oblasti větrání a chlazení, ochlazovat místnost v noci umožní, aby se dosáhlo ještě lepší schopnosti akumulace.

[1]

2 PŘENOS ENERGIE

Mechanismus sdílení přenosu tepla se dělí na tepelnou výměnu vedením, tzv. kondukcí, prouděním a sáláním.

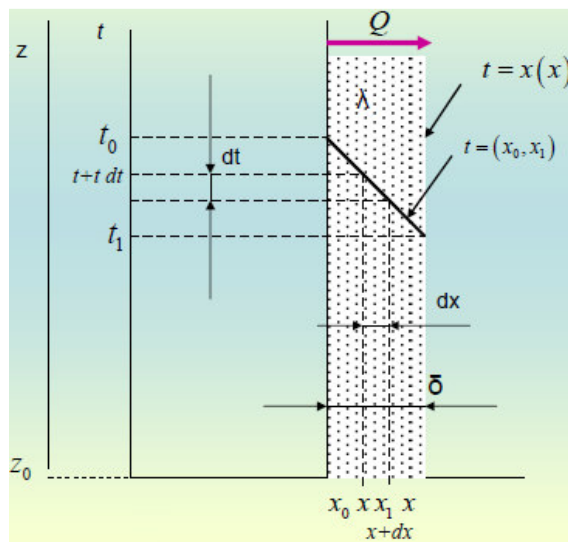
2.1 Sdílení tepla vedením

V případě vedení tepla dochází k předávání energie, kdy částice látky v oblasti s vyšší teplotou, předávají část své energie prostřednictvím vzájemných srážek, částicím v místech s nižší teplotou. V této části procesu se částice nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Sdílení tepla spočívá v přenosu tepla ve směru klesající teploty, jedná se tedy o děj způsobený interakcí mezi sousedícími částicemi daného tělesa.

2.1.1 Stacionární vedení tepla

V případě vedení, kdy se teplota v určitém místě a čase nemění, se jedná o ustálený teplotní stav tzv. stacionární vedení tepla. Základním zákonem vedení tepla je Fourierův zákon

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \quad (2.1)$$



Obrázek 2 Rozdělení teploty t napříč deskou, teplotní profil

q - vyjadřuje množství tepla, které projde jednotkou plochy kolmo na směr proudění za jednotku času, nazývá se hustota tepelného toku. Množství tepla se vyjadřuje jako výkon, proto se vyjadřuje ve Watech u hustoty tepelného toku jako ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Teplotní gradient $\frac{d\theta}{dx}$ označuje poměr přírůstku teploty $d\theta$ k vzdálenosti dx mezi izotermními plochami ve směru rovnováhy, izotermní plocha je geometrické místo bodů o stejné teplotě. Gradient neboli teplotní růst je dán mírou změny teploty v určitém místě, označuje se ve směru poklesu teploty záporným znaménkem, nazývá se teplotní spád. V rovnici Fourierova zákona záporné znaménko značí, že tepelný tok proudí proti směru teplotního gradientu. [2], [3]

Součinitel tepelné vodivosti λ ve $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, charakterizuje tepelnou vodivost dané látky. Tepelná vodivost je schopnost látky, nebo konstrukce vést teplo, jedná se o rychlost, s jakou se teplo šíří konstrukcí z teplejší části do chladnější. Součinitel představuje měrnou tepelnou vodivost, je definována jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád, předpokládá se, že směr šíření tepla je pouze v jednom směru.

Je závislý na mnoha faktorech, na vlhkosti, střední teplotě, objemové hmotnosti, tloušťce a pórovitosti materiálu. U většiny stavebních materiálu je hlavním kritériem tepelně izolačních vlastností, tepelný odpor R ve $\text{m}^2\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.2)$$

Tepelný odpor charakterizuje ustálený tepelný stav ve stěně. Jedná se však o ideální případ, kdy tepelný stav prostředí na obou stranách stěny je časově stálý.

2.1.2 Nestacionární vedení tepla

2.1.2.1 Diferenciální rovnice vedení tepla – první řád

Teplotní stav nestacionárního, nebo-li neustáleného vedení tepla znamená, že se teplota v určitém místě mění s časem. Nestacionární vedení tepla je popsáno Fourierovou rovnicí vedení tepla společně s počátečními a okrajovými podmínkami.

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \theta + Q^{(g)} \quad (2.3)$$

V případě kdy lze předpokládat, že teplota tělesa nezávisí na souřadnicích, ale pouze na čase, lze použít pro řešení vedení tepla diferenciální rovnici prvního řádu.

$$\frac{d\theta}{(\theta - \theta_f)} = -\frac{\alpha A}{\rho V c_p} dt \quad (2.4)$$

Integrovaní diferenciální rovnice 2.4, získáme rovnici 2.5 charakterizující časový průběh teploty uvnitř tělesa.

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_i - \theta_\infty} = e^{(-Bi.Fo)} \quad (2.5)$$

kde θ počáteční teplota v °C

θ_i dosažená teplota v °C

θ_∞ teplota v ustálení v °C

Biotovo číslo vyjadřuje, zda se teplota uvnitř tělesa značně liší od povrchové teploty, platí jak pro ohřev, tak i chlazení, jedná se o bezrozměrný parametr, který charakterizuje bezrozměrný součinitel přestupu tepla. Pro analýzu se využívá charakteristická délka, jenž je vyjádřena jako poměr objemu k ploše tělesa.

$$Bi = \frac{h.Lc}{\lambda} \quad (2.6)$$

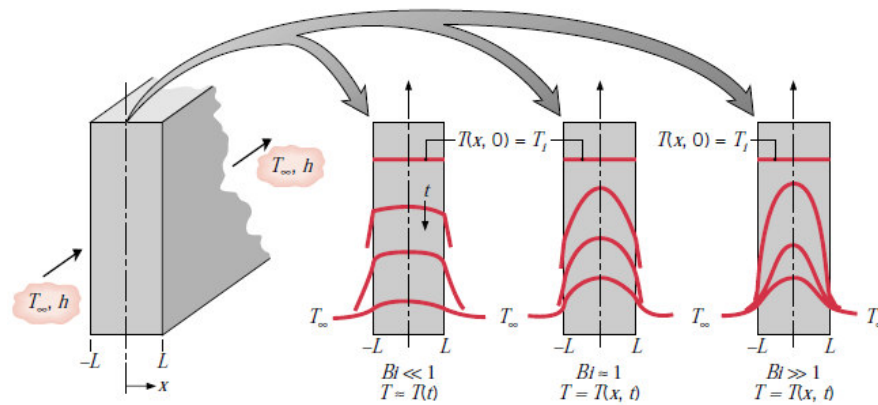
kde L_C charakteristický rozměr dán poměrem objemu a plochy tělesa v m

Biotovo číslo lze také chápat jako poměr proudění na povrchu tělesa k vedení uvnitř tělesa. Představuje poměr vnitřního odporu tělesa k vedení tepla s vnější odolností proti přestupu tepla.

Analýza předpokládá rovnoměrné rozložení teploty v každém bodě tělesa, to lze dosáhnout v případě, kdy je odpor vedení nulový. Tedy hodnota Biotova čísla je rovna nule, nebo přibližně nulová. Z tohoto předpokladu vychází, že čím je hodnota Biotova čísla menší, tím je tato analýza přesnější. Součinitel přestupu tepla je ve většině případů brán s 20 % nejistotou. Předpokládat, že jeho hodnota je konstantní, je velmi sporné a to zejména pro nepravidelnou geometrii těles. Proto bylo stanoveno kritérium, kdy lze použít tuto analýzu.

$$Bi < 0,1 \quad (2.7)$$

Je-li splněna tato podmínka, zůstává teplota uvnitř tělesa vzhledem k okolí v rozmezí rozdílu 5 %. Analýza, řešící problematiku přenosu tepla z povrchu materiálu za podmínky 10, se nazývá Lumped System Analysis, dále jen LSA. [2]



Obrázek 3 Rozložení teplot uvnitř stěny při ochlazování, dle hodnoty Biotova čísla [3]

Je-li teplota v různých částech tělesa rozdílná, tak v takovýchto případech vedení tepla je rozložení teploty v tělesech funkcí času a polohy. Využívá se bezrozměrný čas neboli Fourierovo číslo F_O , které charakterizuje nestacionární přestup tepla.

$$F_O = \frac{a \cdot t}{L^2} \quad (2.8)$$

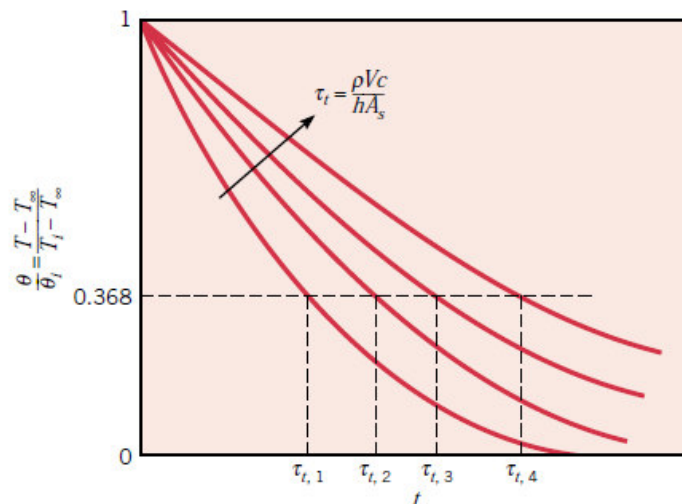
kde t doba od počátku změny teplot na povrchu v s

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (2.9)$$

[2]

Teplotní vodivost rovnice 2.9, vyjadřuje úměrnost mezi časovou a prostorovou změnou teploty. Je závislá na teplotě, vlhkosti, objemové hmotnosti, je-li teplotní vodivost vyšší, tím rychleji se vyrovnávají teploty v tělesech.

Fourierovo číslo nabývající konečnou hodnotu v ($F_O > 0$ a $F_O < \infty$) znamená, že v konstrukci probíhá časová změna teploty a tepelného toku. Matematickým a fyzikálním rozbohem lze snadno dojít k závěru, že nelze počítat s limitními hodnotami Fourierova čísla. Fourierovo a Biotovo číslo charakterizují problematiku přenosu tepla vedením.



Obrázek 4 Přechodový děj teploty, LSA metoda pro různé časové konstanty [3]

Parametr τ , v grafu viz Obrázek 4, značí tzv. teplotní časovou konstantu. Jedná se o vyjádření času ze součinu Fourierova a Biotova čísla. Hodnota časové konstanty je rovna 36,8 % z celkové změny chladnutí. Vyjadřuje dynamické vlastnosti dané soustavy, čas potřebný k dosažení konečné asymptotické hodnoty. Lze určit aproximací danou rovnicí $1 - e^{-1} = 0,63$. [3]

2.1.2.2 Diferenciální rovnice vedení tepla – druhý řád

Diferenciální rovnice vedení tepla popisuje časové a prostorové rozložení teploty v tělese. K stanovení tepelného toku proudící tělesem, musí být k dispozici rozložení teploty v jeho místech, což právě stanovuje diferenciální rovnice vedení tepla. Vychází se z tepelné bilance elementárního objemového prvku s rozměry v souřadném systému dx , dy , dz . Předpokládá se, že tento prvek je stejnorodý a neobsahuje žádné zdroje ani úniky tepla, tepelné účinky prvku jsou konstantní, nezávislé na teplotě a místě.

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) dx \cdot dy \cdot dz = c_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.10)$$

Pro trojrozměrný tvar diferenciální rovnice vedení tepla platí:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}\right) \quad (2.11)$$

Diferenciální rovnice řešící konkrétní případy je nutno doplnit počátečními a okrajovými podmínkami. K určení teplotního pole v tělese určitého časového okamžiku, je

nutno znát rozdělení teploty na počátku řešení rovnice tzv. počáteční podmínka. Okrajové podmínky jsou geometrický tvar tělesa, jeho fyzikální vlastnosti a vzájemné tepelné vazby mezi okolím a povrchem tělesa.

V případě sdílení tepla se rozlišují určité typy okrajových podmínek. Prvním typ podmínky popisuje pro každý časový okamžik rozložení teploty na povrchu tělesa, druhá podmínka řeší plošnou hustotu tepelného toku, který je rozložen na povrchu tělesa v jednotlivých časových okamžicích. Třetí podmínka je vyjádřena výměnou tepla mezi okolním prostředím a povrchem tělesa. Čtvrtá podmínka popisuje šíření tepla při ideálním dotyku dvou těles.

Lze odvodit z diferenciální rovnice vedení tepla zjednodušený typ rovnice vedení tepla.

$$\frac{\theta(x,\tau)-\theta_e}{\theta_p-\theta_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \left\{ \sin \mu_n - \frac{Bi}{Bi+1} \left[\sin \mu_n + \frac{1}{\mu_n} (\cos \mu_n - 1) \right] \right\}}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \left(\mu_n \cdot \frac{x}{d} \right) \cdot e^{(-\mu_n^2 \cdot Fo)} \quad (2.12)$$

kde θ_p teplota stěny pro souřadnici $x=0$ v °C
 θ_e venkovní teplota pro souřadnici $x=d$ v °C
 x souřadnice vymezující polohu tloušťky stěny
 μ je člen rovnice (2.13)

$$\cotg \mu = \frac{\mu}{Bi} \quad (2.13)$$

Rovnici 2.13 je charakteristická rovnice, lze ji řešit graficky nebo aproximací, z rovnice je patrné že počet hodnot μ je nekonečně velký. Vyšší hodnota n tím se μ blíží hodnotě $(n - 1)\pi$. Blíží-li se hodnota Biotova čísla nekonečnu platí pro $\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2}$. Tyto čísla jsou charakteristická pro chladnutí nebo ohřev stěny při konstantní teplotě na jejím povrchu. Jestliže Biotovo číslo má velmi malou hodnotu, pak tangenta úhlu se blíží k nekonečnu, tedy kořeny charakteristické rovnice mají hodnotu $\mu_n = (n - 1)\pi$.

2.2 Sdílení tepla prouděním

Přenos tepla prouděním se rozděluje na volné a nucené proudění. Volné proudění vzniká, když pohyb kapaliny nebo plynu je způsoben rozdíly v hustotě látky vyvolanými její rozdílnou teplotou. V případě nuceného proudění je příčinou pohybu rozdíl tlaků vytvořeny tzv. uměle, jde o případ využití čerpadla nebo ventilátoru. Přenos energie prouděním představuje stav, kdy dochází ke styku kapaliny nebo plynu s povrchem pevné stěny. Při sdílení tepla tak dochází k ochlazení nebo ohřevu, nebo-li přestupu tepla ze stěny do kapaliny nebo z kapaliny do stěny. Obvykle ovšem dochází ke sdílení tepla prouděním, v jádru tekutiny a současně i vedením.

K popisu přestupu tepla mezi určitou tekutinou a stěnou se využívá Newtonova ochlazovacího zákona, platí i pro ohřev, kterým je definován součinitel přestupu tepla h ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Součinitel přestupu tepla charakterizuje přenos tepla mezi tekutinou a pevným povrchem při jejich přímém styku. Je závislý na teplotě stěny a tekutiny, tvaru obtékajícího tělesa, směru proudění vzhledem k povrchu, rychlosti proudící tekutiny, velikosti a rozložení teplot v mezní vrstvě. Nejnižších hodnot je dosahováno v případě volné konvekce, tedy pouze při rozdílu teplot. Naopak nejvyšších hodnot dosahuje součinitel přestupu tepla při změně skupenství, jako je var nebo kondenzace. V případě, kdy stěnu obtéká vzdušina, je součinitel přestupu tepla složen z části vzniklé přestupem tepla konvencí a radiací. Stanovit součinitel přestupu tepla lze pomocí řešení Fourierovy-Kirchhoffovy rovnice pro teplotu, rovnice toku a kontinuity, jedná se však o velmi obtížné řešení, proto se často využívá kritériálních vztahů.

2.2.1 Součinitel přestupu tepla

Výměna tepla tedy šíření tepla prouděním, je popsáno Newtonovým zákonem.

$$q = h_c \cdot (\theta_s - \theta_o) \quad (2.14)$$

kde h_c součinitel přestupu tepla prouděním ve $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

θ_o, θ_s , teplota vzduchu a povrchu konstrukce v $^{\circ}\text{C}$

Součinitel přestupu tepla prouděním charakterizuje výměnu tepla při proudění libovolné tekutiny i vzduchu kolem pevného nebo kapalného povrchu. Čím vyšší hodnota přestupu tepla, tím je větší tepelný tok proudící ze vzduchu do konstrukce nebo naopak. Pro stanovení součinitele přestupu tepla je důležité o jaký druh proudění se jedná, o volné

nebo nucené. Volná konvekce vzniká v důsledku gravitačních sil, naopak nucená konvekce vzniká v důsledku působení tlakových sil.

U volné konvekce v případě použité tepelné soustavy, se využívá empirická rovnice pro proudění podél svislé konstrukce v neohraničeném prostoru.

$$Nu = C(Gr.Pr)^n \quad (2.15)$$

kde c, n konstanty stanovené dle Tabulka 1

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \Delta\theta \quad (2.16)$$

kde Gr Grashofovo číslo vyjadřuje poměr vztlakových, třecích a setrvačných sil působících v kapalině.

$\Delta\theta$ rozdíl teploty vzduchu a povrchu konstrukce v K

$$Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (2.17)$$

Pr – Prandtlovo číslo je měřítkem podobnosti rychlostních a teplotních polí.

$$Nu = \frac{h \cdot l}{\lambda} \quad (2.18)$$

Konstanty C a n , jsou závislé na součtu hodnot $Gr.Pr$. Tento vztah platí pouze, je-li hodnota Prandtlota čísla $Pr \geq 0,7$. Při výpočtech bylo pracováno se vzduchem, kde hodnota $Pr = 0,73$, vychází z tabulek vybraných vlastností suchého vzduchu. Lze tuto hodnotu ověřit i výpočtem. Charakteristický rozměr l , počítáno pro soustavu akumulčních panelů, což představuje výška. V případě volného proudění, kde rychlost samotného proudění je produkována pouze vztlakovými silami, nezávisí Nusseltovo číslo na Reynoldsově kritériu, obecně se Prandtlovo číslo pro plyny rovná jedné. Lze tedy pro volnou konvekci říct, že Nusseltovo číslo je funkcí Grashofova čísla.

Tabulka 1 Parametry C, n pro výpočet Nusseltova kritéria

| $Gr.Pr$ | C | n |
|------------------------------------|-------|-----|
| $<10^{-3}$ | 0,6 | 0 |
| $<1 \cdot 10^{-3} \ 5 \cdot 10^2>$ | 1,18 | 1/8 |
| $<5 \cdot 10^2 \ 3 \cdot 10^7>$ | 0,54 | 1/4 |
| $<2 \cdot 10^7 \ 1 \cdot 10^{13}>$ | 0,135 | 1/3 |

Ve stavební praxi probíhá vlivem volné konvekce přestup tepla v rozsahu $Gr.Pr.$ ($2 \cdot 10^7$ $1 \cdot 10^{12}$), z Rovnice (2.15) V případě zkoumání součinitele přestupu tepla na tepelné soustavě s akumulací panely, je jeho hodnota závislá pouze na rozdílu teplot povrchu panelů a okolí. [2]

Pro stanovení součinitele přestupu tepla v případě nucené konvekce, je použita empirická rovnice .

$$Nu = c \cdot Re^n \quad (2.19)$$

kde c, n konstanty stanovené experimentálně

$$Re \quad \text{Reynoldsovo číslo pro které platí } Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

Hodnoty konstant c a n jsou závislé na druhu proudění, obvykle se používají pro turbulentní proudění, hodnoty $c = 0,032$ a $n = 0,8$. Dosazení do Rovnice (2.19) tak dostaneme vztah pro součinitel přestupu tepla při nucené konvekci.

$$h_c = 6,22 \cdot \frac{\nu^{0,8}}{h^{0,2}} \quad (2.20)$$

Konstanta $K = 6,22$ představuje činitel korekce, který zahrnuje jak hodnotu tepelné vodivosti tak i kinematické vazkosti platné při teplotě $\theta_u = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (θ_u – aritmetický průměr teplot na povrchu konstrukce a vzduchu). Pro hodnoty, kdy je tato teplota jiná, se určuje činitel korekce dle Tabulka 2 Činitel korekce v závislosti na určující teplotě. [4]

Tabulka 2 Činitel korekce v závislosti na určující teplotě [4]

| θ_u [$^\circ\text{C}$] | -30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| K | 6,62 | 6,48 | 6,35 | 6,22 | 6,08 | 5,97 | 5,87 |

2.3 Sdílení tepla sáláním

V tomto případě sdílení dochází k přenosu tepla formou elektromagnetického vlnění. Těleso, které přenáší energii formou elektromagnetických vln, přeměňuje vnitřní energii na energii radiální. Druhé těleso naopak absorbuje radiální část energie dopadající na jeho povrch a přemění ho na energii vnitřní. Významné pro šíření tepla je infračervené záření, jejichž vlnová délka se pohybuje 0,78 až 360 μm . Tepelné záření vzniklé z tepelné energie je označováno jako emise, naopak přeměna záření v tepelnou energii je absorpce. Přeměna záření v tepelnou energii je vázána na hmotnost tělesa. Vyzářená energie závisí na vlastnostech zářícího tělesa, nikoliv na jeho okolí. Pro emisi je důležitá teplota zářící plochy a vlastnosti samotného povrchu materiálu.

Energie, která při záření dopadá na jiné těleso, je rozdělena na tři části, část která se odrazí, část tělesem prochází a část je pohlcena. Pohlcená část energie může po určitém čase opět vyzářit. Část, která prošla nebo se odrazila, dopadá na okolní tělesa, kde dochází k pohlcení této energie. Tělesa tak nepřetržitě vyzařují, pohlcují, odrazí a propouští zářivou energii, tento proces představuje sdílení tepla mezi jednotlivými tělesy.

Energie záření může být na povrchu tělesa nerovnoměrně rozložená, proto plošná hustota zářivého toku dopadajícího na ozářenou plochu se označuje jako intenzita záření.

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.21)$$

Sálavost tělesa určuje sálavé teplo, které těleso vysílá, to je dáno teplotou a vlastnostmi daného tělesa. Zároveň dopadá na těleso určité množství energie od jiných těles značeno C_2 . Opět zde dochází k rozdělení, že část tepla těleso pohltí $\xi \cdot C_2$ a zbytek odrazí $(1 - \xi) \cdot C_2$. Součet těchto složek vlastního a odraženého sálavého tepla se nazývá efektivní sálavost tělesa. Ta představuje skutečné množství vysílaného tepla.

$$C_{ef} = C_1 + (1 - \xi) \cdot C_2 \quad (2.22)$$

Úhrnné množství energie vyzařované tělesem je dáno *Stefan-Boltzmannovým* zákonem.

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.23)$$

Kde T je absolutní teplota v Kelvínech, σ je *Stefan-Boltzmannova* konstanta, $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, E_b značí zářivost černého tělesa. Pouze v případě

absolutně černého tělesa lze použít tuto rovnici. Ve skutečnosti je množství energie menší než udává E_b , to je dáno rovnicí.

$$E = \varepsilon \cdot E_b \quad (2.24)$$

Parametr ε značí emisivitu tělesa, hodnota se pohybuje v rozmezí 0-1. Udává podíl plošné sálavosti skutečného tělesa a dokonale černého tělesa. [2],[3]

2.3.1 Výměna tepla sáláním

Vztahy pro výměnu tepla sálání mezi dvěma vzájemně tělesy platí:

$$Q_{12} = C_{vs} \cdot A \cdot \varphi_{12} \cdot \varepsilon_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2.25)$$

| | | |
|-----|--------------------|--|
| kde | Q_{12} | sálavý tok z tělesa 1 na těleso 2 a naopak ve W |
| | C_{vs} | součinitel vzájemného sálání mezi plochami, ve $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ |
| | A_1, A_2 | plocha tělesa 1 a 2 v m^2 |
| | φ_{12} | úhel osálání mezi tělesy 1 a 2 bezrozměrné |
| | T_1, T_2 | termodynamická teplota tělesa 1 a 2 v K |
| | ε_{12} | úhrnná emisivita |

Pro rovnoběžné stěny platí

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.26)$$

V případě, že plocha S_2 obklopuje zcela plochu S_1 platí pro úhrnnou emisivitu:

$$\varepsilon_{12} = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (2.27)$$

2.3.2 Přestup tepla sáláním

Obdobně jako je v případě přestupu tepla prouděním se zavádí veličina, součinitel přestupu tepla sáláním.

$$q_s = h_r \cdot (\theta_s - \theta_o) \quad (2.28)$$

kde q_s hustota tepelného toku sáláním ve Wm^{-2}

h_r součinitel přestupu tepla sáláním ve $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

$$h_r = \varphi_{12} \cdot \varepsilon \cdot 10^8 \sigma \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \quad (2.29)$$

Celkový součinitel přestupu tepla je dán součtem složek konvekcí a sáláním.

$$h = h_c + h_r \quad (2.30)$$

[4]

3 TEPELNĚ AKUMULAČNÍ PANELE

Obvodové stěny většiny budov využívají venkovní zateplení při běžné tloušťce cihelné stěny kolem 45 cm. Mnoho stavebních firem doporučuje využití tvárnic s menší tloušťkou, ovšem se zateplovacím materiálem o tloušťce až 20 cm. Taková konstrukce sice zajistí dostatečný tepelný odpor, větší obytný prostor nebo i nižší pořizovací cenu, ovšem to vše za cenu velmi nízké akumulace. V případě izolování staveb z vnitřní strany se používají jako krycí materiály izolací sádrovláknité, sádrokartonové nebo dřevoštěpové (OSB) desky. Ty dokážou zajistit vhodnou stabilizaci teploty uvnitř místností, to ovšem jen v případě použití větší vrstvy. V případě tloušťky sádrokartonové příčky 2,5 cm (dvojitě použitá běžná sádrokartonová deska) se silnou vrstvou izolace, zajistí konstantní teplotu povrchu stěny s akumulací tepla až 100 kJ.m^{-2} . Obdobné vlastnosti zajistí u dřevostaveb dřevovláknité desky OSB. Při aplikaci několikanásobných vrstev těchto materiálů lze zajistit větší akumulaci vlastností, než je tomu u cihelného zdiva, ovšem jedná se o nepříliš vhodné konstrukční řešení, a to na úkor snižování obytného prostoru, tak i vyšších pořizovacích nákladů. [6]

3.1 PCM Akumulační materiály

Termální materiály, označovány také jako tepelně setrvačné, mají schopnost absorbovat a ukládat teplo. Výkon těchto materiálů určuje tepelná vodivost a tepelná kapacita, dle kterých lze definovat maximální množství tepla, které lze uložit na 1 kg materiálu.

Tradičně používané materiály jsou beton a zdivo, zatímco novou generaci tepelných materiálů představují PCM materiály s mimořádně vysokou tepelnou kapacitou.

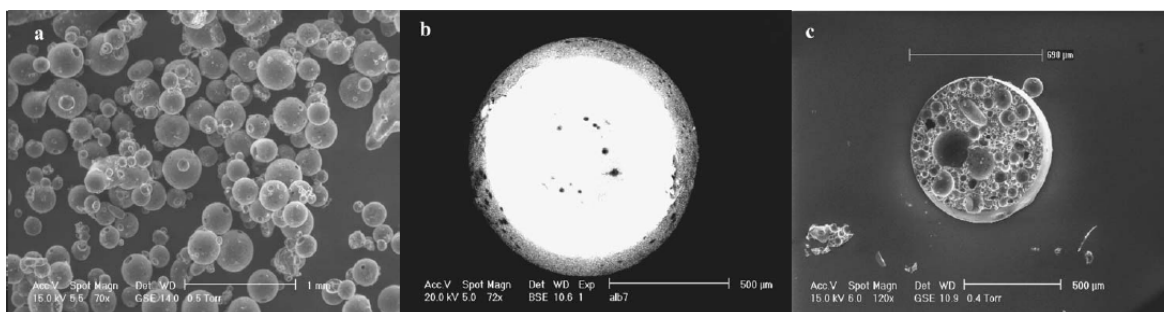
Základními metodami zapouzdření PCM materiálů jsou, Makro, Mikro a Molekulární zapouzdření.

První metoda Makro zapouzdření byla používána v počátku vývoje těchto materiálů. Velké množství PCM v tekutém stavu bylo „nalito“ do plastových obalů, jednalo se například o hydráty soli. Nevýhodou byla obtížná manipulace, bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti při montáži, aby nedošlo k porušení pouzdra.

Zapouzdření Mikro technologii, znamená využití PCM materiálů formou příměsí do současných stavebních prvků, tvárnice, sádrokartony, plastové podhledy nebo i nátěry. Forma příměsí může být formou mikrokapslí, ty mohou být rozptýleny, jak v pevných

látkách, formou prášku, tak také v kapalině. Běžné formy zapouzdření PCM materiálu jsou mezifázová a emulzní polymerace.

Třetím typem je molekulární zapouzdření, jenž vyvinula společnost DuPont. Tato technologie umožňuje velmi vysokou koncentraci polymerní sloučeniny PCM materiálu.



Obrázek 5 Mikroskopický obrázek mikrokapslí parafínového vosku a) pohled na směs, b) zvětšená mikrokapsle c) průřez mikrokapslí [17]

Molekuly této sloučeniny jsou navrženy tak, že spojení jednotlivých molekul vosku vytváří homogenní směs. Molekulární zapouzdření tak umožňuje vysokou odolnost těchto materiálů a panely na bázi parafínového vosku lze řezat, vrtat bez jakéhokoliv úniku materiálu. Parafínové panely od společnosti DuPont, se dodávají s hliníkovou páskou, která slouží k zaletování řezných částí a šroubových spojů. [17]

3.1.1 Rozdělení PCM materiálu

Rozdělení materiálu s fázovou změnou skupenství přeměny kapalina pevná látka:

Organické sloučeniny

- s parafínem
- bez parafínu (estery, vyšší mastné kyseliny, glykoly)

Sloučeniny s parafínem jsou tvořeny směsí uhlovodíků, které při nukleaci využívají velké množství latentního tepla. Tato vlastnost je stěžejní při akumulaci tepla a jejich chemická stálost, nízké objemové změny v průběhu tání a neobsahují žádné toxické látky.

V případě materiálů bez parafínu se jedná o rozsáhlé množství organických látek s rozdílnými vlastnostmi. Nevýhodou je hořlavost, která omezuje využití vyšších teplot. Obecně mají horší teplosměnné vlastnosti než materiály z parafínů a cenově jsou výrazně dražší.

Anorganické sloučeniny

- Hydráty soli

Především hydráty soli jsou důležitou skupinou anorganických látek, které dobře vedou teplo, tedy i vykazují velké množství skupenského tepla. Obsahuje však ve své struktuře molekuly vody, ty se během zahřívání odštěpují. Uvolněná voda během tání rozpouští pevné částice, ty však klesají pro vyšší hustotu na dno pouzdra. V průběhu zpětného procesu je právě problém v usazení soli, která se obtížně dostane do kontaktu s vodou, která je potřebná pro krystalizaci. Po několika cyklech dochází k snížení množství látek, jenž mění skupenství, což vede k sníženému množství možné akumulované energie. Dalším nedostatkem hydrátů soli je v přechlázování, způsobuje to nedostatek činitelů podporující krystalizaci. Možnou komplikací může být tvar a zpracování, které je vlivem struktury látky nutno uzavřít do hermeticky těsného pouzdra, nelze tak měnit tvar (řezání atd).

[14], [21]

3.2 Vlastnosti panelů na bázi modifikovaných parafínů

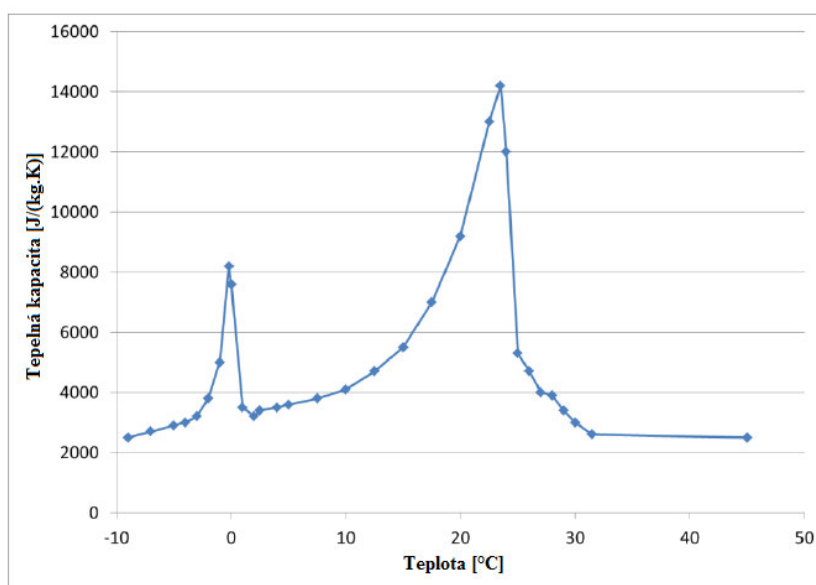
Tepelně akumulační panely DupontTM Energain[®]. Složení těchto panelů tvoří, ze 60 % parafínový vosk, zbylých 40 % je směsný polymer etylenu, povrch těchto panelů je tvořen hliníkovým pláštěm o tloušťce 130 μm na ploše a 75 μm v hranách. Rozměry, ve kterých se panely vyrábí, jsou 1000 x 1198 x 5.26 mm.

Parafín představuje směs pevných uhlovodíků, pro krystalizaci je nutné velké množství latentního tepla, díky čemuž jsou tyto sloučeniny velmi vhodné pro použití jako tepelně akumulační materiály. Další významnou vlastností těchto organických látek je chemická stálost.

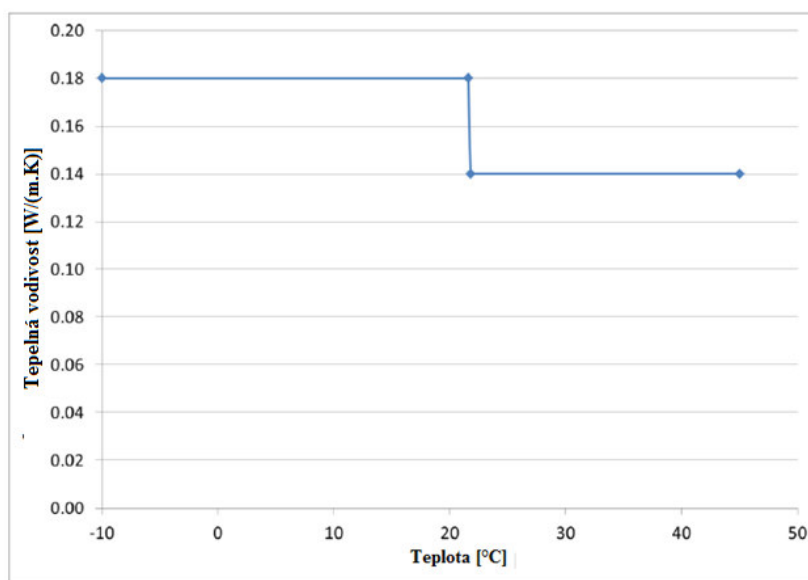
Tyto panely mění své látkové skupenství, čímž uvolňují nebo přijímají teplo, u teploty 22 °C začíná parafínový vosk tát naopak při teplotě 18 °C a nižší je vosk v pevném skupenství. Tato změna skupenství však zapříčiňuje i změnu několika parametrů, a to především měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti. Hodnoty, které uvádí výrobce určují, že pro tepelnou vodivost dochází při zvyšování teploty materiálu ke snižování tepelné vodivosti. Měrná tepelná kapacita se mění mnohem více, nejvyšší hodnoty dosahuje v oblasti, kdy dochází k tání vosku viz Obrázek 6. Teplota vzroste, parafín začne přecházet do kapalné fáze a absorbuje teplo až do 515 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ při teplotním rozsahu 18 až

24 °C. Společnost DuPont uvádí, že spolehlivost těchto panelů co se týče stálých vlastností, je vysoce stabilní a počet cyklů (nabití a vybití), je „neomezený“.

Teplu, které se ukládá do panelu (latentní teplo), jedná se o energii, která se uvolnila při fázové přeměně parafínů. Přechod pevného skupenství na kapalné je dosažen teplotou tání při zvyšujícím se teple, jenž vstupuje do materiálu, během fázové přeměny se tak teplota materiálu nemění. Což představuje právě latentní teplo, které při ohřevu panel pojme a naopak v cyklu chlazení uvolní do okolí. [5], [13]



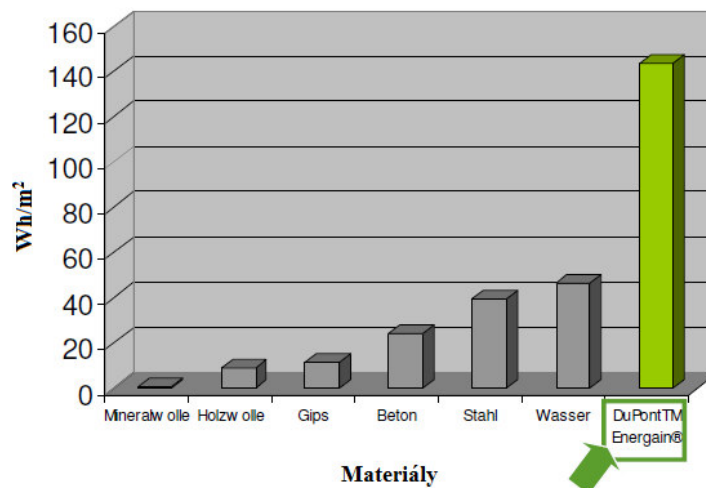
Obrázek 6 Průběh tepelné kapacity v závislosti na teplotě [5]



Obrázek 7 Průběh tepelné vodivosti v závislosti na teplotě [5]

Tabulka 3 Vlastnosti panelu DuPont Energain[13]

| Teplotní vlastnost | Jednotka | Hodnota |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------|
| Tepelná vodivost (pevné skupenství) | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | 0,18 |
| Tepelná vodivost (kapalné skupenství) | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | 0,14 |
| Objemová hmotnost | [kg.m ⁻³] | 810 |
| Plošná hmotnost | [kg.m ⁻²] | 4,5 |
| Bod tání (parafín) | [°C] | 21,7 |
| Hustota akumulované energie | [kWh.m ⁻³] | 62,4 |
| Maximální teplota | [°C] | 40 |



Obrázek 8 Porovnání akumulace tepla, stavební materiály tloušťky 5 mm, v teplotní rozsahu 18-24 °C [13]

[13]

3.3 Uplatnění tepelně akumulčních panelů v budovách

Oblast využití materiálů se změnou je velmi široká, ať jsou to ochranné prostředky, hasičské oblečení, funkční oblečení. Zvláštním případem uplatnění PCM materiálů lze nalézt v oblasti medicíny u přepravních tepelně citlivých boxech.

Termální panely pomáhají zajistit příjemnou teplotu v místnostech a minimalizují teplotní špičky během teplých letních dnů, bez dodatečných nákladů na energii. V případě chladných dnů mohou snižovat spotřebu energie.

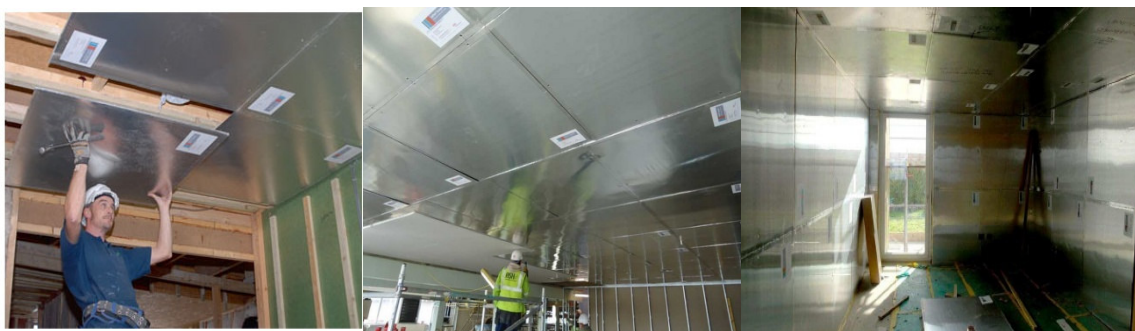
Chlazení pomocí PCM materiálů, kdy během teplých dnů termální panely absorbují nadměrné teplo způsobené solárními zisky, zisky od lidí a ostatních zdrojů tepla způsobuje, že nedochází k přehřívání místností. V průběhu dne, kdy v nočních hodinách postupně okolní teplota klesá, se uložené teplo uvolní, zjednodušeně lze říci, že panely místnost vytápí.

Důležité je optimální využití termálních panelů, to je správné stavební zaměření oken, návrh konstrukce, izolace, správně využít prostor, větrání, stínění a mnoho dalších prvků, které jsou nutné k dosažení správné efektivity akumulace. Pouze stavební materiály na vnitřní straně místností mohou přispět k vysoké efektivitě akumulčních panelů. Nejvhodnější umístění PCM materiálů je na stropě a ve stěnách, lze je však využít i v podlaze.

PCM materiály se velmi dobře doplňují s izolačními materiály. Izolace, které mají velmi nízký součinitel tepelné vodivosti, minimalizují přenos tepla či chladu prostřednictvím obvodového pláště budovy, naopak PCM materiály, jenž mají velmi vysokou měrnou tepelnou kapacitu, absorbují vnitřní tepelnou zátěž.

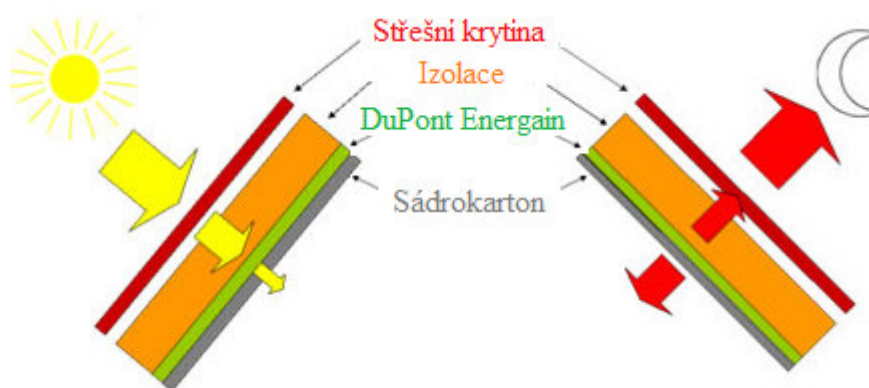
Obecně se PCM materiály zapouzdřují do stavebních materiálů, přímé uchycení na betonové nebo cihelné konstrukce, nebo uložení za sádkartonové příčky. Další aplikací je využití technologie Micro zapouzdření, tedy forma příměsi a následný nános formou omítek nebo impregnací betonových částí. Specifickým případem je použití PCM materiály pod podlahové vytápění, kdy topná tělesa vyhřívají jak podlahu, tak „nabíjejí“ akumulční materiály.

Uplatnění akumulčních panelů DuPont™ Energain® je v dřevostavbách nebo cihlových konstrukcích různé viz Obrázek 8. Výhodou je i plášť z hliníkové fólie, který je dokonale parotěsný, proto lze využít panel také jako parozábranu, nutné je pouze dodržet aplikaci hliníkové pásky na linii dotyku. Celkově lze u těchto panelů zajistit i vysokou tepelně izolační schopnost a to právě díky hliníkové vrstvě, která slouží jako odrazivý termoreflexní materiál. Výhodou je využít vzduchové mezery v oblasti za panelem, tedy neaplikovat panely přímo na podkladový materiál. Při vedení tepla skrz izolaci nebo obvodový materiál tak dochází k přeměně tepla v tepelné záření, které termoreflexní povrch panelů odráží a mezera tak získá vyšší izolační schopnosti. Opakem je pohledová strana těchto panelů, kde právě termoreflexní vrstva brání výměně tepla do interiéru, proto jsou tyto panely aplikovány převážně pod interiérový obklad (sádkartón). [13],[15]



Obrázek 9 Uplatnění PCM DuPont Energain[13]

Vysokou účinnost panelů DuPont Energain ukázalo jejich použití jako dynamickou izolaci podkroví. Především v horkých letních dnech dochází k pronikání tepelného záření skrz střešní konstrukci a následně k přehřívání střešních prostor. Dochází k tomu i v případě dostatečné izolace, velký vliv mají i střešní okna a propustná povrchová úprava střešní krytiny.



Obrázek 10 Aplikace DuPont Energain v střešní konstrukci [13]

Vytvoření dynamického izolačního systému s kombinací tradičních izolačních prvků a s PCM panely DuPont, může výrazně zlepšit vnitřní klimatické podmínky.

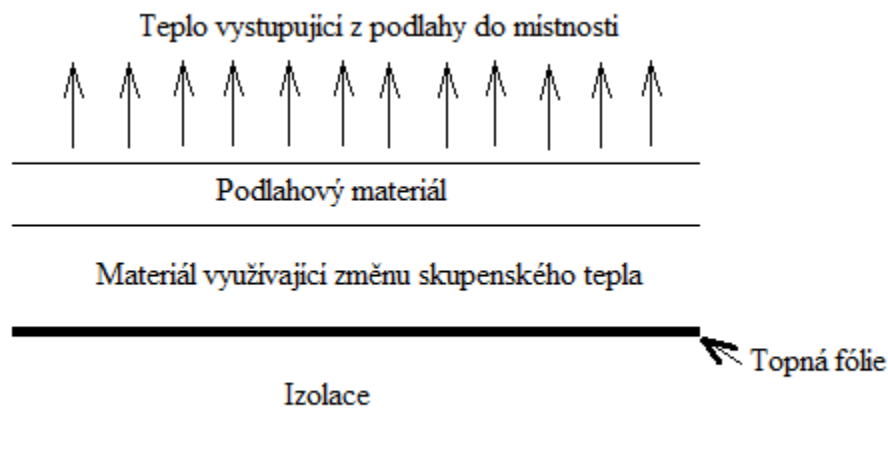
Světový trh nabízí velké množství druhů zapouzdření PCM látek, což vede k nárůstu využití těchto materiálů pro akumulaci tepelné energie. Lze je nalézt jako akumulační médium v solárních zásobnících, nebo jsou využívány při chlazení v klimatizačních zařízeních. Další použití je v trubicích z vysoko hustotního polyetyleny, které jsou PCM látkou naplněny a hermeticky uzavřeny.

[13]

Jako další využití PCM látek je aplikace těchto materiálů do tzv. energetických kuliček. Jedná se o kuličky z polyethylenu nebo z polypropylenu dle použité PCM látky, velikostně se používají 77 mm pro průmyslové aplikace nebo 98 mm pro klimatizace.

Jinou možností, která je v zahraničí velmi používána, jsou PCM stěnové desky, ve kterých jsou přidány pelety vyrobeny právě z materiálu s fázovou přeměnou. Jedná se o klasické stěnové desky využívající se v příčkách, nebo jako opláštění stěnových konstrukcí lehkých dřevěných staveb, například to jsou sádkartonové desky. [21]

Méně častým použitím akumulčních materiálů je uložení PCM materiálů do podlahy s využitím podlahového topení. Nášlapná teplota podlahy v dlouhodobě obývaných místnostech se pohybuje v rozmezí 26-28 °C. Mnoho systémů dnes využívá nízkou vyhřívací teplotu 30-40 °C, tedy ideální pro využití akumulčních materiálů i v případě parafínových desek. Teplo však lze získávat také během dne ze slunečního záření, které dopadá na podlahu a v nočních hodinách při ochlazení se tak následně uvolňuje do místnosti.



Obrázek 11 Příklad využití PCM materiálu v podlahovém vytápění

Problematickou je však mechanická pevnost v případě parafínových desek, které nelze vystavit plnému zatížení podlahy. V případě dřevostaveb a dřevěných stropních konstrukcí využívající roštové uložení podlahového materiálu, by však bylo možné využít i parafínových desek. U pevných podlahových materiálů se využívají granulované PCM příměsi nebo přímo mikrokapsle míchané do stavebních materiálů.

V dnešní době se začaly upravovat běžné děrované cihly tak, že se jejich mezery vyplňují minerální vatou pro zvýšení tepelně izolačních vlastností. Studie Alawadhi zkoumala vliv vyplnění cihel PCM materiálem. Hlavním cílem bylo zajistit nižší tepelný tok z venkovního prostoru skrz cihlové bloky. Výsledky ukázaly, že při umístění PCM materiálu do osy cihly, došlo k snížení tepelného toku téměř o 18 %. Teplotní odezva cihlové zdi plněné PCM při kolísání venkovní teploty, v porovnání s běžnými cihlovými zdmi, byla prokazatelně lepší, právě pro zvýšení tepelné kapacity konstrukce. Takové cihly mají lepší izolační účinek, a to v případě jsou-li vystaveny přímému slunečnímu záření, kdy dochází k tepelné akumulaci i z venkovní strany stěny. [28]



Obrázek 12 Cihly s výplní materiálu PCM [28]

4 STUDIUM VHODNÝCH DOSTUPNÝCH SIMULAČNÍCH PROSTŘEDÍ

Samostatnou kapitolou je popis několika vybraných simulačních prostředí, které se využívají v mnoha technických odvětvích. Jsou zde popsány především nástroje využívající se k přenosu energie a simulaci teplotních závislostí.

4.1 Simulace budov v technice prostředí

V technice prostředí se dnes využívá stále více metod počítačové simulace při projektování, výzkumu, dynamickém chování a hodnocení budov. Mnoho výrobců umožňuje zákazníkům i volně využít různé návrhové, či simulační prostředí. Mnohdy se jedná o velmi zkrácené tzv. Beta verze, které však nevyžadují odborné znalosti a mohou zákazníkovi umožnit návrh, výpočet nebo dokonce simulovat průběhy použitého zařízení. Rozsáhlejší prostředí sloužící projektantům a odborníkům, umožňují použít mnohem širší nabídku, přesnější výpočty. Díky neustálé zvyšujícímu se výkonu počítačů, se tyto metody využívají mnohem častěji. K řešení modelových situací je třeba kratší strojový čas, lze tak dosáhnout nejen časové úspory, ale také zvýšit přesnost výsledku.

Většina simulačních softwarů má rozsáhlou škálu produktů, které se využívají v mnoha technických nebo vědních oborech. Následující kapitoly proto popisují jen hlavní moduly, které jsou vhodné pro použití v oblasti tepelně technických parametrů.

4.2 Simulační test stavební energetiky (BESTEST)

BESTEST neboli The Building Energy Simulation Test, jedná se o projekt vyvíjený mezinárodní energetickou agenturou IEA International Energy Agency, založen na empirické validaci, analytickém ověřování a srovnávání analýz, které se testují na různých simulačních softwarech. Na celém světě je vyvinuta spousta softwarových nástrojů, které využívají různé přístupy výpočtu energetické simulace.

Existuje několik způsobů, s pomocí nichž se hodnotí přesnost simulačních programů. Empirické ověřování umožňuje srovnání výpočtů, z programu s údaji sledovanými na reálné budově. Analytické ověřování naopak srovnává výpočty s výsledky již známého analytického řešení, nebo obecně uznávané numerické metody s omezenými okrajovými podmínkami. Porovnávací testování již představuje samotné porovnávání s jinými simulačními programy, které mohou být považovány za přesnější.

Jako testovací případy slouží různé modely, například specificky nastavený systém prostředí, který je následně aplikován na adiabatický plášť budovy pro delší časový horizont, až roky. Všechny parametry, které srovnávací model představuje, jsou definovány normou ANSI ASHRAE Standard 140:2011, která je schvaluje jako standardní metodu zkoušky pro posouzení počítačového programu. [7], [20]

4.2.1 SolidWorks

Solidworks je velmi rozsáhlý konstrukční systém, jehož základem je tvorba součástí, sestav a výkresové dokumentace. Nevýhodou simulačních nástrojů je náročnost na paměť, už samotný Software je naprogramován tak, aby využíval co největší množství paměti např. tvorba Mesh. Součástí Softwaru je několik nástrojů, jako jsou: SolidWorks Motion, Routing, Simulation a Flow Simulation, a další specifické pomůcky.

Nástroj Flow Simulation slouží pro komplexní simulaci dynamiky tekutin a sdílení tepla. Použití je v oblastech, jako je proudění plynů vzduchotechniky, kapaliny v potrubí a také analýza chlazení uzavřených prostorů nebo exponovaných součástí. Předmětem diplomové práce je simulace termálního panelu a to v případě volné či nucené konvekce, pro tyto případy byl právě využit nástroj Flow Simulation.

Funkce Softwaru Flow Simulation jsou analýza přenosu tepla zářením, vnitřního proudění, rotace referenčního rámce, přechodového proudění, přenosu tepla vedením a mnoho dalších. K řešení výpočtů lze použít stacionární nebo i přechodové analýzy. Je možno počítat teplotní pole, přirozené, nucené konvekce, nebo i radiace působící do okolí. Výsledky těchto řešení lze zobrazit pomocí plošných grafů, proudnic, nebo lze celý průběh animovat, což umožní lépe analyzovat průběh proudění v daném prostředí.

Simulace v nástroji Flow Simulation jsou řešeny pomocí Navierovy-Stokesovy rovnice proudění tekutiny, které definují hybnost a zákon zachování energie pro tok tekutiny. Rovnice jsou také doplněny empirickou závislostí hustoty kapaliny, viskozity a tepelné vodivosti. Podle hodnoty Reynoldsova čísla, je možné určit, jedná-li se o laminární nebo turbulentní tok tekutiny. Přenos tepla v tuhých látkách nebo kapalinách, je v simulaci řešen pomocí diferenciální rovnice nestacionární vedení tepla.

4.2.2 Comsol Multiphysics

Tento simulační program umožňuje modelovat a simulovat širokou škálu fyzikálních jevů, základem je matematické jádro Softwaru Matlab. Používá se v mnoha oblastech vědy a techniky, akustiky, elektromagnetismu, dynamiky tekutin, přenosu tepla, stavební mechaniky a chemického inženýrství. V oblasti stavební mechaniky je možné využít několik modulů, specifických pro danou problematiku, Heat Transfer, Structural Mechanics, Nonlinear Structural Materials, Geomechanics, Fatigue, Multibody Dynamics a Acoustics Module.

Pro modelování přenosu tepla v látkách pevných i kapalných slouží Heat Transfer Module. Zkoumá účinky vytápění, chlazení daného zařízení, komponentů či konkrétních postupů. Model umožňuje v simulačním nástroji studium přenosu tepla vedením, prouděním a zářením. Heat Transfer Module slouží pro různé druhy aplikací, pro tvorbu spotřeby a přenosu tepla nebo energie. Modul obsahuje databázi materiálů, mnoha druhů kapalin a plynů, využívající se pro přesnou analýzu. Vlastnosti materiálů zahrnují například tepelnou vodivost, tepelnou kapacitu a hustotu. Samozřejmě je zde podpora importovat termodynamická data z (Excel, Matlab). Phase Change umožňuje analyzovat rušivé, či náhlé změny materiálu v průběhu analýzy přenosu tepla. Náhlé změny mohou být například změna tepelné vodivosti, nebo tepelné kapacity, což je právě problémem PCM materiálů, kde změna teploty materiálu výrazně mění hodnoty tepelné kapacity. Zásadní význam tohoto modulu je schopnost provádět výpočty energetických bilancí, k dispozici jsou různé jevy, mechanické ztráty, latentní teplo a Jouleovo teplo. Modul zahrnuje přenos tepla vedením v pevných i kapalných látkách, lze definovat závislost tepelné vodivosti jako funkce teploty, podporuje i modelování záření.

Modul Heat Transfer obsahuje popis přenosu tepla v kapalinách a konjugovaného přestupu tepla, tedy přenos tepla v pevných látkách a kapalinách použitých v jednom systému a to jak při laminárním tak i turbulentním proudění. Proudění se počítá na základě hodnoty Reynoldsova kritéria, obdobně jako v případě Solidworks Flow Simulation. Rovnice přenosu tepla jsou automaticky definovány pomocí specializovaného fyzikálního rozhraní, které počítá s rovnicemi přenosu tepla a průtoků tekutin. Tyto rovnice lze přímo detailně zobrazit, a lze tak ověřit fyzikální vlastnosti, jako je tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, hustota a emisivita.

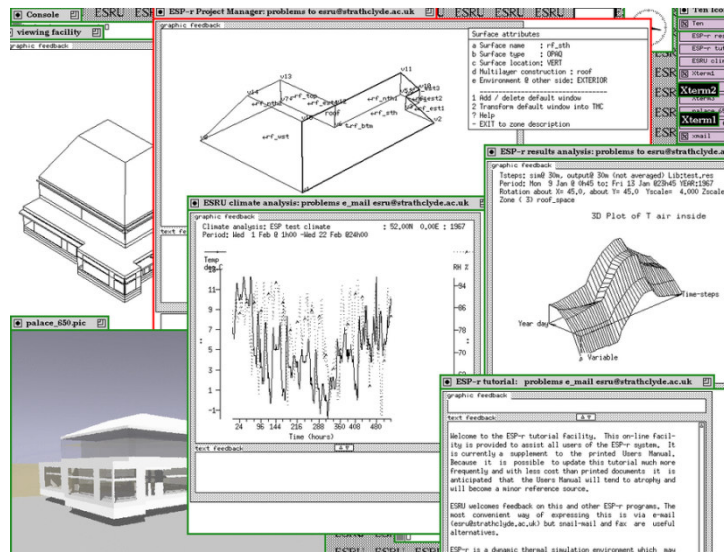
4.2.3 ESP-r

V nekomerčním programu, který je volně dostupný, se jedná o nástroji sloužícím k modelování a stanovení energetické bilance objektu. Simuluje tepelné, vizuální i akustické výkony v budově, lze jej využít také jako zkoumání vlivu emisí na životní prostředí. K provádění hodnocení je systém vybaven modelováním tepla, prouděním vzduchu, vlhkosti a toku energie. Výsledkem studie tak může být znalost chování objektu během celého roku. Podle kterého lze určit optimální výkon zdroje tepla pro zimní období, nebo naopak pro letní období, výkon zdroje chladicího zařízení. Program je určen pro operační systém UNIX s podporou pro Solaris, Linux, OSX 10.5 a 10.6, může být provozován také na systému Windows.

ESP-r se skládá z několika programů, každý přispívá k řízení určitého procesu během simulace. Všechny tyto nástroje jsou řízeny automaticky v Project Manageru dále jen PM. Jednotlivé procesy lze spustit samostatně bez PM, analýzy výsledku pak běží v textovém režimu, kde lze snadno exportovat výsledky formou tabulek. Aplikace lze spouštět v grafickém i textovém režimu. Režim využívající grafické menu je jednoduchý a přehledný pro ovládání, výsledné zprávy se zobrazují v rolovacím okně, ovládání aplikace zajišťuje kontrolní menu. Textový režim je vhodný pro vzdálené ovládání přes síť, nebo v rámci podniku. Lze tak ovládat a zpracovávat modely i jejich hodnocení. Odpadá zde však grafické zpracování pohledů a grafů.

V PM lze definovat různé geometrické problémy, ovšem výhodou tohoto softwaru je možnost importování CAD souborů. Tato podpora se týká souborů DXF, kompatibilita je také s nástrojem AutocadXzip. Jde také provádět export ESP-r do Autocadu, je však nutno dodržet jisté konvence, jako je správné definování vrstev, každá teplotní zóna je v samostatné vrstvě atd.

[25]



Obrázek 13 Prostředí ESP-r [25]

4.2.4 Astra MS software

Jedná se o software pro projektování v oblastech osvětlení, elektrotechniky a vzduchotechniky.

Produkty pro oblast Osvětlení:

| | |
|--------|----------------------------|
| Wills | výpočet umělého osvětlení. |
| Wdls | výpočet denního osvětlení. |
| SunLiS | výpočet oslunění. |

Tyto tři programy brzo nahradí Building Design, který umožní jak návrh a výpočty oslunění, tak návrh umělého nebo denního osvětlení v jednom grafickém rozhraní. Všechny výpočty jsou prováděny dle platných ČSN.

Produkty elektrotechniky:

| | |
|----------|---|
| ELPROCAD | databázový systém pro projektování elektrických zařízení. |
| VEROX | zpracování rozpočtů a specifikací projektů elektrotechniky. |

Produkty Vzduchotechniky:

| | |
|----------|--|
| VzProCAD | graficko-databázový systém pro zpracování projektové dokumentace vzduchotechniky s podporou grafického editoru Autocad, Briscad. |
|----------|--|

4.2.5 TRNSYS

Simulační program, který se používá pro simulace přechodových systémů, dynamickou analýz. Především se jedná o řešení energetické náročnosti budov, foto voltaických, vzduchotechnických či teplovodních systému. Umožňuje řešit algebraické i diferenciální rovnice, které je možno zadat formou vstupního souboru. Program je schopen, pomocí knihoven různých komponentů, modelovat různé situace, jejichž výstupy mohou být reprezentovány jako matematické funkce vstupů. Program provádí výpočet chování systému jako celku a určuje závislosti a vlivy mezi jeho jednotlivými prvky a počasím.

Součástí programu TRNSYS je několik programů. TRNSYS3D umožňuje kreslit více zónové části budov a importovat geometrické útvary, včetně stínování vnitřních pohledů zařízení. TRNBuild rozhraní slouží k vytváření a editaci všech geometrických těles, který je vyžadovaný TRNSYS modelem pro budovy. TRNSED umožňuje vytvářet vlastní grafické rozhraní pro konkrétní aplikace a následně je využít pro uživatele TRNSYS. Uživatelsky nejpoužívanější součásti jsou. IISiBat slouží k vkládání a spojování modulů, dále TRNSHELL slouží k přístupu ke zdrojovým souborům jednotlivých modulů (lze je upravovat nebo vytvářet vlastní). PREBID se využívá k definování tepelně technických vlastností více zónové budovy. [19]

4.2.6 ANSYS Fluent

Společnost ANSYS vyvíjí rozsáhlé množství simulačních softwarů. Používají se především k předvídání chování produktů v reálném prostředí a k jejich samotnému návrhu. Jedním z mnoha produktů této společnosti je simulační software Fluent. Obsahuje široké možnosti modelování, dynamiku proudění tekutin, přenosu tepla, chování zařízení v průmyslových aplikacích, proudění vzduchu, spalování v pecích, tok krve, polovodičová výroba, akustika.

Problematika přenosu tepla v prostředí ANSYS Fluent je řešena dle rovnice přenosu energie, rovnice pro zachování hmotnosti, hybnosti, rovnice energie a také rovnice pro přenos chemické příměsi.

Řešení Navierovy-Stokesovy rovnice probíhá metodou konečných objemů, řešení je poté prováděno adaptivní multigradní metodou. V modelu přenosu tepla lze detailně nastavit 5

teplotních podmínek, tepelný tok, teplotu, proudění, záření, a kombinaci proudění a radiace s okrajovými podmínkami. Ve výpočtech lze zahrnout vliv šíření tepla vedením, prouděním a radiací. Důležitým prvkem tohoto nástroje je definování tepelné kapacity a vodivosti v závislosti na teplotě. [23]

4.2.7 NEi Nastran

Je univerzální nástroj využívající analýzy FEA Finite Element Analysis, tedy metody konečných prvků. Představuje jeden z prvních počítačových programů původně vyvinut pro NASA koncem roku 1960. Slouží k analýze proudění, vlastnosti přenosu tepla z konstrukce a mechanických součástí. Nastran umožňuje provádět celou řadu konstrukčních a tepelných analýz, tyto analýzy jsou obsaženy v pěti základních modulech.

- Lineární statická analýza a přenos tepla v ustáleném stavu
- Modely vzpěru a předpětí (rozšíření Lineární analýzy o možnosti využití vzpěry předpětí)
- Rozšířená dynamika (přechodné, frekvenční analýzy)
- Nelineární analýza (lze analyzovat nelineární chování materiálů při deformaci nebo změně okrajových podmínek)
- Nelineární přenos tepla (nestacionární přenos tepla, volná konvekce, vedení tepla, teplotní radiace)

Modely vytvořené v NEINAstran lze přenášet v CAD programech a jsou také kompatibilní i v prostředí SolidWorks. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 MĚŘENÍ TEPELNĚ AKUMULAČNÍHO PANELU

5.1 Popis laboratoře D307 a měřících pomůcek

Soustava akumulčních panelů je umístěna v laboratoři U54/307 na Fakultě aplikované informatiky UTB ve Zlíně. Místnost o rozměrech 7,3 x 8,65 x 3 m je svou prosklenou částí orientována na jih.

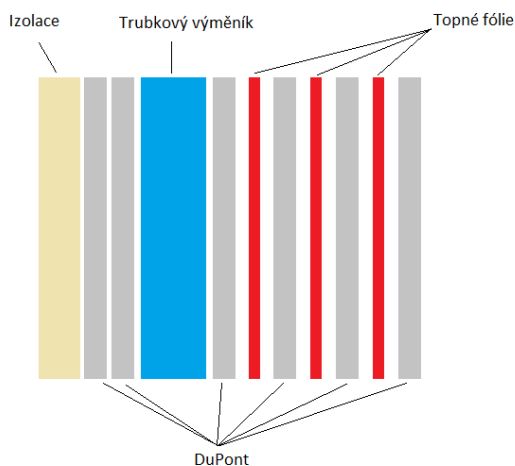


Obrázek 14 Soustava akumulčních panelů v laboratoři D307

Zařízení obsahující PCM panely je tvořena dvěma sestavami. Jedna sestava akumulčního panelu obsahuje 6 vrstev DupontTM Energain[®] panelů ve dvou řadách. Mezi prvními vrstvami jsou umístěny topné fólie, každá o výkonu 600 W, následuje trubkový výměník s rozmístněnými teplotními čidly, vyplněný hliníkovými pláty, zalitým silikonovým kaučukem se zvýšenou tepelnou vodivostí a zadní část tvoří izolace. V laboratoři jsou umístěny dvě takovéto sestavy. Rozměry jednoho panelu jsou:

1,25 x 0,083 x 2,07 m.

[22]



Obrázek 15 Jednotlivé vrstvy uvnitř panelu



Obrázek 16 Měřicí přístroj Almemo 2390-8

Měření teploty uvnitř panelu zajišťuje 6 teplotních čidel PT1000, které jsou umístěny v trubkovém výměníku viz Obrázek 15. U měření teploty na povrchu panelu a v místnosti byl využit měřicí přístroj Almemo 2390-8. Jedná se o univerzální přístroj pro měření fyzikálních a chemických veličin, tvoří jej 5 vstupů pro čidla a 2 výstupy. Bylo využito měření teploty na přední i zadní straně povrchu, 10cm od přední části, měření teploty v místnosti a měření tepelného toku z povrchu panelu. Jako měřicí čidla byla použita drátová čidla NiCr-Ni typ K s teplotním rozsahem -50 až 1000 °C.

K měření povrchové teploty byl také využit infrapyrometr AMIR 7814-20B.

Hustota tepelného toku byla snímána, snímačem FQ A018 C.

Termogramy byly vytvořeny pomocí termokamery EasIR 4 SONEL KT160. Využívá detektor typu FPA nechlazený mikrobolometr, spektrální rozsah 8 až 14 μm , s přesností $\pm 2\%$



Obrázek 17 Termokamera EasIR 4

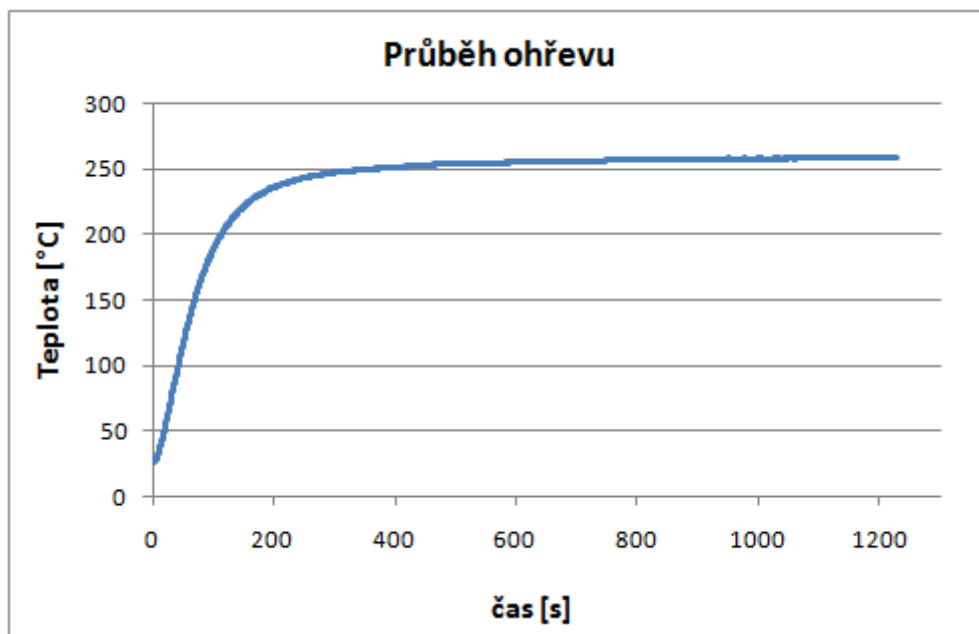
5.2 Identifikace soustavy a nastavení PID regulátoru

Při ohřevu panelů, a to jak topnými fóliemi, tak i teplou vodou ze zásobníku, dochází k vysokému teplotnímu překmitu. Hodnota tohoto překmitu se pohybovala okolo 10 % od požadované hodnoty. Nebylo možné vyhřívat panel na vyšší teplotu než 35 °C, a to kvůli nebezpečí překročení maximální teploty, které jsou schopny panely snést.

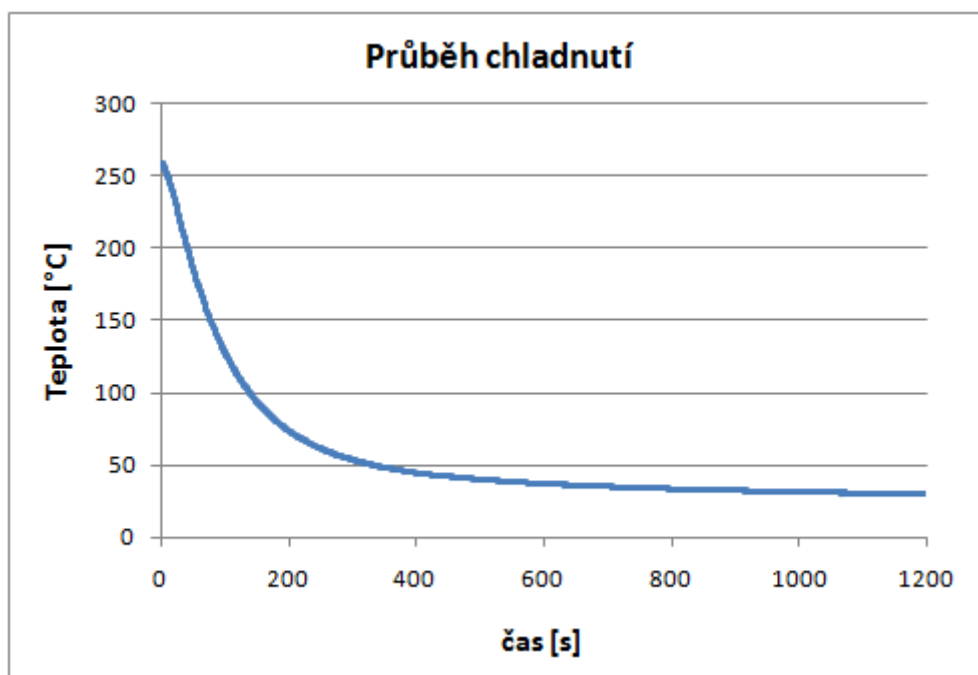
Proto bylo nutné nastavit PID regulátor, který řídil spínání ohřevu v závislosti na průměrné hodnotě teploty uvnitř panelu. Pro správné nastavení regulátoru byla provedena identifikace soustavy z přechodové charakteristiky chladnutí systému.

5.2.1 Experimentální měření na tepelné soustavě PT100/400 °C

K ověření této identifikace bylo provedeno experimentální měření na tepelné soustavě PT100/400 °C v laboratoři U53/310 na Fakultě aplikované informatiky UTB ve Zlíně. Bylo provedeno měření ohřevu a chladnutí daného systému, z naměřených přechodových charakteristik byly určeny statické charakteristiky. Aproximací těchto charakteristik byl zjištěn rozdíl, a to pouze 3 %, tato nepřesnost mohla být zapříčiněna nepřesností měření či ovlivnění soustavy při chladnutí, proto lze zjednodušeně říci, že identifikovat systém z přechodové charakteristiky chladnutí lze.



Obrázek 18 Naměřený průběh ohřevu tepelné soustavy PT400

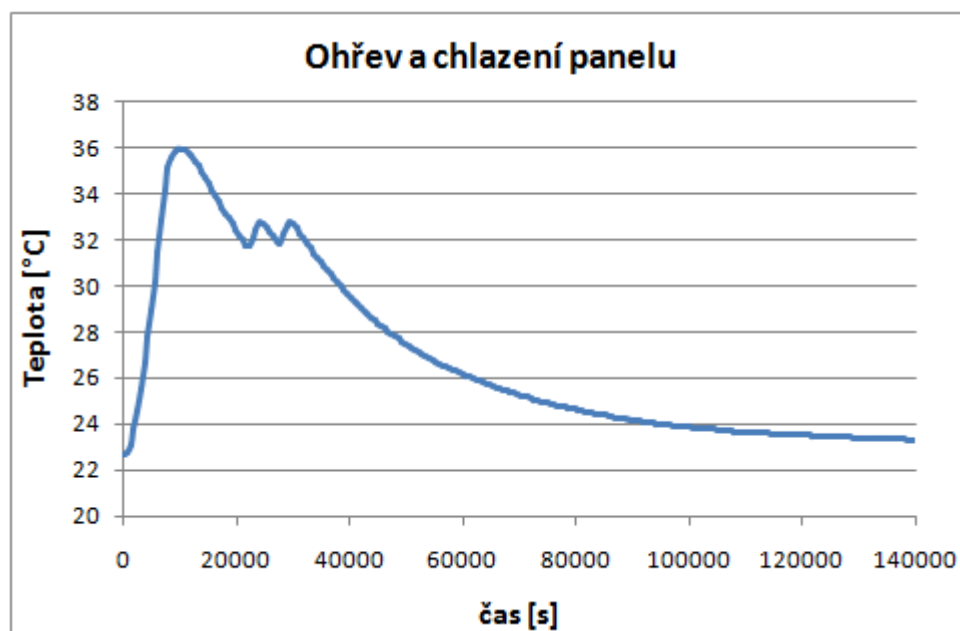


Obrázek 19 Naměřený průběh chladnutí tepelné soustavy PT400

5.2.2 Nastavení PID regulátoru tepelně akumulčního panelu

K identifikaci systému z chladnutí je nutno dosáhnout teploty ustálení, což představuje teplotu v místnosti. Teplota v místnosti je dodržována elektrickými přímotopy společně se zisky od ostatních zařízení. Doba ustálení je velmi dlouhá, při požadované hodnotě panelu 35 °C se přibližně jedná o dobu až 40 hodin. Teplota uvnitř panelů tak byla přibližně stejná jako teplota v místnosti. K identifikaci systému byl použit také Software Matlab a konkrétně systémový nástroj pro identifikaci Ident. Tento nástroj tak umožnil, využít jen část hodnot průběhu chlazení, a nastavením řádu systému jeho identifikace byl schopen dopočítat průběh chlazení, díky čemuž tak bylo možné získat přibližné hodnoty doby ustálení. Porovnání se skutečným ustálením se dosahovalo jen nepatrného rozdílu, teplota skutečného ustálení byla nižší než v simulaci. Problém je v době ustálení, kterou nelze tak přesně simulovat, v průběhu ustalování dochází k tuhnutí parafinových panelů a změně jeho parametrů, jež má vliv na teplotu samotných panelů.

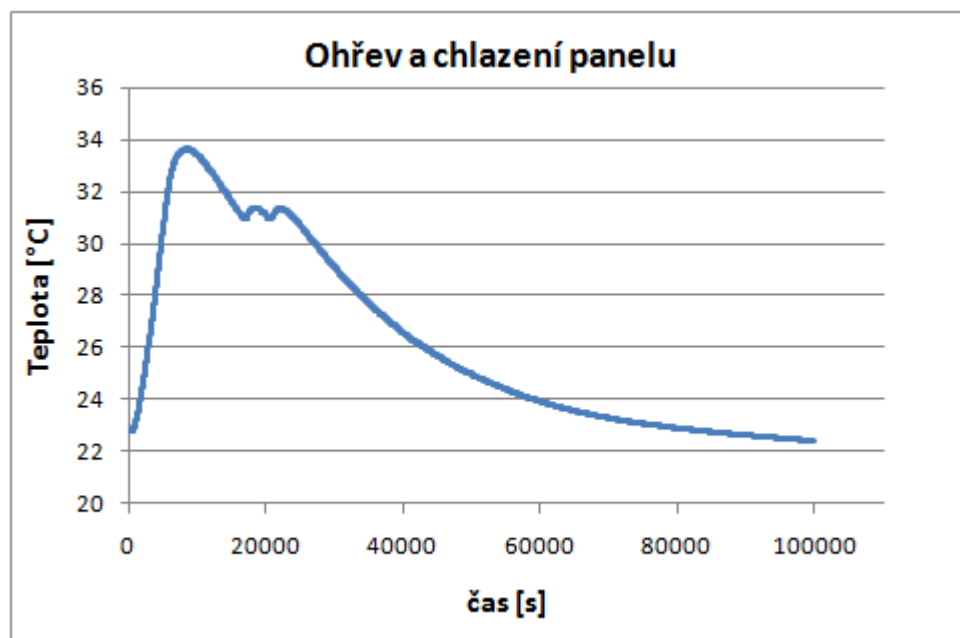
K nastavení regulátoru slouží aplikace FX CommPro LON v síti LonWorks, zde je možno nastavit jednotlivé složky PID regulátoru. Původní nastavení regulátoru pro ohřev bylo: $P = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $I = 150 \text{ s}$, $D = 0 \text{ s}$. V grafu viz Obrázek 20, je patrný překmit, který dosahuje hodnoty 4 °C nad požadovanou hodnotu. Vyšší hodnota časové konstanty integrační složky regulátoru způsobuje delší dohřívání požadované teploty, proto jak je patrné, v grafu teplota kmitá na nepatrně vyšší hodnotě.



Obrázek 20 Ohřev topnými fóliemi požadovaná teplota 32 °C, regulátor nastaven $P = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $I = 150 \text{ s}$, $D = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Provedení několika měření při různých nastaveních regulátoru bylo dosaženo nejvhodnějšího nastavení složek PID, $P=0,1$ °C, $I=30$ s, $D=0$ °C. Bylo dosaženo snížení překmitu až na hodnotu $1,5$ °C, snížena byla i doba ohřevu při udržování žádané teploty.

Teplota uvnitř panelu tak kmitá kolem žádané hodnoty jen nepatrně, ovšem problémem je v posunutí žádané hodnoty na $31,2$ °C, z původně 32 °C viz Obrázek 21 graf naměřených dat. Pro parafínové akumulční panely je důležité nepřekročit hraniční teplotu, což hrozilo při původním nastavení regulátoru, i při udržování žádané teploty docházelo k zbytečnému přehřívání. Nově nastavený regulátor tak umožnil využít ohřev panelu na vyšší teplotu, bez nebezpečí překročení jeho maximální teploty, je nutné ovšem dbát na snížení žádané hodnoty.

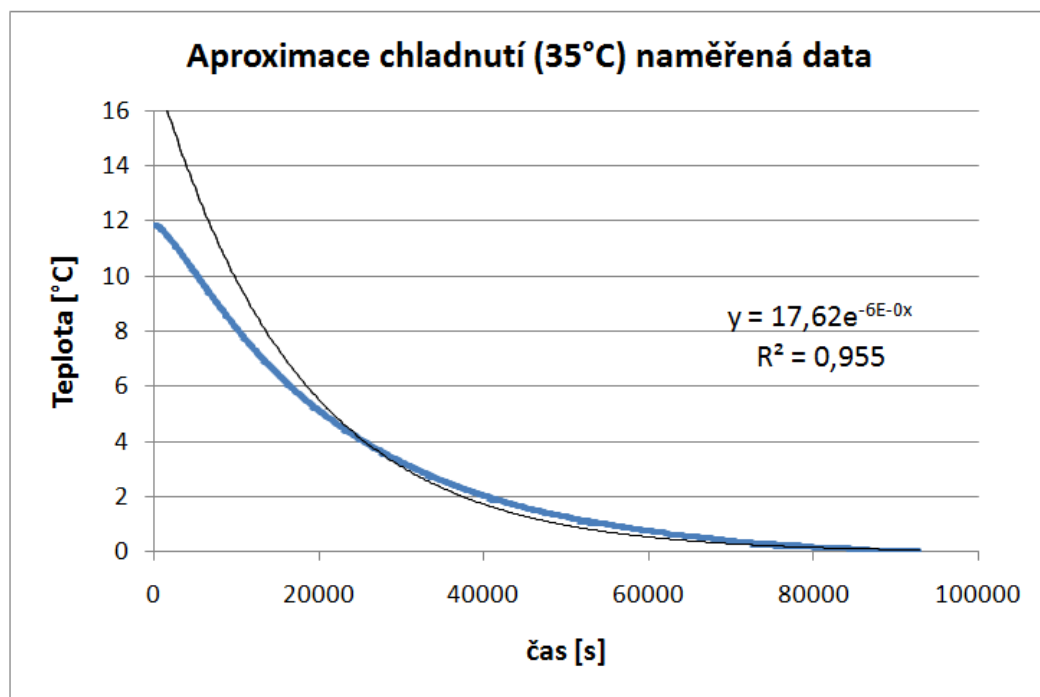


Obrázek 21 Ohřev topnými fóliemi požadovaná teplota 32 °C, regulátor nastaven $P=0,1$ °C, $I=30$ s, $D=0$ °C

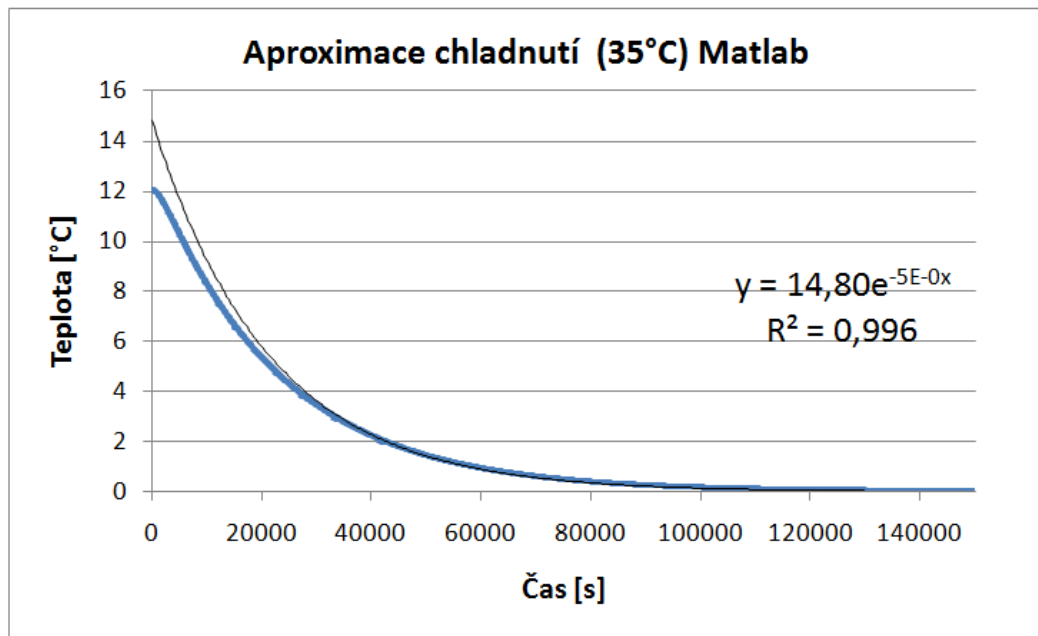
Spínání topných fólií, v případě ohřevu panelu na 32 °C, je doba počátečního ohřevu $1,45$ hod, v tomto čase, kdy topné fólie přestanou topit, je teplota uvnitř panelu 31 °C, u dohřívání na požadovanou teplotu je čas ohřevu pouze 8 min. Předchozí nastavení, kdy regulátor vytvářel v soustavě vysoký překmit, byly hodnoty počátečního ohřevu jen nepatrně vyšší $1,6$ hod, stěžejní je však rozdíl dohřívání na požadovanou hodnotu, který byl 25 min.

5.2.3 Identifikace panelu chlazení 35 °C

Pro identifikaci byly použity hodnoty teploty uvnitř panelu při ohřevu na 35 °C. Pro srovnání byl proveden také výpočet chlazení a to pomocí nástroje Matlab Ident. Z aproximace grafů je patrný rozdíl ve větší přesnosti u vypočtených hodnot, to je dáno především ustálením, které bylo nastaveno na dostatečně dlouhou dobu. V případě měření je velmi obtížné zajistit podmínky pro dostatečné ustálení. Proto byl přenos soustavy určen z vypočtených hodnot chlazení.



Obrázek 22 Aproximace chlazení panelu – naměřená data



Obrázek 23 Aproximace chladnutí panelu – vypočtená data

$$G(s) = \frac{12,055}{(22834,844s+1)(1409,897s+1)} \quad (5.1)$$

Přenos soustavy Rovnice 5.1 tepelně akumulčního panelu byl určen pro možnost nastavení vhodného regulátoru. Jedná se však o změnu softwarové konfigurace nástroje FX Tools řídicí stanice Johnson Controls FX14, ve které je PID regulátor konfigurován. Anebo možnost vytvoření zcela nového regulátoru.

5.3 Emisivita povrchu materiálu

Emisivitu lze chápat jako relativní schopnost plochy vyzařovat elektromagnetické záření odpovídající teploty. Vyjadřuje podíl intenzity vyzařované teplotním zářičem a intenzity vyzařované absolutně černým tělesem o stejné teplotě. Hodnoty jedné dosahuje pouze absolutně černé těleso, běžná tělesa, i když jsou například velmi tmavá, dosahují emisivity zhruba 0,9.

Pojem emisivita lze také chápat jako pohltivost, kterou daný materiál umožňuje. Obecně pro elektromagnetické záření platí, že černé těleso neodráží žádné záření, nýbrž ho pohlcuje. U těles, která jsou pro dané záření nepropustná a mají emisivitu menší než jedna, platí, že z dopadajícího záření pohltí podíl rovný hodnotě emisivity. Ovšem změnou teploty povrchu materiálu může nastat, že pro danou vlnovou délku záření je povrch méně či více pohltivý. Reálný povrch i při neměnné se teplotě pohlcuje i vyzařuje záření o různé

vlnové délce a to s různou účinností. S rostoucí teplotou přibývá vyzařování různých vlnových délek, především krátkých. Právě v těchto teplotách by povrch byl více odrazivý a při zvýšení teploty by nastal pokles emisivity daného materiálu. [2]

Tabulka 4 Emisivita materiálů použitých na soustavě s akumulacími panely [27]

| Materiál | Emisivita ϵ |
|---|----------------------|
| Ocelový plech leštěný (obal soustavy) | 0,1 |
| Hliník leštěný (obal parafínových desek DuPont) | 0,039-0,057 |
| Ocel (vnější spojovací konstrukce) | 0,3 |
| Omítka, sádkarton (stěny a strop místnosti) | 0,9 |
| Černá barva matná | 0,96- 0,98 |

5.3.1 Měření emisivity

Měření emisivity metodou porovnávacího měření lze provádět s kontaktním teploměrem nebo pomocí termokamery.

5.3.1.1 Metoda využívající kontaktní teploměr

U metody s kontaktním teploměrem se využívá dotykového teploměru, kterým se měří povrchová teplota a následně se změří také pomocí infrapyrometru nebo lze využít i termokameru. V přístroji infrapyrometru nebo termokamery se nastavuje hodnota emisivity, a to až do stavu, kdy změřená hodnota teploty se rovná s hodnotou získanou kontaktním teploměrem. Důležitá je samozřejmě přesnost provedení měření, jak dotykovým tak bezdotykovým přístrojem. U dotykového teploměru je nutno zajistit dokonalý styk měřící plochy s povrchem materiálu, u bezdotykového teploměru zajistit přesnost měření danou vzdáleností a samotným pyrometrem. Tato metoda je proto pouze informativní, nelze tak počítat s velkou přesností získané hodnoty emisivity. Tato metoda měření emisivity byla provedena na soustavě akumulčních panelů.

5.3.1.2 Metoda využívající termokameru

Metoda využívající pouze termokamery používá k měření emisivity tzv. emisní pásku. Ta se používá pro zvýšení emisivity povrchu materiálů při měření termokamerou. Páska je neprostupná pro infračervené záření a použité lepidlo nezanechá po odstranění pásky na povrchu žádné nečistoty. V případě určování emisivity se na měřený materiál nalepí část této pásky, která má přesně definovanou emisivitu. S nastavením emisivity pásky se provede změření teploty v místě nalepení pomocí termokamery. Následně se provede měření teploty bez využití pásky, a to s nastavováním emisivity do té doby, než se dosáhne stejné teploty, jenž byla naměřena na emisní pásce. Touto metodou lze zjistit hodnotu emisivity přesněji, než tomu bylo v případě kontaktního teploměru, a to především díky znalosti přesné hodnoty emisivity emisní pásky.

5.3.2 Měření emisivity na akumulčním panelu

Akumulační panely jsou z vnější strany osazeny leštěným pozinkovaným plechem, vlastnosti materiálu nelze určit z tabulkových hodnot, vlivem času, opotřebením, ohříváním a oxidací jsou pozměněny. Proto bylo provedeno měření emisivity a to pomocí infrapyrometru AMIR 7814-20B s využitím kontaktního teploměru. Plocha každého panelu byla rozdělena na tři části, ve kterých bylo provedeno měření teploty viz Tabulka 5 a Tabulka 6. Měření emisivity probíhalo při ohřátí panelu na 35 °C, tedy povrchová teplota dosahovala hodnoty asi 32,3 °C.

Tabulka 5 Měření emisivity infrapyrometr panel 1

| Datum měření: 1.4.2014 12:40:00 | | | | | |
|---------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Plocha 1 | | Plocha 2 | | Plocha 3 | |
| Teplota | Emisivita | Teplota | Emisivita | Teplota | Emisivita |
| [°C] | [-] | [°C] | [-] | [°C] | [-] |
| 29,10 | 0,77 | 31,10 | 0,45 | 33,50 | 0,70 |
| 30,70 | 0,74 | 31,40 | 0,45 | 31,30 | 0,65 |
| 30,50 | 0,75 | 31,50 | 0,45 | 31,80 | 0,70 |
| 30,20 | 0,75 | 31,60 | 0,50 | 32,10 | 0,70 |
| 30,60 | 0,74 | 31,40 | 0,45 | 31,40 | 0,65 |

Tabulka 6 Měření emisivity infrapyrometr panel 2

| Datum měření: 1.4.2014 12:40:00 | | | | | |
|---------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Plocha 1 | | Plocha 2 | | Plocha 3 | |
| Teplota | Emisivita | Teplota | Emisivita | Teplota | Emisivita |
| [°C] | [-] | [°C] | [-] | [°C] | [-] |
| 29,80 | 0,70 | 31,50 | 0,40 | 31,30 | 0,77 |
| 30,10 | 0,70 | 31,30 | 0,40 | 31,00 | 0,70 |
| 30,00 | 0,70 | 31,40 | 0,40 | 31,10 | 0,70 |
| 30,40 | 0,72 | 31,80 | 0,45 | 31,50 | 0,69 |
| 30,20 | 0,70 | 31,40 | 0,40 | 31,20 | 0,70 |

Z naměřených hodnot je patrný velký rozdíl hodnoty emisivity plochy 2, tedy oblast uprostřed panelu a to v případě obou panelů. Ostatní hodnoty emisivity se sice pohybují kolem hodnoty 0,7, ovšem i tato hodnota není přesná, což v případě leštěného plechu by měla být mnohem nižší. Proto bylo provedeno ověření emisivity také pomocí termokamery EasIR 4, kde byla měřena teplota povrchu materiálu, hodnota emisivity byla měněna než nastala shoda teploty termokamery a povrchové teploty měřené kontaktním teploměrem. Hodnota emisivity, která byla naměřena termokamerou byla 0,6, i zde je ovšem nutné brát v potaz přesnost měření teploty termokamerou, která se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$. Nelze tak s jistotou říct přesnou hodnotu emisivity povrchu panelů, a to i přes to, že byly provedeny dvě metody měření emisivity.

5.4 Ohřev panelu topnými fóliemi

Měření na soustavě s akumulacími panely probíhalo při ohřevu s topnými fóliemi. Jedná se o „šetrnější“ metodu ohřevu, jak z hlediska úspory energie tak i času. Rozdíl s ohřevem vodou je, že soustava je vyhřívána pomocí trubkového výměníku, kde je nutno nejprve ohřát vodu v zásobníku (akumulační nádoba 120 litrů) a poté čerpadlem zajistit neustálý průtok vody, jenž celou soustavu ohřívá. Topné fólie Ecofilm-F 615 o výkonu $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, v uzavřeném prostoru dosahuje teploty 40–45 °C. Grafy naměřených dat jsou uvedeny v příloze, měření byla provedena pro žádané hodnoty panelu 32–37 °C.

5.4.1 Součinitel přestupu tepla

Hlavní parametr, který bylo nutno stanovit, byl součinitel přestupu tepla. Jeho hodnota byla vypočtena dle rovnic pro přenos tepla konvekcí a radiací. V průběhu chladnutí dochází k změnám v akumulacích deskách, fázová změna v parafínu. Mění se tak vlastnosti a samotné parametry viz měrná kapacita. Proto jako výchozí hodnoty pro další výpočty byla určena průměrná hodnota součinitele přestupu tepla. Doba vychlazení panelu na teplotu okolí je velmi dlouhá, v případě nastavení požadované teploty 36 °C, to bylo 40 hodin na teplotu 22 °C. Nutné během každého měření bylo zajistit stabilní klimatické podmínky v laboratoři, aby docházelo jen k nejmenším ovlivněním teploty uvnitř místnosti. Během měření ovšem došlo k nepatrným ovlivněním, vlivem výuky nebo zvýšenou venkovní teplotou.

Tabulka 7 Naměřené a vypočtené hodnoty Termální soustava

| Požadovaná teplota panelu | | [°C] | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 |
|------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teplota uvnitř panelu | | [°C] | 31,38 | 32,38 | 33,42 | 34,34 | 35,40 | 36,39 |
| Teplota povrchu panelu | Přední část | [°C] | 29,40 | 30,30 | 31,20 | 32,10 | 33,20 | 33,90 |
| | Zadní část | [°C] | 25,40 | 26,50 | 27,00 | 26,90 | 27,40 | 27,70 |
| Tepelný tok z povrchu panelu | | [W.m ⁻²] | 46,60 | 47,30 | 50,50 | 57,90 | 65,00 | 71,00 |
| Teplota okolí | | [°C] | 21,77 | 22,61 | 22,59 | 22,1 | 22,27 | 22,45 |
| Součinitel přestupu tepla | Konvekcí | [W.m ⁻² K ⁻¹] | 3,220 | 3,220 | 3,340 | 3,510 | 3,610 | 3,67 |
| | Radiací | [W.m ⁻² K ⁻¹] | 0,597 | 0,603 | 0,605 | 0,605 | 0,610 | 0,613 |
| | Σ | [W.m ⁻² K ⁻¹] | 3,817 | 3,823 | 3,945 | 4,115 | 4,220 | 4,283 |

Příklad výpočtu součinitele přestupu tepla, požadovaná teplota panelu 35 °C.

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

$$Nu = 0,135 \cdot \left(\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2} \cdot \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 0,135 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot \frac{1}{273,15 + 0,5(32,1 + 22,1)} \cdot 2,07^3 \cdot (32,1 - 22,1)}{(1,35 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 0,73 \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 282,945$$

$$h_c = \frac{282,945 \cdot 0,0257}{2,07}$$

$$h_c = 3,51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$h_r = \varphi_{12} \cdot \varepsilon \cdot 10^8 \sigma \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$$

$$h_r = 0,1 \cdot 10^8 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\left(\frac{273,15 + 32,1}{100}\right)^4 - \left(\frac{273,15 + 22,1}{100}\right)^4}{(273,15 + 32,1) - (273,15 + 22,1)}$$

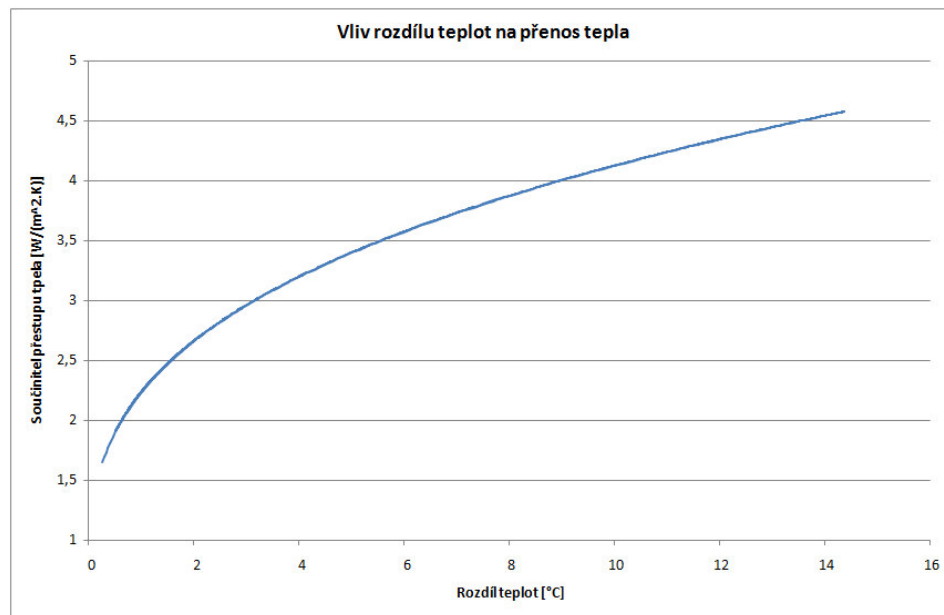
$$h_r = 0,605 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celková hodnota součinitele přestupu tepla dána součtem obou složek:

$$h = h_c + h_r$$

$$h = 3,51 + 0,605$$

$$h = 4,115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$



Obrázek 24 Vliv rozdílu teplot povrchu panelu a okolí na součinitel přestupu tepla

Tabulka 7, zobrazuje rozsah teplot měření na akumulacním panelu, ze kterých byl následně stanoven součinitel přestupu tepla, nutný pro další výpočet. Teplota okolí (místnosti) je průměrná za celou dobu měření, z čehož lze považovat, že byla u jednotlivých měření nepatrně odlišná. Rozdíly jsou způsobeny pouze vlivem venkovní teploty a způsobují zanedbatelný vliv na přestup tepla.

Hodnotu povrchové teploty lze považovat za stejnou, jaká je na povrchu desek DuPont, a to proto, že leštěný pozinkovaný plech má tloušťku pouze 2 mm a vysokou tepelnou vodivost. Ve výpočtu přestupu tepla je možné považovat tuto hodnotu za stejnou i pro výpočet samostatné akumulacní desky. Jediná nepřesnost je pouze v emisivitě, a tu má akumulacní deska nižší vlivem použitím leštěné hliníkové fólie, hodnota součinitele přestupu tepla by tak byla nepatrně nižší, než je tomu v případě přestupu tepla radiací na celé soustavě panelu. Pro výpočet radiační složky přestupu tepla byla emisivita panelu považována $\varepsilon = 0,1$.

Zda-li je rovnoměrně rozložená teplota v každém bodě panelu, bylo ověřeno výpočtem Biotova čísla. Dle určené hodnoty přestupu tepla bylo vypočteno, že Biotovo kritérium splňuje podmínku $Bi < 0,1$. Počítáno bylo pro teplotu panelu 35 °C tedy součinitel přestupu tepla $h = 4,1 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

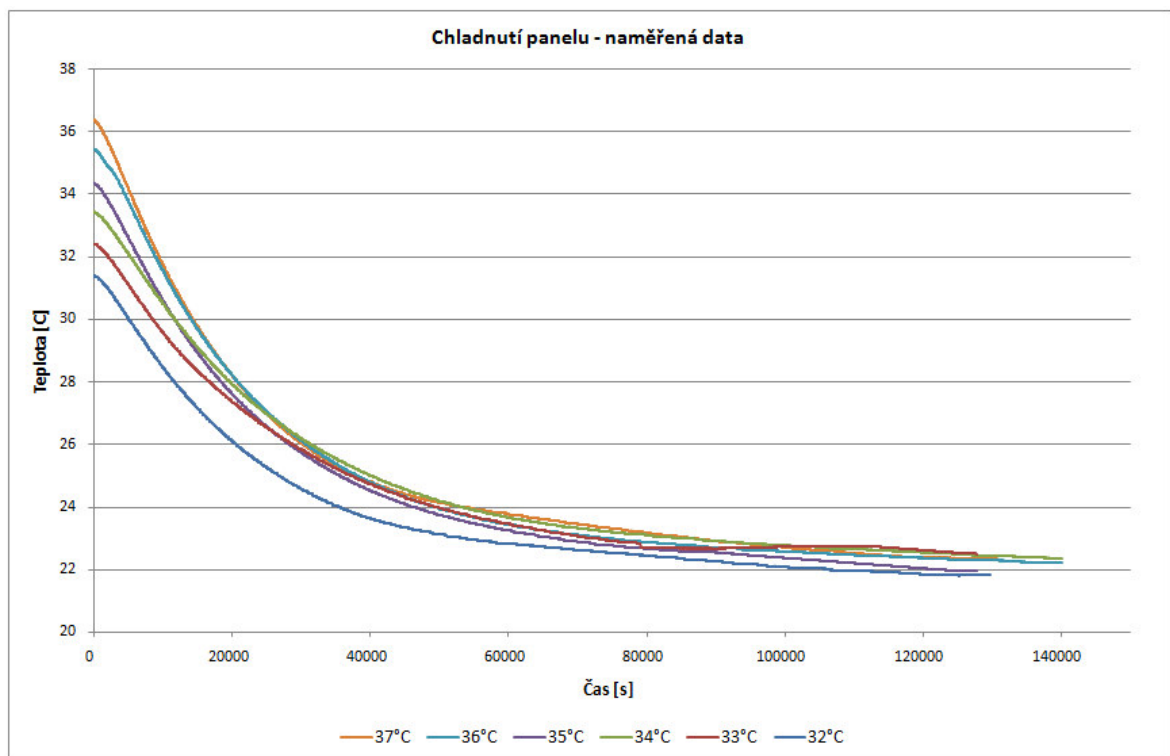
Tabulka 8 Biotovo kritérium

| Materiál | Rozměry (V, Š, H) | Biotovo číslo |
|--------------------|---------------------|---------------|
| 1x DuPont Energain | 1 x 1,2 x 0,0054 | 0,078 |
| Tepelná soustava | 2,07 x 1,25 x 0,083 | 0,00429 |

Určit hodnotu Biotova kritéria v případě celé tepelné soustavy je obtížné, to z důvodu použití různých materiálů s různými vlastnostmi. Téměř 45 % tvoří izolace, panely DuPont 38 %, zbylých 17 % tvoří kovy s vysokou teplotní vodivostí (hliník, měď). Proto byl proveden pouze informativní výpočet Biotova kritéria.

5.4.2 Časová konstanta

Časová konstanta byla určena z průběhů naměřených hodnot vnitřní teploty chlazení panelu, z vypočtených hodnot (simulace Matlab), a také ze stanoveného součinitele přestupu tepla.

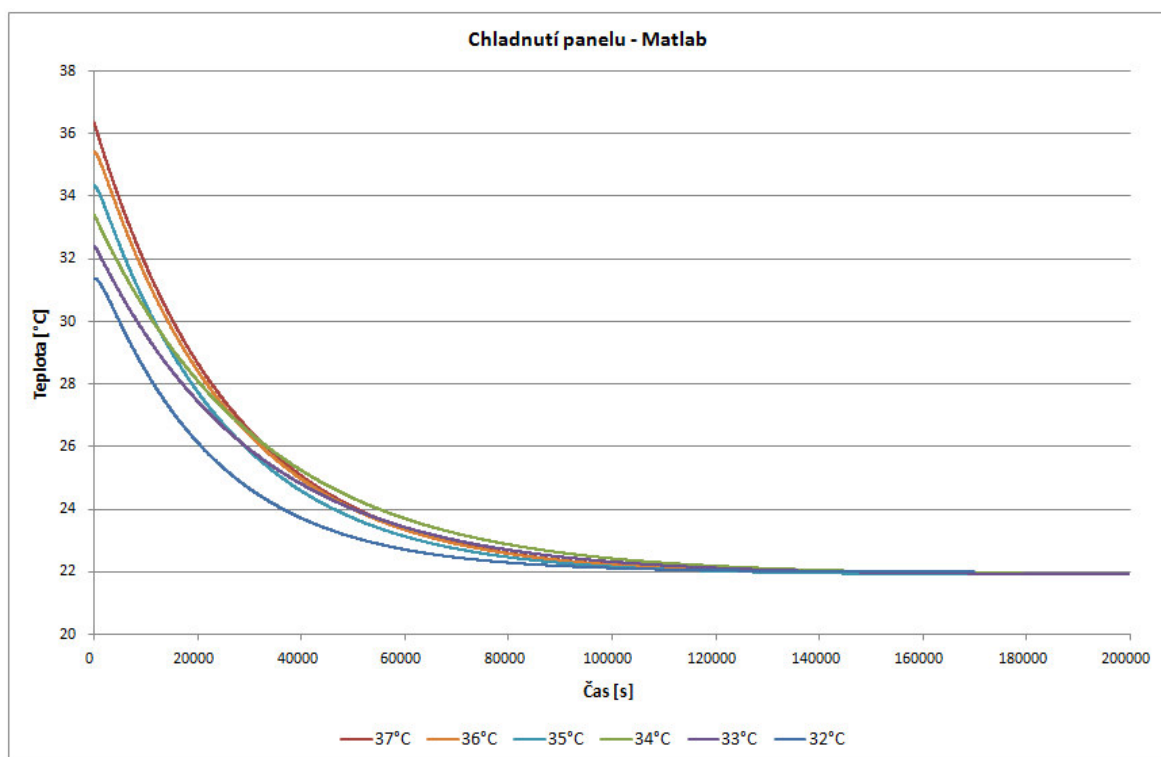


Obrázek 25 Průběhy chlazení – naměřené hodnoty

Tabulka 9 Časová konstanta - naměřený průběh teplot

| Požadovaná teplota panelu | 32 °C | 33 °C | 34 °C | 35 °C | 36 °C | 37 °C |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Časová konstanta | 6,75 hod | 7,57 hod | 7,86 hod | 6,51 hod | 6,83 hod | 6,26 hod |

Dle výsledků viz Tabulka 9 je patrný značný rozdíl v hodnotách pro žádanou teplotu 33 °C a 34 °C. Tento problém nastal ovlivněním teploty v místnosti během chladnutí, především zvýšená venkovní teplota. Tento jev měl vliv na změnu přestupu tepla, tím zároveň i na časovou konstantu, která vychází i z Biotova čísla. V případě časové konstanty se to projevilo na delší době chladnutí (vysoká teplota v místnosti), tudíž i její vyšší hodnotě. Celkově však bylo provedeno několik měření, jak vyšší tak i nižší teploty panelu, z těchto hodnot lze získat průměrnou hodnotu časové konstanty, ta byla určena 6,8 hod.



Obrázek 26 Průběhy chladnutí (simulace Matlab)

Pomocí Softwaru Matlab byly vykresleny průběhy chladnutí pro jednotlivé teploty. U každého chladnutí byla definována teplota ustálení na 22 °C. Byly použity naměřené

hodnoty s tím, že dopočítáno bylo pouze ustálení na požadované teplotě, což se v případě reálného měření nebylo možné vlivem rozdílné teploty místnosti v jednotlivých měřeních. Z těchto vypočtených hodnot byla určena časová konstanta viz Tabulka 10.

Tabulka 10 Časová konstanta – simulace Matlab

| Požadovaná teplota panelu | 32 °C | 33 °C | 34 °C | 35 °C | 36 °C | 37 °C |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Časová konstanta | 6,78 hod | 8,61 hod | 8,90 hod | 7,26 hod | 7,50 hod | 7,25 hod |

Hodnoty těchto časových konstant se v porovnání s hodnotami z reálně naměřených hodnot liší. Je to způsobeno přepočítáním průběhů na požadovanou teplotu ustálení a vlivem ovlivnění průběhů reálného měření.

Časová konstanta jedné desky DuPont určena výpočtem, parametry součinitele přestupu tepla byly brány jako průměrná hodnota z ohřevu na 35 °C, průměrná hodnota měrné tepelné kapacity byla určena dle hodnot udávaných výrobcem $c_p = 8400 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ Ostatní parametry nutné pro výpočet byly použity z parametrů určených výrobcem.

Příklad výpočtu časové konstanty pro jednoduchou desku DuPont Energain

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_i - \theta_\infty} = e^{(-Bi.Fo)}$$

$$\frac{\theta}{\theta_i} = e^{\left(-\frac{h.L_c.a.\tau}{\lambda.L_c^2}\right)}$$

$$\tau = \frac{L_c \cdot c_p \rho}{h}$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{h \cdot A}$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{h \cdot A}$$

$$\tau = \frac{810.0,00648.8400}{4,1.2,42}$$

$$\tau = 4443 \text{ s}$$

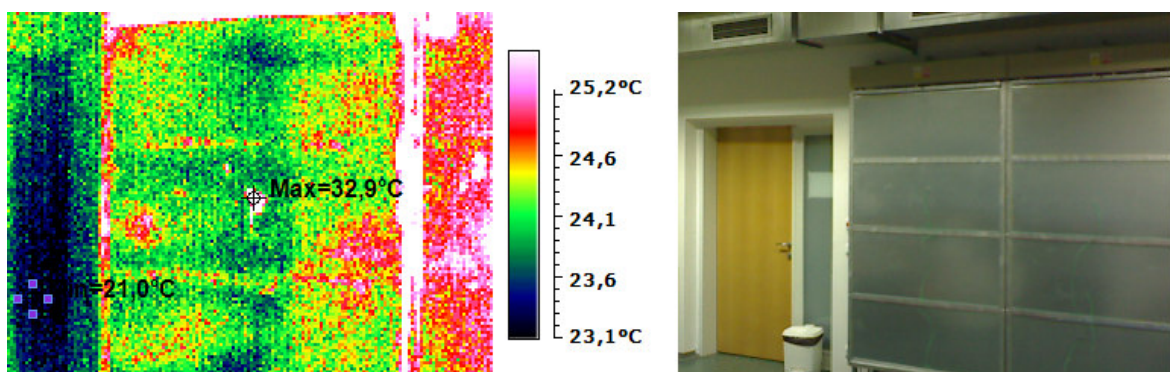
$$\tau = 74 \text{ min}$$

Zde je patrný rozdíl vůči hodnotě časové konstanty celé soustavy, tedy uložení 6 vrstev akumulčních desek. Panel je složen z několika různých materiálů, proto je obtížné přesně určit tuto hodnotu výpočtem.

5.4.3 Měření termokamerou

Tvorba termogramů pomocí kamery EasIR 4 byla ztížena lesklostí povrchu panelů. U snímání lesklých povrchu se jedná o odraženou zdánlivou teplotu, kdy na povrch materiálu sálají okolní vlivy, (zařízení okolních zařízení, samotný člověk pořizující termogram) a toto záření dopadá na detektor termokamery. Jak bylo uvedeno u měření emisivity, provedeno bylo několik termogramů s různou emisivitou, a to jak na čistém panelu, tak i v případě aplikování několika termočlánků na povrch panelu.

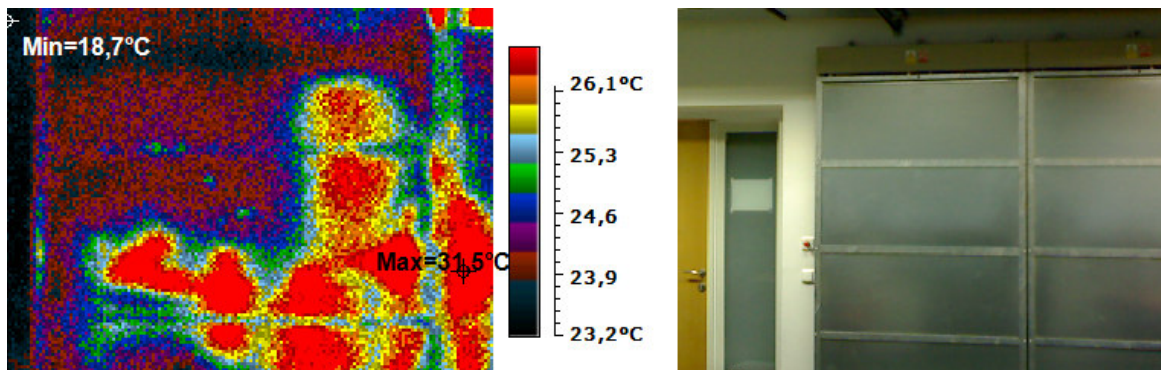
Následně jsou zobrazeny dva termogramy, jde pouze o ukázkou obtížnosti vytvořit správný termogram. Teplota panelu byla udržována na požadovaných 35 °C.



Obrázek 27 Termogram Emisivita = 0,6, povrchová teplota panelu 33,1 °C, Teplota okolí 25 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 3,2 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-02 17:08:00

V prvním termogramu Obrázek 27, je kamera nastavena dle povrchové teploty kontaktního čidla. Termogram zobrazuje právě jako maximální teplotu 32,9 °C v místě nalepení termočlánku, povrch lepící pásky změnil emisivitu povrchu, tato hodnota se téměř shoduje s hodnotou termočlánku, ovšem okolní teploty již uvádí chybnou hodnotu. Povrchová teplota panelu byla v daný okamžik přibližně 33 °C, a to ve všech místech, termogram

však uvádí teplotu v rozmezí 23,5 až 24,5 °C. K porovnání je zobrazena také viditelná oblast daného snímku, v něm je patrné, jak lesklý je povrch panelu.



Obrázek 28 Termogram Emisivita = 0,39, povrchová teplota panelu 32,7 °C, Teplota okolí 25 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 3,5 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-02 16:24:00

Pro názornost byl uveden termogram Obrázek 28, na panelu nebyly umístěny termočlánky, nastavena byla nižší emisivita. V termogramu je patrná oblast zvýšené teploty v středové oblasti panelu, nejedná se však o teplotu panelu, ale o obrys postavy provádějící daný snímek. Tuto odraženou zdánlivou teplotu nebylo možno redukovat snížením emisivity v nastavení kamery. U termokamery je možno nastavit kompenzaci tohoto vlivu, zde je však nutné odražené tepelné záření stanovit a tuto hodnotu zadat do termokamery, to ovšem použitá kamera nepodporuje.

5.5 Změna povrchu akumulčního panelu



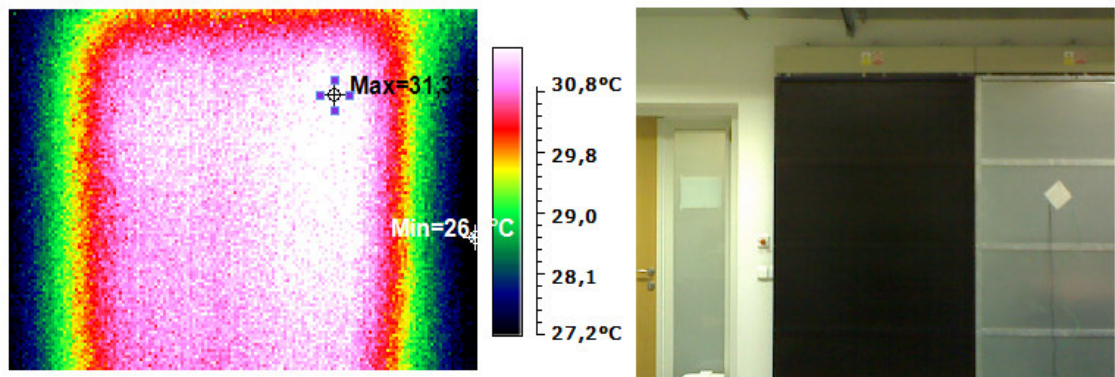
Obrázek 29 Sestava akumulčních panelů (natřený povrch) - měření tepelného toku a povrchové teploty

Obal akumulčního panelu z leštěného pozinkovaného plechu a jeho nízká emisivita zapříčiňuje nižší přestup tepla, a také zhoršuje měření povrchové teploty pomocí termokamery. Proto byl jeden panel natřen, základní syntetická barva a syntetická barva matná černá používána na tabule. Na takto upraveném povrchu bylo nutné provést opět všechna měření teploty. Mohlo tak být provedeno srovnání s hodnotami v případě nenatřeného panelu a zjištění samotného vlivu změny emisivity.

5.5.1 Měření termokamerou

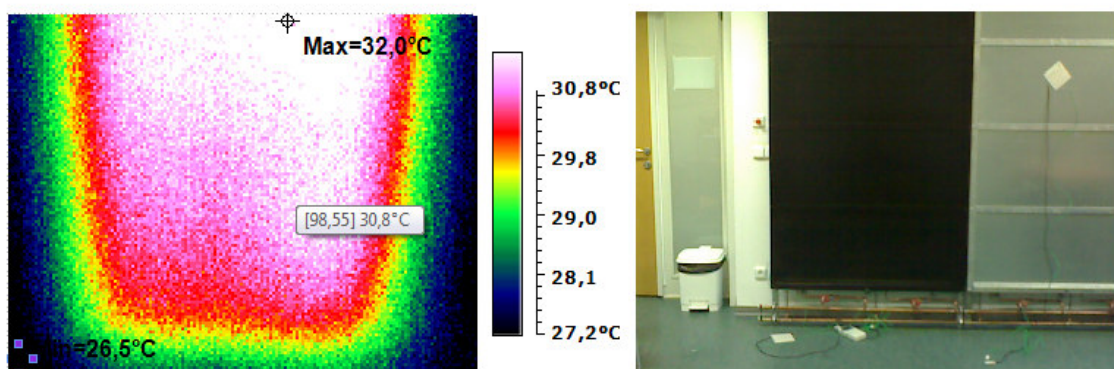
Měření emisivity pomocí infrapyrometru nebylo na natřeném panelu možné. A to z důvodu, že nebylo možné dosáhnout shody teploty kontaktního čidla a teploty pyrometru. I přes nastavování různé emisivity, až k hodnotě 0,99 teplota vykazovala rozdíl více než 2 °C. V případě měření na původním povrchu tato metoda vykazovala také jisté nepřesnosti, především v rozdílnosti emisivity v různých částech panelu. Poznatky z měření touto metodou tak potvrdily, velkou nepřesnost i v případě změny povrchu, lze tak říci, že tato metoda je k určení hodnoty emisivity nevhodná.

Termogramy byly provedeny na panelu s povrchovou úpravou. Následující obrázky Obrázek 30 a Obrázek 31, zobrazují již odpovídající záření z panelu, což v případě termogramů na původním povrchu nebylo možné. Hodnota emisivity byla nastavována tak, aby povrchová teplota co nejvíce odpovídala teplotě zobrazovaných termogramů. Hodnota maximální teploty 31,3 °C se nachází v pravé části panelu, je to zapříčiněno také ovlivněním druhého panelu, jenž je uložen v těsné blízkosti. Během tohoto měření bylo provedeno také měření povrchové teploty pomocí termočlánků, teplota byla v rozmezí 29 až 29,5 °C. Skutečná povrchová teplota tak přesně neodpovídala hodnotě z termogramů, zde je však nutné brát v potaz přesnost termokamery, která uvádí toleranci +2 °C. Hodnota maximální teploty tak odpovídá toleranci a nastavenou emisivitu lze považovat za správnou.



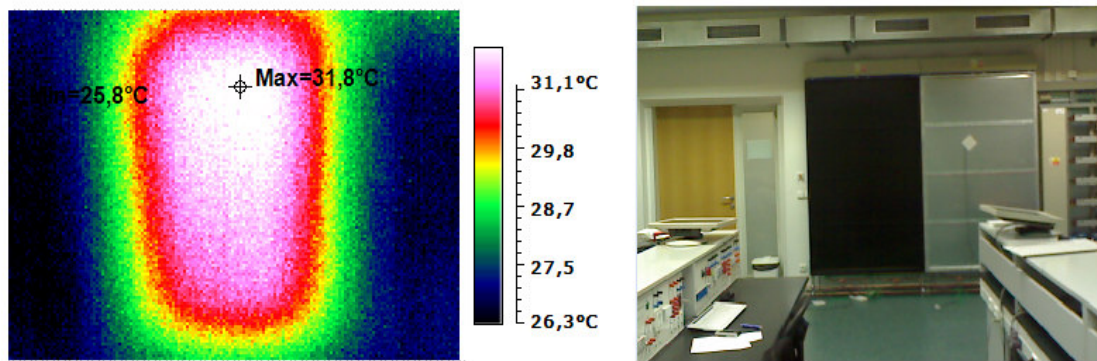
Obrázek 30 Termogram vrchní části panelu Emisivita = 0,97, povrchová teplota panelu 29,5 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 5 m,

Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:18:00



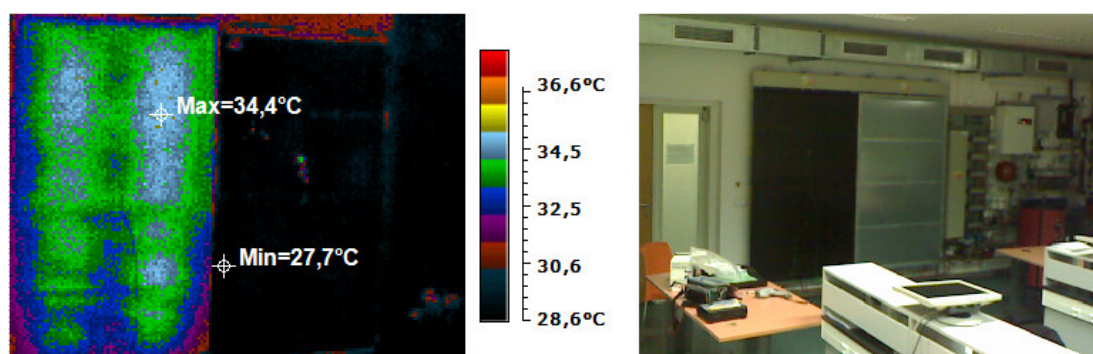
Obrázek 31 Termogram spodní části panelu Emisivita = 0,97, povrchová teplota panelu 29,4 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 5 m,

Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:19:00



Obrázek 32 Termogram celého panelu Emisivita = 0,97, povrchová teplota panelu 29,4 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 7 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:23:00

U snímku obou panelů viz Obrázek 33, je patrný právě rozdíl v zvýšení emisivity levého panelu. Teploty povrchově upraveného panelu ukazují hodnoty kolem 34 °C, tato teplota je však vyšší, než u předchozích termogramů, tento rozdíl vznikl při pořizování snímku, kdy právě docházelo k ohřívání topnými fóliemi. Naopak panel neupravený má hodnoty v oblasti 28 °C. Samozřejmě je zde nutné brát v potaz nastavenou hodnotu emisivity 0,98, která odpovídá nastavení natřeného panelu, což u panelu neupraveného je příliš vysoká hodnota, z toho jsou plynoucí teplotní rozdíly.



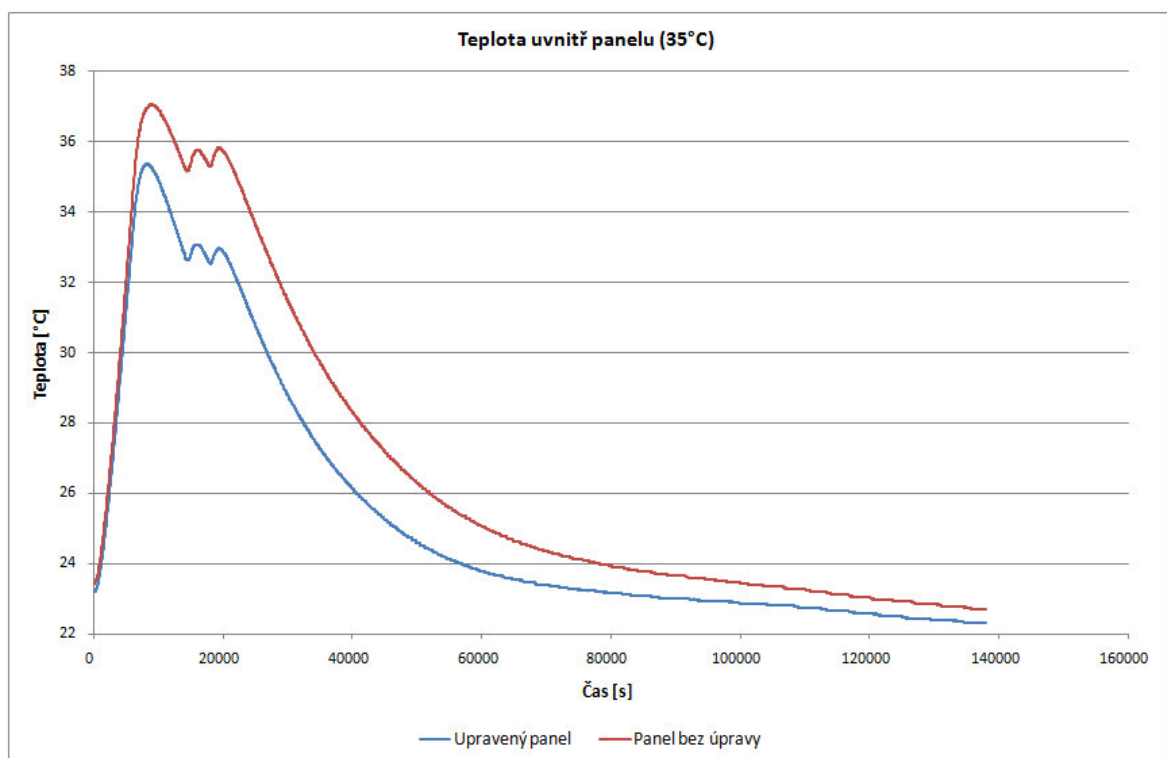
Obrázek 33 Termogram obou panelů Emisivita = 0,98, povrchová teplota panelu vlevo 29,2 °C, panel vpravo 32,8 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 8,5 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:52:00

Natření panelu a výrazné zvýšení emisivity způsobilo rozdíl v chování celé soustavy, nejen v oblasti termogramů, ale samotné regulace a záření. Z měření povrchových teplot

panelů v okamžiku pořízení termogramu, byl zjištěn rozdíl teplot, průměrná teplota levého panelu byla 29,3 °C ovšem teplota pravého panelu byla 32,7 °C.

5.5.2 Časová konstanta

Pro přiblížení chování panelů jsou uvedeny, nejen průběhy chladnutí ale i ohřevu, je tak patrný rozdíl teplot uvnitř panelů viz Obrázek 34. PID regulátor pracuje tak, že z aritmetického průměru teplot všech 6 čidel určuje ohřev topných fólií. Ovšem natřený panel vyzařuje více tepla do okolí, což způsobuje jeho „chlazení“, topné fólie tak zvyšují teplotu, aby se průměrná teplota pohybovala v oblasti žádané hodnoty. To má za následek, že teplota nenatřeného panelu je vyšší než panelu natřeného. V grafu je patrné, že hodnota průměrné teploty, tedy z obou panelů odpovídá žádané hodnotě 35 °C.



Obrázek 34 Průběh vnitřní teploty, ohřev na 35 °C

Z průběhu chlazení panelů byla určena časová konstanta, vlivem nižší teploty i rychlejšího ochlazení panelu je časová konstanta upraveného panelu asi o hodinu nižší.

Tabulka 11 Časová konstanta, úprava panelu

| | | Upravený panel | Panel bez úpravy |
|------------------|-------|----------------|------------------|
| Teplota | [°C] | 32,8 | 35,8 |
| Časová konstanta | [hod] | 5,53 | 6,61 |

Hodnota časové konstanty upraveného panelu je nižší než v případě neupraveného panelu, což je patrné i z hodnoty součinitele přestupu tepla, se zvýšením emisivity povrchu se jeho hodnota zvýšila.

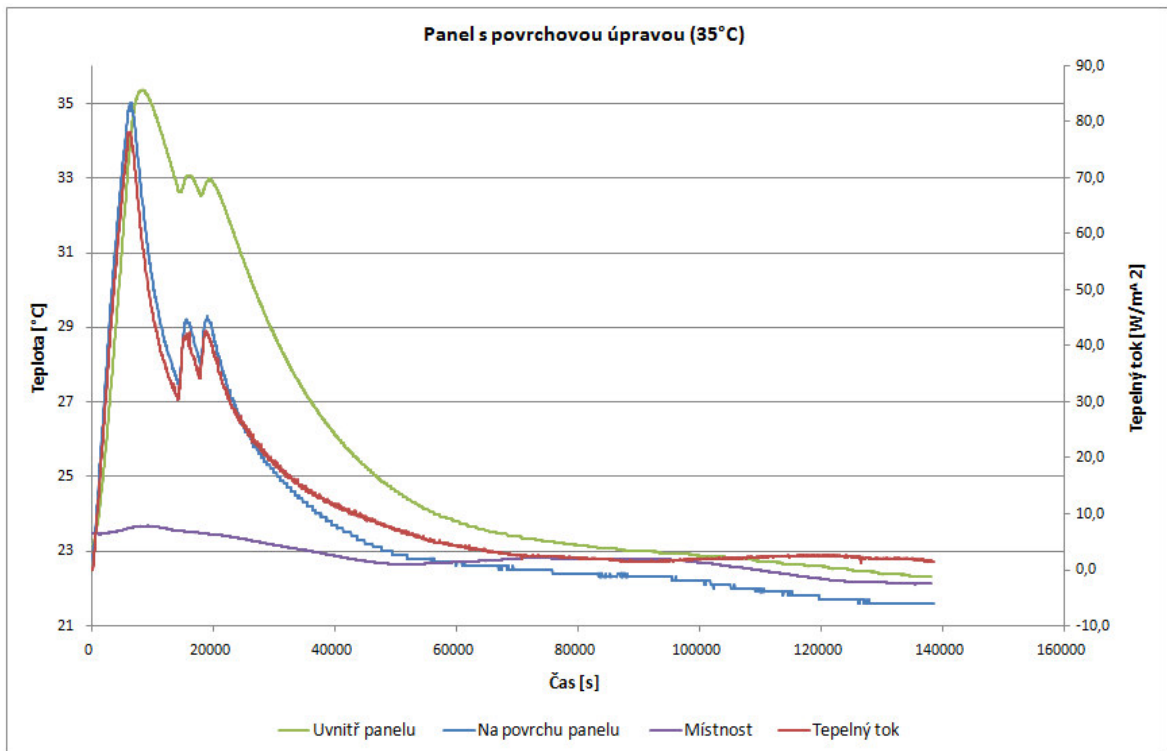
5.5.3 Součinitel přestupu tepla

V případě přestupu tepla při povrchové úpravě panelu a zvýšení jeho emisivity, se předpokládá, že vlivem nižší povrchové teploty, bude součinitel přestupu tepla konvekcí nižší. Naopak radiační složka přestupu tepla bude vyšší vlivem navýšení hodnoty emisivity. Z časové konstanty, která je v tomto případě nižší přibližně o 20 %, lze z její rovnice předpokládat, že hodnota součinitele přestupu tepla se zvýšila a to především složka radiační.

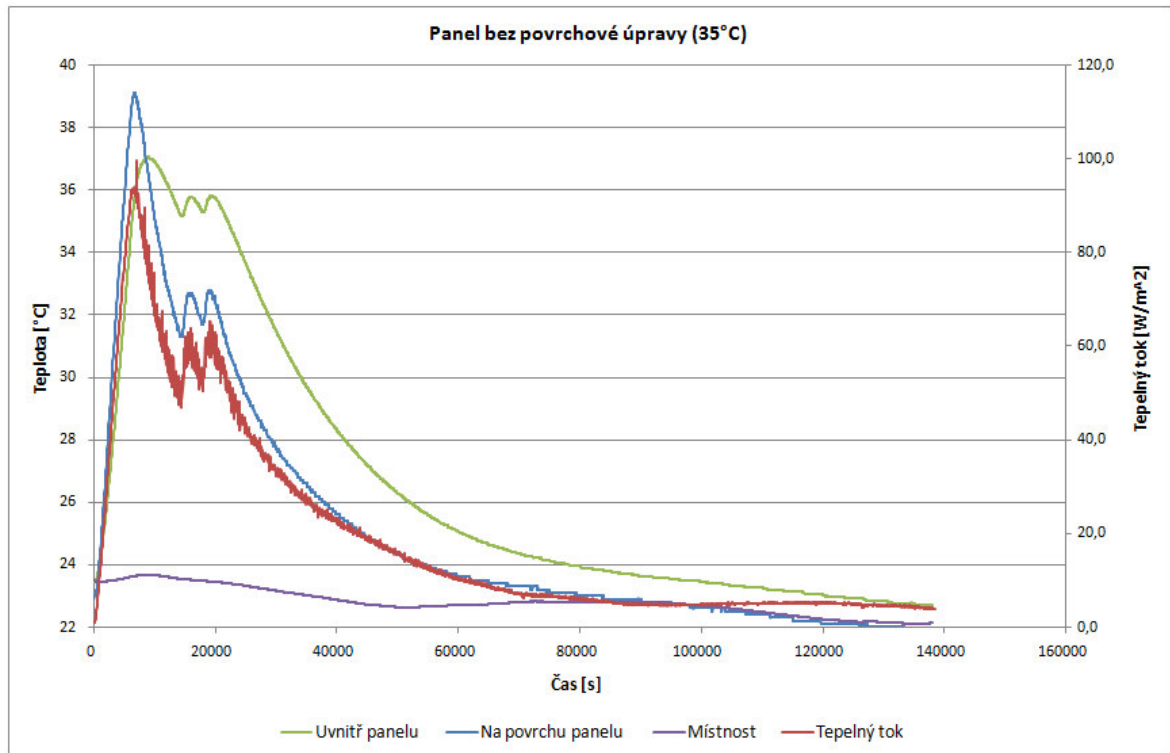
Tabulka 12 Naměřené a vypočtené hodnoty, úprava panelu

| Požadovaná teplota panelu | | | 35 °C | |
|------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------|------------------|
| | | | Upravený panel | Panel bez úpravy |
| Teplota uvnitř panelu | [°C] | 32,98 | 35,81 | |
| Teplota povrchu panelu | [°C] | 29,30 | 32,80 | |
| Tepelný tok z povrchu panelu | [W.m ⁻²] | 42,60 | 59,60 | |
| Teplota okolí | [°C] | 22,95 | 22,95 | |
| Součinitel přestupu tepla | Konvekcí | [W.m ⁻² K ⁻¹] | 3,02 | 3,49 |
| | Radiací | [W.m ⁻² K ⁻¹] | 5,27 | 0,61 |
| | Σ | [W.m ⁻² K ⁻¹] | 8,29 | 4,10 |

Výpočet přestupu tepla s určenou emisivitou povrchu upraveného panelu $\varepsilon = 0,96$, byla celková hodnota součinitele přestupu tepla $h = 8,29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$. Jde tedy o více než dvojnásobné navýšení v porovnání s původním povrchem.



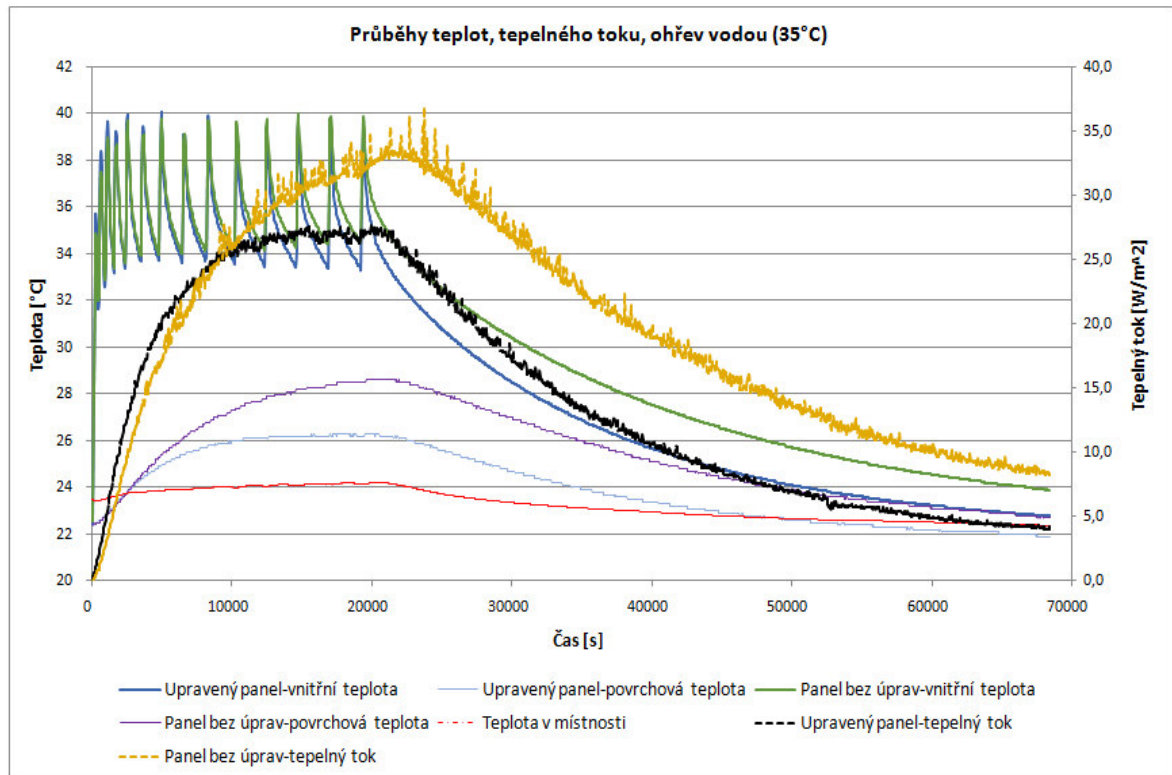
Obrázek 35 Průběh teplot a tepelného toku na upravovaném panelu



Obrázek 36 Průběh teplot a tepelného toku na neupraveném panelu

5.5.4 Ohřev vodou ze zásobníku

Protože změna povrchu panelu způsobila velké rozdíly v chování panelu, bylo provedeno měření s ohřevem panelu pomocí zásobníku teplé vody. Tento způsob ohřevu je náročnější, nejen co se týče energií ale také času. Teplotní čidla, dle kterých se měří teplota uvnitř panelu, jsou instalována v měděných jímkách, ty jsou však umístěny v těsné blízkosti trubkového výměníku. To zapříčiňuje, že hodnoty vnitřní teploty téměř okamžitě vykazují vysokou hodnotu odpovídající teplotě protékající vody. Nelze tak sledovat chování a určit ustálení teploty panelu z hodnot udávaných technologií (vzdálena plocha). Doba ustálení je delší vlivem prohřátí všech parafínových desek, samotné určení ustálení je nutné určit z povrchové teploty.



Obrázek 37 Ohřev teplá voda, průběh teplot a tepelného toku (upravený panel)

V grafu viz Obrázek 37, je patrná delší doba ustálení z hodnot povrchové teploty, vlivem vysokého ovlivnění okolní teplotou je celková doba měření kratší pouze 20 hod. Přestože ohřev panelu teplou vodou vykazuje minimální rozdíl teplot obou panelů, v průběhu ohřevu v porovnání s ohřevem topnými fóliemi, je patrné rychlejší chlazení tedy i kratší časová konstanta v případě upraveného panelu. Bylo tak ověřeno, že natřený povrch panelu způsobil nižší vyhřátí viz povrchová teplota, tomu odpovídá také nižší tepelný tok. Je zde patrná ona „nepřesnost“ hodnot vnitřní teploty, přestože hodnoty vykazovaly až 40 °C, byla v povrchová teplota výrazně nižší. Jedná se o nevýhodu vytápění panelu teplou vodou, umístění trubkového výměníku je v zadní části viz složení panelu. Pro dosažení vyšší teplot je tak nutné využít vyšších teplot průtočné vody s delší dobou ustálení, zde však hrozí poškození akumulčních desek, které mají určenou maximální teplotu 40 °C. Obtížnost vyhřátí vodou způsobují také ztráty, především krajními plochami, kde není žádná izolace a teplo z trubkového výměníku tak po celém obvodu uniká do okolí.

Tabulka 13 Naměřené hodnoty, ohřev teplou vodou

| | | Upravený panel | Panel bez úpravy |
|-----------------------|----------------------|----------------|------------------|
| Teplota uvnitř panelu | [°C] | 39,39 | 39,76 |
| Teplota na povrchu | [°C] | 26,30 | 28,60 |
| Tepelný tok | [W.m ⁻²] | 27,40 | 33,10 |
| Teplota místnosti | [°C] | 23,23 | |

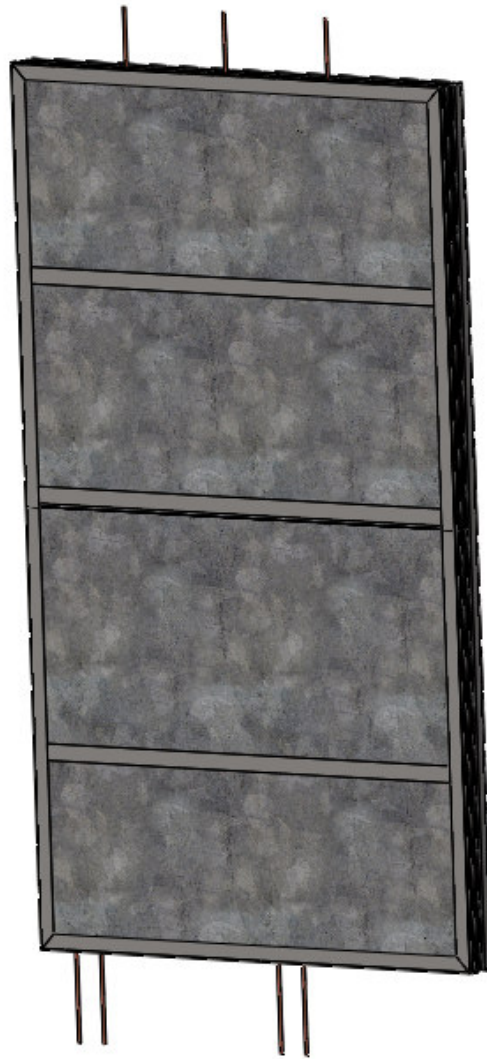
Z naměřených hodnot viz Tabulka 13, je patrné rozdílné chování v případě ohřevu vodou ze zásobníku, a nelze tak tuto metodu použít na určení parametrů panelů.

6 SIMULACE AKUMULAČNÍHO PANELU

Jako simulační prostředí byl vybrán Software SolidWorks. Simulace a chování panelu pro stacionární a nestacionární stav byla provedena v SolidWorks Flow Simulation.

6.1 Návrh aplikace panelu v simulačním prostředí

Důležité bylo vytvořit modul celé soustavy, PCM desky, topné fólie, trubkový výměník s výplněmi a kryt tvořený pozinkovaným plechem s ocelovými výztužemi. Propracování modelu bylo provedeno co nejpřesněji, včetně hliníkových fólií tloušťky 130 μm . Jednotlivým součástím byl definován materiál dle dostupných parametrů.

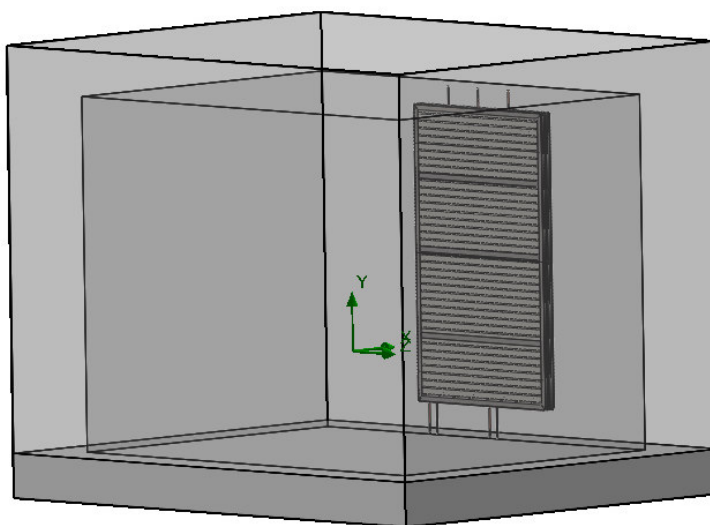


Obrázek 38 Model tepelně akumulčního panelu SolidWorks

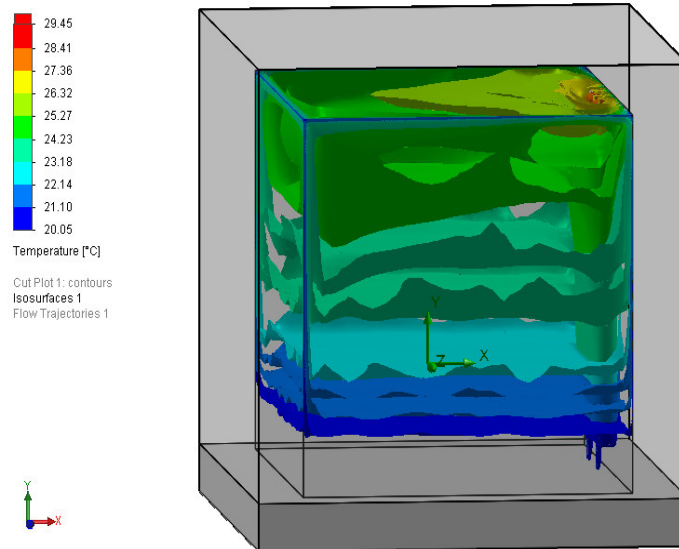
Simulace tohoto panelu v nástroji Flow Simulation je velice zdoluhavá vlivem použití mnoha součástí a samostatných ploch, z kterých je panel sestaven. V případě jednoduché simulace bez časové závislosti, byla doba výpočtů tohoto modelu 18 dní. Pro použití simulace panelu v místnosti s časovou závislostí samotného chladnutí panelu by se jednalo o velice časově zdoluhavé výpočty. Simulace uplatnění v místnosti tak byla provedena pouze s deskami DuPontTM Energain[®].

6.1.1 Aplikace modelu tepelně akumulčního panelu

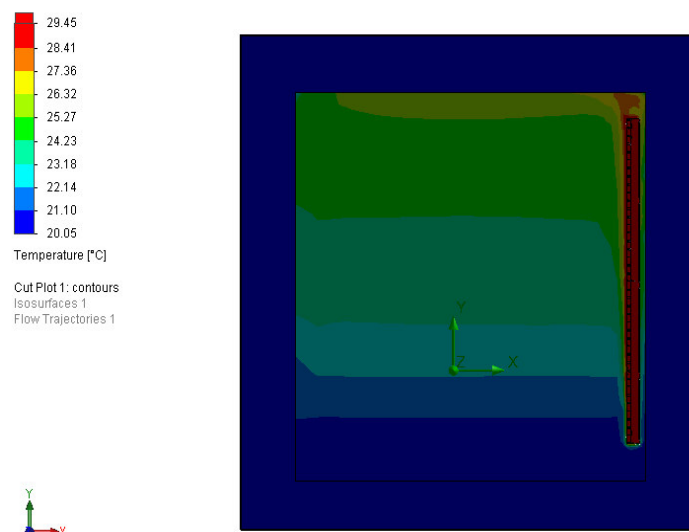
Pro ověření modelu tepelně akumulčního panelu byla vytvořena modelová situace, uložení panelu na stěnu místnosti bez oken i dveří o rozměrech 3,7 x 3 x 3 m tloušťka stěny 0,35 m, podlahy 0,3 m. Nastavení počátečních podmínek bylo, teplota panelu 32,3 °C, teplota místnosti 21 °C a stěny adiabatické. Byla provedena časová simulace, reálná doba byla však pouze 20 min, a to z důvodu náročnosti výpočtu, kdy pouze 20 min fyzického času představovalo výpočet trvající 8 dní.



Obrázek 39 Uložení panelu v místnosti



Obrázek 40 Plošný graf teplot



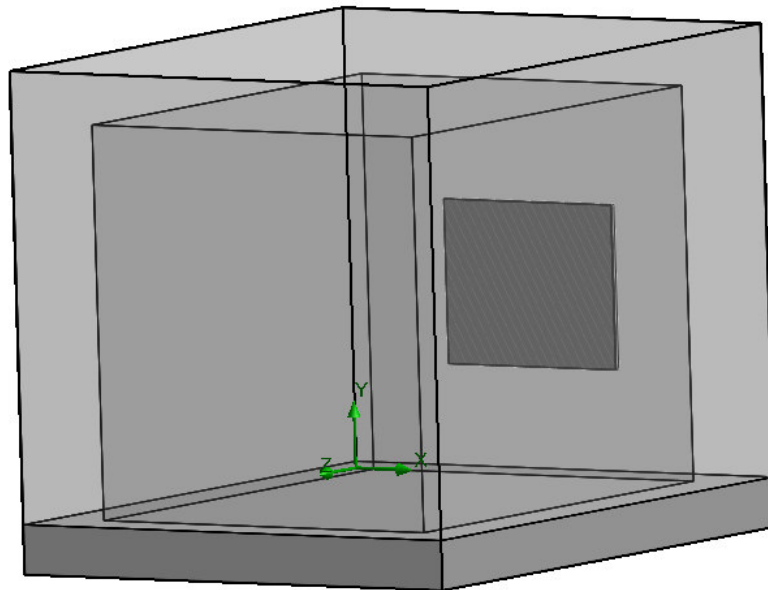
Obrázek 41 Řez místností a panelu

Z Obrázek 40 lze pozorovat chování teplotních polí v místnosti, jde pouze o krátké ochlazení (20min), k čemuž došlo snížením teploty panelu o 1,3 °C. Přesto je patrné, že došlo v takto malé místnosti k zdatnému navýšení teploty. Příklad uložení tohoto panelu, konkrétně dvou, v laboratoři D307 jenž je velikostí více než dvojnásobná v porovnání s modelovou místností a okolními vlivy prosklení, dveře a ostatní zařízení, teplotu v místnosti ovlivní pouze minimálně.

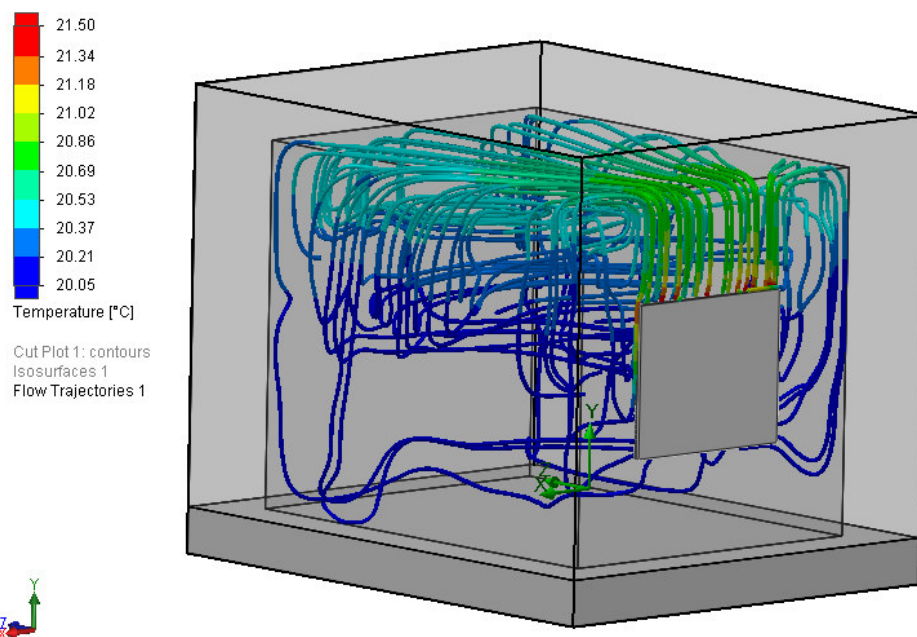
6.2 Simulace modelu akumulární desky

Z naměřených a vypočtených hodnot přestupu tepla tepelné soustavy byly tyto hodnoty použity pro simulaci jednoduchého modelu s využitím jedné akumulární desky DuPont. V jednoduché místnosti bez oken i dveří o rozměrech 3,7 x 3 x 3 m tloušťka stěny 0,35 m, podlahy 0,3 m, byla umístěna deska izolace tloušťky 3 cm, na které byla uložena akumulární deska s danými parametry. Podmínky okolí místnosti byly nastaveny pro adiabatickou stěnu, tedy nedocházelo k žádnému ovlivnění okolím místnosti. Hlavním parametrem bylo nastavení součinitele přestupu tepla z povrchu akumulární desky, povrchu byl nastaven $h = 4,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Parametry, které byly určeny měřením, byly zpracovány při ohřevu na 35 °C, skutečná teplota tělesa však byla 32,3 °C. Nastavení počátečních podmínek simulace byla modelu akumulární desky nastavena teplota 32,3 °C, teplota v místnosti byla nastavena na 21 °C. Z výsledků simulace byl vykreslen průběh chladnutí modelu, byla použita průměrná teplota povrchu, z něhož určena časová konstanta rovna 80 min. V porovnání s výpočtem časové konstanty byla vypočtená hodnota nižší, vlivem nepřesných teplotních podmínek modelu tedy i konstantní teplotě okolí, je tento rozdíl opodstatněný. Jednoduchou simulací tak byl ověřen přestup tepla z povrchu materiálu, který byl určen měřením složitějšího modelu. Přesto lze tyto hodnoty použít v simulaci jednoduššího modelu a lze tak ověřit chování akumulárních desek v různém umístění a určit tak nejvhodnější uplatnění v budově.

6.2.1 Model na stěně

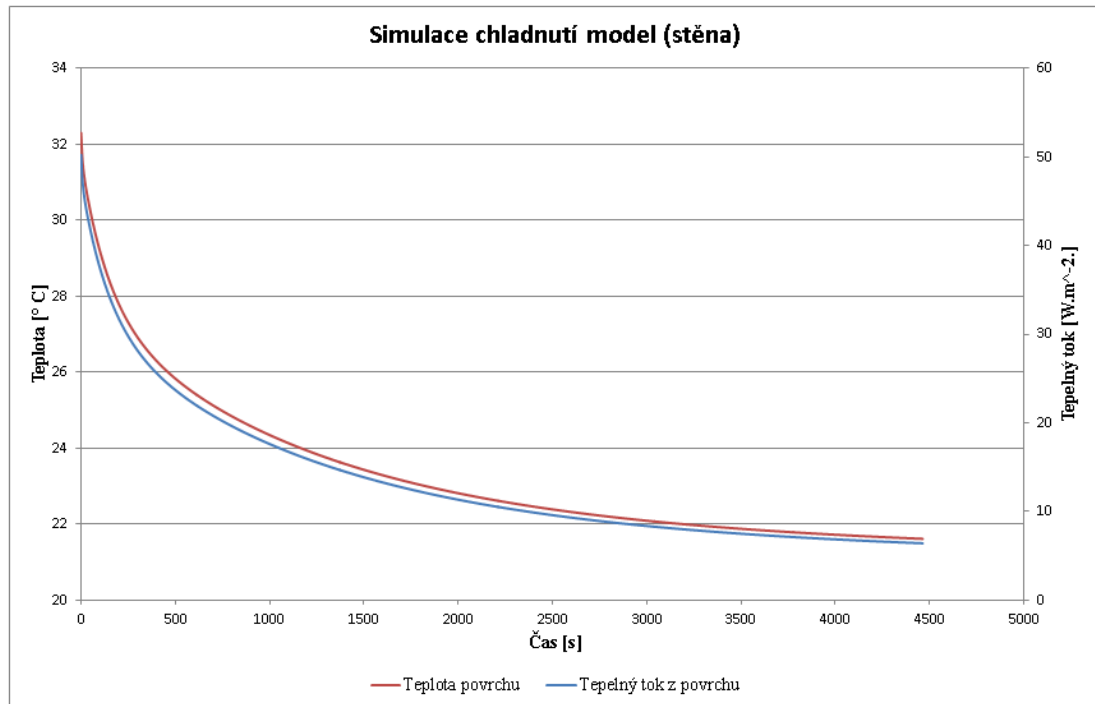


Obrázek 42 Model místnosti a uložení akumulční desky na stěnu

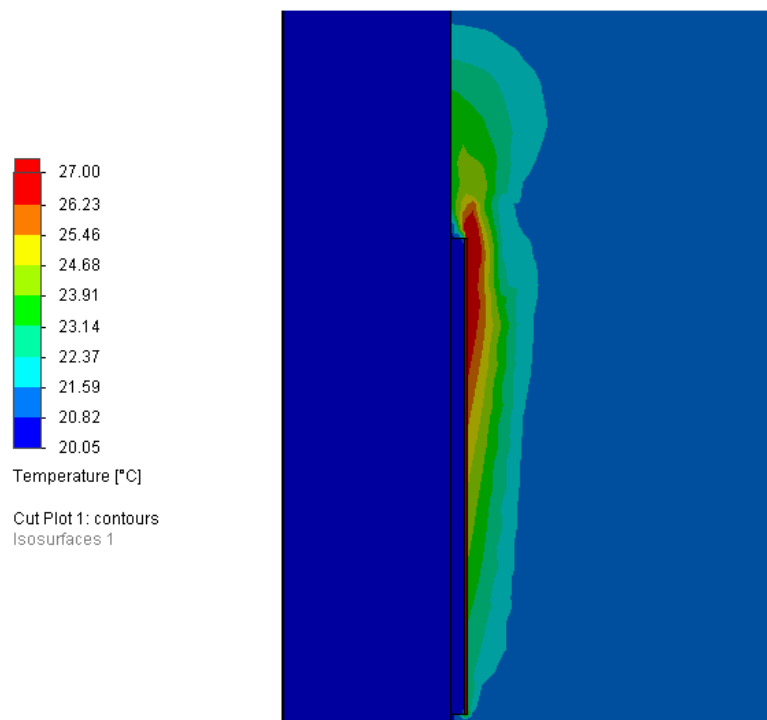


Obrázek 43 Trajektorie přirozeného proudění modelu stěna

Z průběhu teploty proudění Obrázek 43 je patrné chování modelu uloženého na stěně. Vlivem volné konvekce a tedy působení gravitace je oblast ohřátého vzduchu pouze ve vrchní části místnosti. V případě konkrétního použití těchto parafínových desek po celé ploše stěny, je vliv ohřevu ztelnější.



Obrázek 44 Simulace chlazení panelu, počáteční teplota 32,3 °C



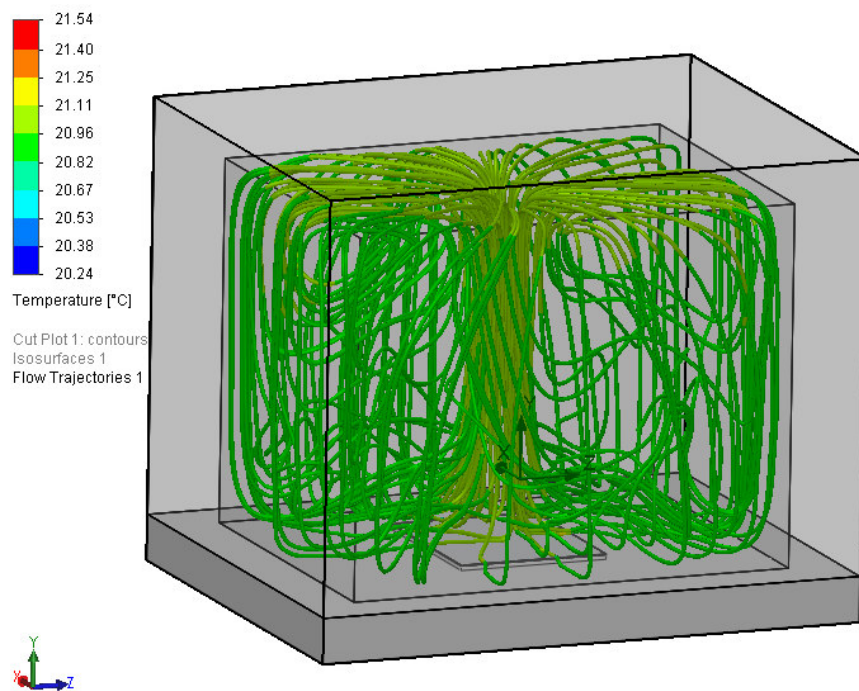
Obrázek 45 Počáteční průběh teplot – řez stěnou a panelem

V řezu lze pozorovat teplotní pole kolem desky v počátku chlazení, samotná akumulční deska je pouze 5 mm široká, její teplotní vliv na okolí není tak značný, což lze pozorovat i v trajektorii teplotního proudění viz Obrázek 43. V počátku byla nejvyšší průměrná hodnota tepelného toku z povrchu panelu 50,2 W.m⁻². Pro srovnání na tepelné soustavě

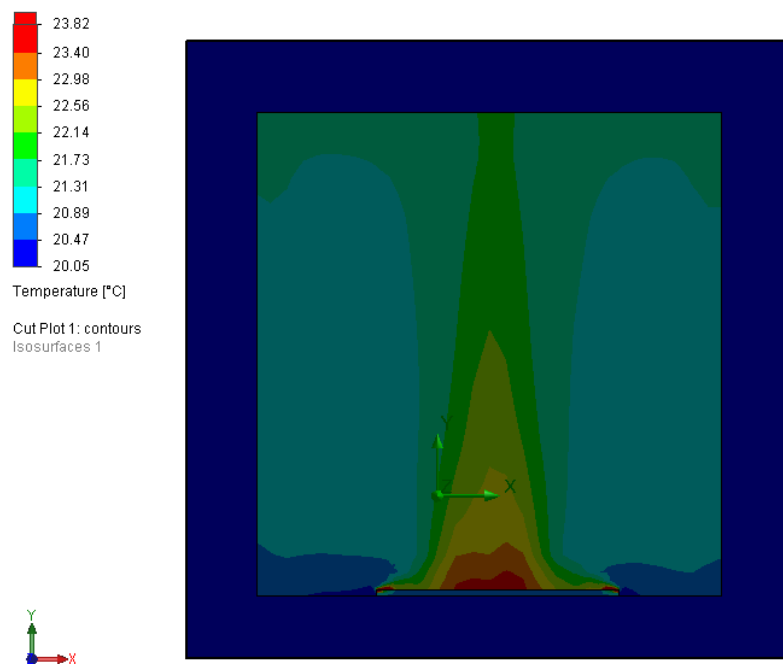
v laboratoři byla hodnota tepelného toku $57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, při vyhřátí na 35 °C čemuž odpovídala povrchová teplota panelu $32,3 \text{ °C}$.

6.2.2 Model na podlaze

Další simulací bylo uložení akumulční desky na podlahu. Parametry simulace byly nastaveny shodně jako v předešlé simulaci.



Obrázek 46 Trajektorie proudění model podlaha



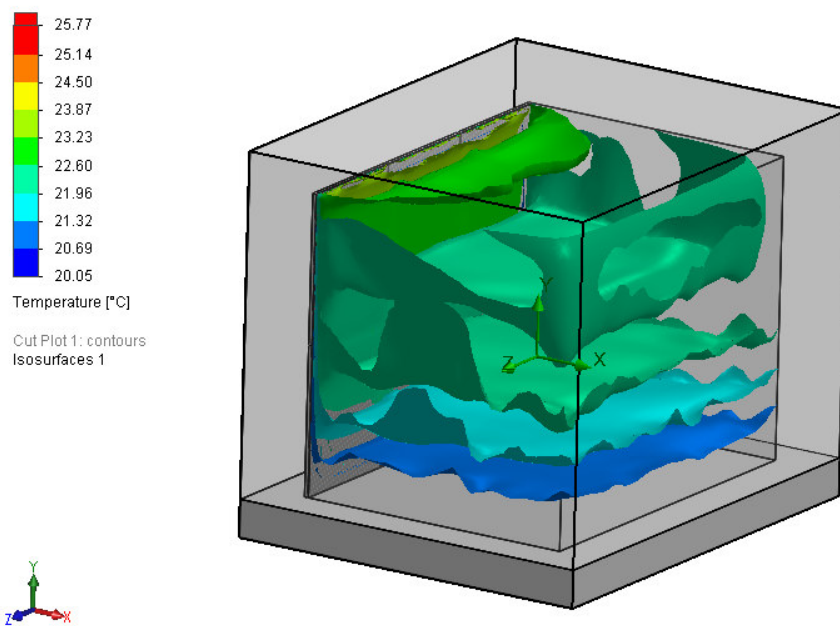
Obrázek 47 Průběh teplot – řez místností a panelu

Průběhy teploty v místnosti s uložením desky do podlahy vykazuje zvýšení teploty téměř v celém objemu místnosti, je tak zřejmě výhodnější využití v podlaze. V případě využití slunečního záření k akumulaci tepla je umístění v podlaze také výhodnější, přímé sluneční záření dopadá v místnostech především na podlahu.

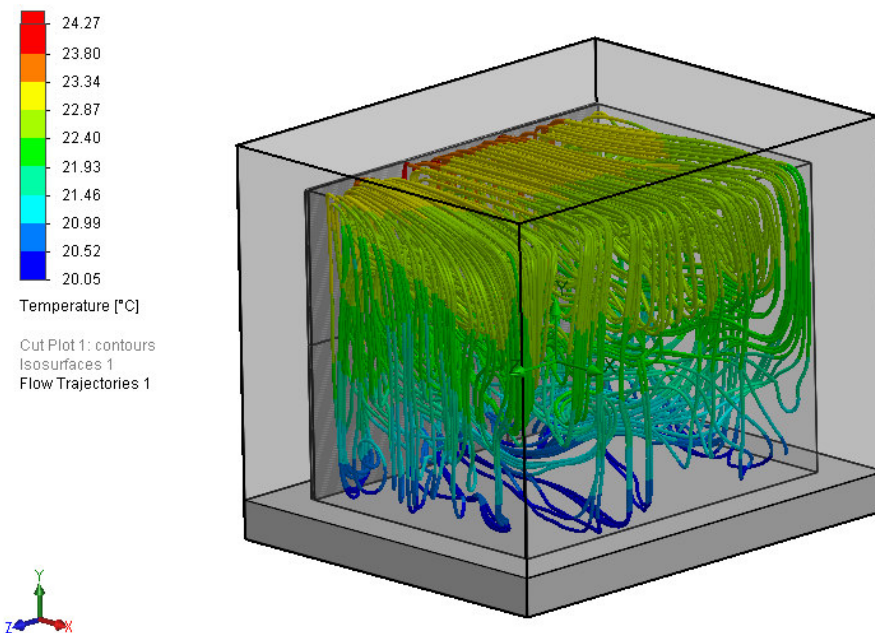
6.2.3 Úprava modelu

Mezi další ověření simulačního modelu byla akumulční deska oplechována pozinkovaným plechem, stejně jako je tomu v případě akumulčního panelu v laboratoři D307. Plech tloušťky 2 mm, způsobil nepatrné zrychlení chladnutí, příčinou je právě zvýšení tloušťky povrchové úpravy panelu a jeho vyšší vodivost. Během chladnutí 75 min v porovnání s modelem bez oplechování byla průměrná teplota panelu o 0,3 °C nižší.

Byla provedena také simulace využití akumulčních desek po celé ploše zdi a podlahy. Všechny úpravy modelu byly prováděny za stejných podmínek v místnosti, teplot i počáteční teploty samotných desek.



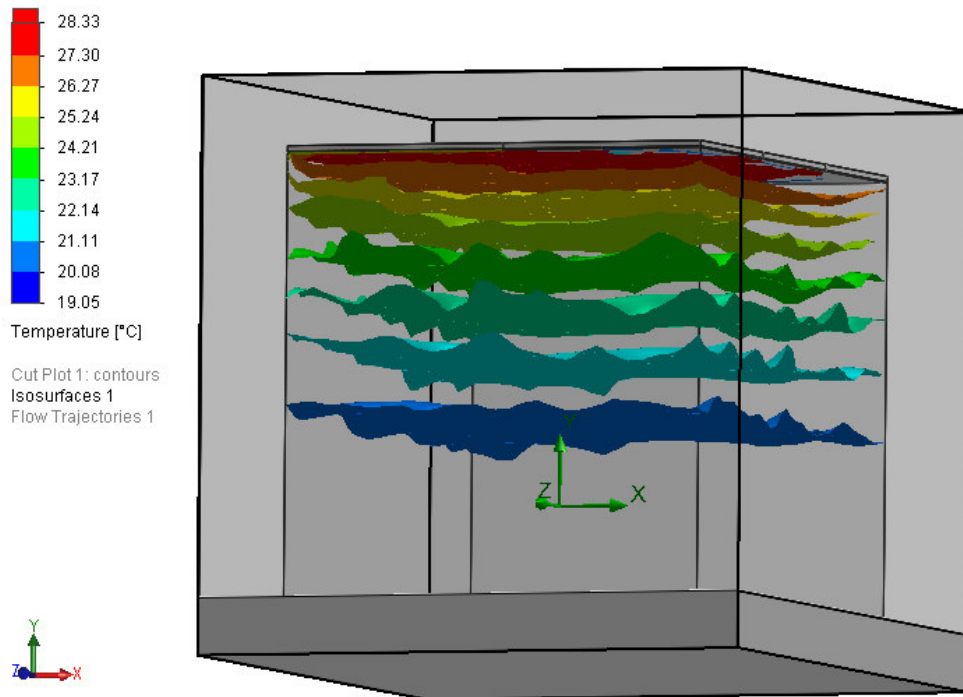
Obrázek 48 Plošný graf teplot, využití akumulčních desek na stěně



Obrázek 49 Trajektorie proudění stěna

V případě uložení desek na celou stěnu došlo k ohřevu teploty v místnosti téměř v celém objemu, nejmenší vliv byl patrný v oblasti podlahy, kde je teplota nejnižší. Vlivem větší plochy docházelo k chlazení rychleji, než je tomu v případě jedné desky. Za dobu 75 min byla průměrná teplota panelů o 0,4 °C, menší než tomu bylo v případě použití jedné desky.

Vhodným využitím akumulace může být, využití akumulčních prvků ve stropní části, kde vlivem stoupání teplého vzduchu má oblast stropu nejvyšší teplotu. Toto řešení může být problematické z hlediska následného uvolnění tepla do místnosti. Proto také byla provedena simulace s aplikací strop.

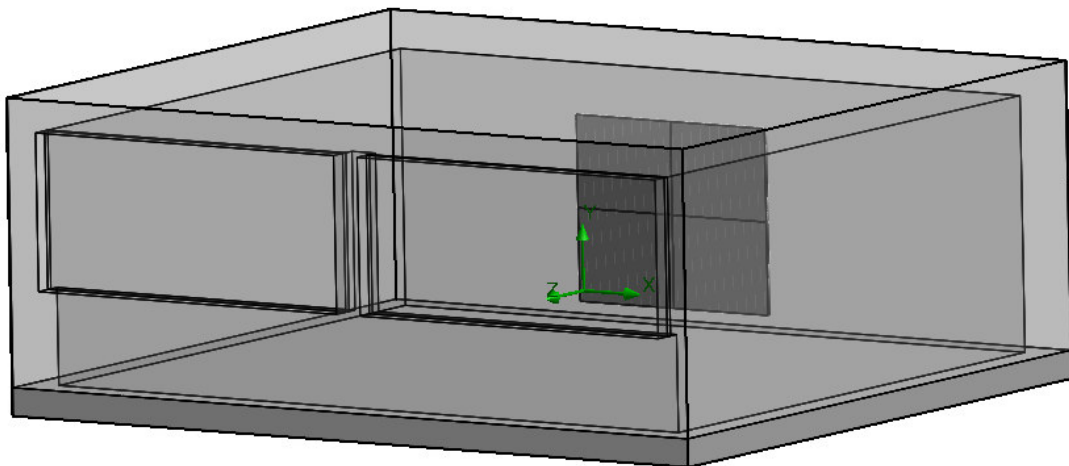


Obrázek 50 Plošný graf teploty, uložení strop

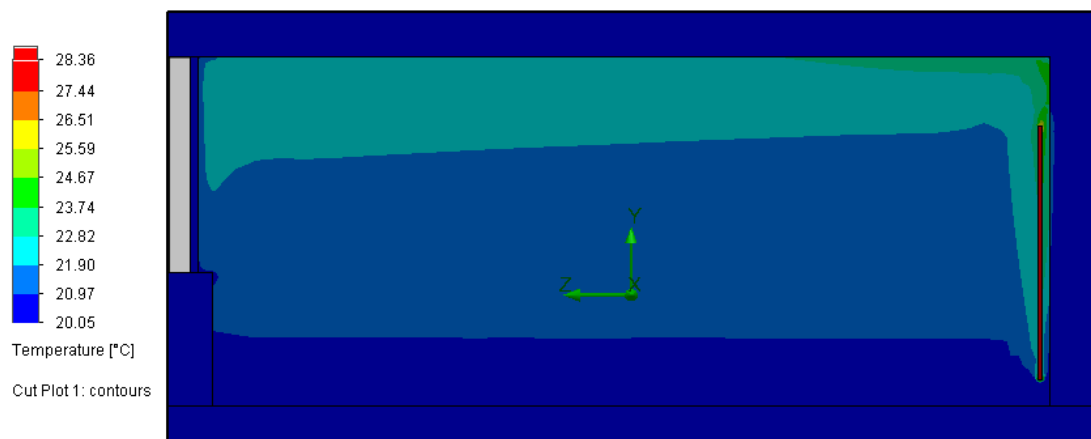
Obrázek 50 teplotní oblasti, kde nejnižší teploty jsou v oblasti poloviny výšky místnosti. Je zřejmé, že teplý vzduch ohříváný akumulčními deskami se udržuje především ve vrchní části místnosti. Jedno z řešení je využít ventilátor a zajistit tak správné rozložení teploty v celém objemu místnosti.

6.3 Modelová situace laboratoře D307

Zjednodušenou situací pro simulační Software byl vytvořen model místnosti laboratoře D307, kde byl použit zjednodušený model akumulčního panelu. Model panelu je složen ze 4 akumulčních desek DuPont, zadní část je složena z 3 cm izolace. Teplota v místnosti byla nastavena na 21 °C, stěny adiabatické, teplota desek byla 32,3 °C, sledováno bylo ovlivnění teploty v místnosti při konstantní teplotě desek.



Obrázek 51 Model místnosti D307 se zjednodušeným akumulčním panelem

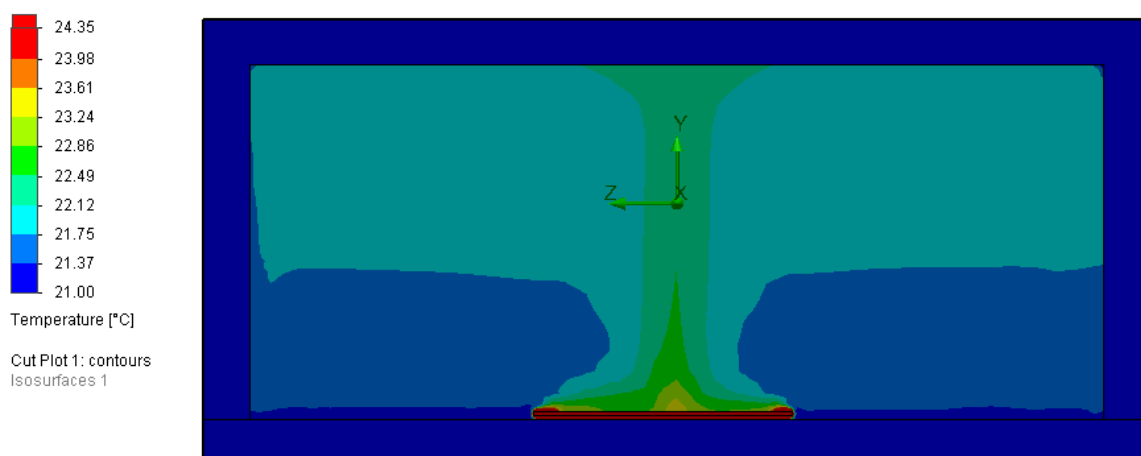


Obrázek 52 Teplotní řez místností a panelu - stěna

V Obrázek 54 je zobrazen řez místností i panelu po uplynutí 1 hod ohřevu místností panelem. Uvolněné teplo z takto uloženého panelu se hromadí především v oblasti stropu a místnost se tak ohřívá velmi neefektivně, viz předešlé simulace a zjištěné nevýhody uložení na stěnu. Hodnota průměrné teploty vzduchu v místnosti se za dobu 1 hod zvýšila pouze o 1,22 °C, průměrná hodnota tepelného toku z panelu byla 22,3 W.m⁻². I v tomto

reálném modelu, lze považovat uložení akumulčních panelů do stěnové konstrukce k využití vytápění jako ne příliš vhodné, taky samotné akumulční desky neslouží přímo k vytápění ale k tepelné akumulaci a přebytečného tepla.

Další modelovou situací místnosti je uložení panelů na podlahu, nastavení simulace a okolní podmínky jsou stejné jako v předešlém případě.



Obrázek 53 Teplotní řez místností a panelu - podlaha

V tomto případě došlo během hodinové simulace a ohřevu místnosti o zvýšení průměrné teploty o 1,75 °C. Opět lze v teplotních polích pozorovat lepší rozložení než v případě uložení na stěnu. Dochází zde také k ohřívání větší stropní části, kde by proto mohla být umístěna další řada akumulčních panelů, docházelo by tak k vzájemné výměně tepla podlaha strop. Obdobné chování bylo získáno také v zjednodušeném modelu předešlé simulace. Výsledky simulací tak ukázaly, jako nejvhodnější použití akumulčních panelů v podlaze s otopnými tělesy, se zároveň umístěnými panely ve stropní části.

ZÁVĚR

Náplní práce bylo měření na tepelně akumulacním panelu, určení jeho parametrů a následné ověření v simulačním prostředí. V teoretické části byla popsána problematika tepelné akumulace budov, přenosu energie z povrchu materiálů. Dále zde byly popsány tepelně akumulacní materiály, jejich vlastnosti, způsoby výroby a především použití a uplatnění v budovách. Poslední kapitolou teoretické části je popis několika simulačních prostředí, které jsou využívány v projekční praxi, především je zde popsána oblast přenosu tepla a proudění, které různá prostředí využívají různě a jak v daných prostředích pracují.

Důležitým prvkem pro měření bylo především zajistit stabilní klimatické podmínky v laboratoři. Tepelná soustava byla citlivá jen na nepatrné zvýšení teploty v místnosti. Obtížnost měření představovala dlouhá doba ustálení teploty panelů, proto bylo nutné provádět měření často opakovaně. Měření proto probíhalo především v nočních hodinách a dnech mimo výuku. V případě natření panelu černou barvou byla citlivost panelu ještě zvýšena, a venkovní teplota, která byla začátkem léta mnohdy velmi vysoká a to s velkými denními výkyvy, měření v podstatě znemožňovala.

Určení časové konstanty bylo provedeno jak z průběhu naměřených hodnot tak i výpočtem. Tyto hodnoty se lišily jen nepatrně, což představovalo správnost v měření i ve výpočtu a to i přes ovlivnění, na které je soustava velmi náchylná. Důležité bylo zjistit časovou konstantu pouze jedné akumulacní desky pro následné použití v simulačním prostředí.

Hlavní problematikou je přestup tepla z povrchu panelů. Samotný součinitel přestupu tepla je důležitý nejen pro získání časové konstanty, ale jde o stěžejní parametr, který charakterizuje chování panelu. Radiační složka součinitele je však závislá na emisivitě daného povrchu, což v případě použitého materiálu je problematické s jeho přesným určením. Bylo provedeno několik metod měření emisivity materiálů s pomocí infrapyrometru a termokamery, ovšem u lesklého a dlouhodobě používaného povrchu těchto panelů bylo přesné určení emisivity velmi obtížné. Proto byla provedena úprava povrchu s natřením matně černé barvy. Tato změna se výrazně projevila s chování panelu, byla tak výrazně zvýšena hodnota emisivity, což se projevilo až ve dvojnásobném zvýšení přestupu tepla.

Simulací modelu tepelně akumulacního panelu se ověřila správnost získaných parametrů. Simulováno bylo několik aplikací a to pouze s modelem parafínové desky

DuPont Energain. I přes nepřesnost v okolních podmínkách modelu, časová konstanta téměř souhlasila s výpočtovým modelem. Složitost konkrétního modelu celého tepelně akumulčního panelu stěžovala výpočet simulace. Ověřit tak například vychlazení modelu, což v reálném případě představuje dobu 40 hod, je právě vlivem obtížnosti výpočtu časově nemožné. Výpočet pouze hodinového chlazení modelu trval téměř 20dnů. Cílem však bylo získat potřebné parametry parafínových desek, s následnou možností jejich aplikace a zkoumání chování v různých umístěních a aplikacích v budově.

Měření na tepelné soustavě je velmi časově náročné a celá práce byla vlivem různých změn parametrů i samotné změny povrchu náročná. Tvorba simulačního modelu byla vlivem složitosti samotného panelu, výpočetně a tedy i časově zdlouhavá. Možnost zkoumání chování akumulčních panelů v simulačním prostředí lze rozvést do mnoha aplikací. Proto i oblast zkoumání změny povrchu a vlivu na přestup tepla je rozsáhlá, proto bude předmětem mého dalšího výzkumu v doktorském studijním programu.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The part of the job was measured on thermal storage panel to determine its parameters and subsequent verification of the simulation environment. In the Theoretical part was described problems of thermal storage buildings, heat transfer from the material surface. Furthermore here was described heat characteristics of the storage material, their methods of manufacture and use and mainly used in buildings. The last chapter of theoretical part is a description of some simulation environments, that are used in design practice, particularly as described herein field of heat transfer and flow, which use various different environments and how they work in these environments.

Very important element for the measurement was primarily to ensure stable climatic conditions in the laboratory. Thermal system was sensitive only to slight increase temperature in room. The difficulty of measuring featured a long settling time temperature panel, therefore it was necessary to make measurements often repeatedly. Measurements were carried out mainly at night and days outside the classroom. In the case of coated black color panel, the sensitivity was increased and outdoor temperature, which was the beginning of summer often very high, with large daily fluctuations measuring essentially impossible.

Determination of the time constant was done both in the course readings and calculations. These values differ slightly representing the accuracy in the measurement and the calculation and despite the influence which the system is very sensitive. Important was to determine the time constant of only one storage plate for subsequent use in the simulation environment.

The main issue is the heat transfer from surface of the panels. The actual heat transfer coefficient is important not only for obtaining the time constant but is a crucial parameter that characterizes the behavior of the panel. Radiation component coefficient is dependent on the emissivity of the surface, which in the case of material used is problematic with its precise definition. There have been several methods for measuring the emissivity of the material with infrared pyrometer and thermal camera, but in the long term and glossy surface of these panels used were accurate determination of emissivity very difficult. Therefore, an adjustment was made by coating the surface with matt black paint. This change has been felt with the behavior of the panel was significantly increased emissivity which resulted in up to a twofold increase in heat transfer.

Simulation model of latent heat panel to verify the correctness of the parameters. Simulated several applications and only with model DuPont Energain paraffin plates. Despite the inaccuracy in the environmental conditions of the model, the time constant almost agreed with the computational model. The complexity of a particular model of an entire thermal mass panel, complained of simulation. Check for example cooling model which case the real time is 40 hours, is precisely due to the difficulty of calculating the time impossible. The calculation of the hourly cooling only model lasted almost 20 days. However, the goal was to obtain the necessary parameters paraffin plates, with the possibility of their application and exploration behavior in a variety of locations and applications in the building.

Measurement of the thermal system is very time consuming and all work was due to various parameter changes, and change in surface itself computationally and thus time consuming. The possibility of studying the behavior of storage panels in the simulation environment can be elaborated in many applications. Therefore, the area of research and impact of changes in surface heat transfer is large, it will be subject to and following doctoral studies.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Daniels, Klaus. *Technikabudov: Příručka pro architekty a projektant.*, Jaga group, v.o.s., Bratislava 2003. Rozsah: 513 stran. ISBN: 80-88905-63-X
- [2] Necati Özisik, M. *Heat transfer a basic approach.* Singapore: International edition, McGraw-HillBook, 1985. Rozsah: 745 stran. ISBN 0-07-047982-8
- [3] Incropera, Frank P., Dewitt, David P., Bergmann, Theodore L., Ted. Lavine, AdrienneS. *Fundamentals of Heat and Mass transfer.* USA. 2007 Rozsah: 997 stran. ISBN: 0-471-76115-X
- [4] Řehánek, Jaroslav. *Tepelná akumulace budov.* ČKAIT Praha 2, 2002. Rozsah: 280 stran. ISBN: 80-86364-59-3
- [5] Shrestha, Mila. *PCM Application-Effect on Energy Use and IA Temperature.* [online]. Norsko 2012.7, [cit. 2014-2-9]. Dostupné z: <https://www.ntnu.no/wiki/download/attachments/48431699/Master-Shrestha.pdf?version=1&modificationDate=1343120771625>. NTNU Faculty of Architecture and Fine Arts. Vedoucí práce prof. Arild Gustavsen.
- [6] Duška, Michal, *Akumulace Tepla ve výpočtu tepelné zátěže klimatizovaných prostorů.* [online]. Praha 2010. [cit. 2014-1-30]. Dostupné z: <http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/Duska.pdf>. Disertační práce. ČVUT Fakulta strojní Ústav techniky prostředí. Vedoucí práce prof. Ing. František Drkal, Csc.
- [7] ASHRAE HANDBOOK . Díl 1 – 4 . *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.* 1791 Tuttle Circle, N.E., Atlanta, GA 30 329. ISBN 1-931862-73-7. ISSN 1549-2370.
- [8] Chyský, Jan., Hemzal, Karel. A kol.: *Větrání a klimatizace. Technický průvodce.* ČMT Praha 1993. ISBN 80-901574-0-8.
- [9] Recknagel, Sprenger, Schramek. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.* Ouldenbourg Verlag GmbH, Munchen, 2003. ISBN 3-8356-3104-7.
- [10] Valenta, Vladimír. A kol.: *TOPENÁŘSKÁ PŘÍRUČKA 1, 2, 3.* Agentura ČSTZ, Praha 2007. ISBN 978-80-86028-13-2.
- [11] Kutateladze, Samson S., Borišansku, V.M. *Příručka sdílení tepla.* Přeložil Miroslav Hibš . Redakce teoretické literatury. Praha 1962.

- [12] Laboutka, Karel., Suchánek, Tomáš.: *Výpočtové tabulky pro vytápění. Vztahy a pomůcky*. Vydavatelství Společnosti pro techniku prostředí. Praha, 2001. ISBN 80-02-01466-9.
- [13] DuPont., DuPont™ Energain® FAQs. [online].©2014.[cit. 2014-1-28]. Dostupné z: http://energain.co.uk/Energain/en_GB/sales_support/faq.html.
- [14] Zavoralová, Pavla., *PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM*. [online].2011-4-18.[cit. 2014-2-10]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>
- [15] Zavoralová, Pavla., *PCM ve stavebnictví Díl 2: PCM jako stavební materiál – možnosti aplikace*. [online].2011-4-25.[cit. 2014-2-10]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7381-pcm-ve-stavebnictvi-dil-2-pcm-jako-stavebni-material-moznosti-aplikace>.
- [16] Zálešák, Martin., Postava, Josef., *Realizace Nestacionární metody měření tepelně technických vlastností stavebních materiálů*. Zdravotní technika a vzduchotechnika. Ročník 33 číslo 3, 1990 Praha.
- [17] Sánchez, L., Sánchez, P., Manuel C., Antonio., R., Juan F. *Microencapsulation of PCM with a polystyrene shell*. [online]. 2007-5.[cit. 2014-2-25]. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/226432010_Microencapsulation_of_PCM_with_a_polystyrene_shell/file/79e41509629a747d89.pdf.
- [18] Astra MS Software., *Software pro podporu projektování*. [online].©2014.[cit. 2014-3-14]. Dostupné z: <http://www.astrasw.cz/>
- [19] Šourek, Bořivoj. *Simulační prostředí TRNSYS*. [online].2004-7-30. [cit. 2014-2-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1956-simulacni-prostredi-trnsys>
- [20] Nejmark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le. H.-T., Dürig, M., Glass, A., Zweifel, G., *Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs*. [online].2002.[cit.2014-3-17]. Energy and Buildings 34. Dostupné z: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/ene-58.5181/lisatty7123/Ene-58_5181_neymark.pdf

- [21] Ostrý, Milan. *Zvyšování tepelně akumulčních schopností obalových konstrukcí*. [online]. 2004-2-4. [cit. 2014-3-13]. VUT FAST Brno. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/01_Pozemni%20stavitelstvi/1_03_Prostredi%20v%20budovach/Ostry_Milan.pdf
- [22] Habrovanský, Tomáš. *Řízení a monitorování vytápěcího a chladicího zařízení v laboratoři řídicích systémů budov*. [online]. Zlín 2008. [cit. 2014-1-20]. Diplomová práce. UTB Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Martin Zálešák. Csc.
- [23] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent*. [online]. 2011. [cit. 2014-3-26]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-fluent-brochure-14.0.pdf>
- [24] Hejhánek, Jiří. *Tepelná akumulace a teplotní setrvačnost u dřevostaveb*. [online]. 2006-10-1. [cit. 2014-3-27]. Stavebnictví a interiér. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/tepelna-akumulace-a-teplotni-setrvacnost-u-drevost/>
- [25] ESP-r. *ESP-r*. [online] [cit. 2014-2-24]. Dostupné z: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- [26] NEiSoftware, Inc. *NEi Nastran Advanced Finite Element Analysis*. [online]. 2014. [cit. 2014-4-1]. Dostupné z: http://www.nenastran.com/newnoran/pdf/NEiNastran_Brochure.pdf
- [27] Janáčková, D., Charvátová, H., Kolomazník, K., Blaha, A., *Procesní inženýrství – Transportní, fyzikální a termodynamická data*. UTB ve Zlíně Fakulta technologická, Zlín 2011. ISBN 978-80-7318-997-6.
- [28] Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, O. *Review of Passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency*. *Energy and Building* 59, 2013, 82-103. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813000157>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|---------|--|
| ANSI | American National Standards Institute |
| ASHRAE | American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers |
| BESTEST | Building Energy Simulation Test |
| CAD | Computer Aided Design |
| ČSN | Česká technická norma |
| FAI | Fakulta aplikované informatiky |
| FEA | Finite Element Analysis |
| IEA | International Energy Agency |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| OSB | Oriented strand board |
| PCM | Phase change materials |
| PID | Proporcionálně Integrační Derivační |
| TRNSYS | Transient System Simulation Tool |
| UTB | Univerzita Tomáše Bati |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Průběh teploty v místnosti po 5 dnech slunného letního počasí. Teploty v místnosti se udávají jako operativní teploty, tedy s přihlédnutím k povrchovým teplotám povrchů stavebních konstrukcí. [1] | 17 |
| Obrázek 2 Rozdělení teploty t napříč deskou, teplotní profil | 19 |
| Obrázek 3 Rozložení teplot uvnitř stěny při ochlazování, dle hodnoty Biotova čísla [3] | 22 |
| Obrázek 4 Přejímový děj teploty, LSA metoda pro různé časové konstanty [3] | 23 |
| Obrázek 5 Mikroskopický obrázek mikrokapslí parafínového vosku a) pohled na směs, b) zvětšená mikrokapsle c) průřez mikrokapslí [17] | 32 |
| Obrázek 6 Průběh tepelné kapacity v závislosti na teplotě [5] | 34 |
| Obrázek 7 Průběh tepelné vodivosti v závislosti na teplotě [5] | 34 |
| Obrázek 8 Porovnání akumulace tepla, stavební materiály tloušťky 5 mm, v teplotní rozsahu 18-24 °C [13] | 35 |
| Obrázek 10 Aplikace DuPont Energain v střešní konstrukci [13] | 37 |
| Obrázek 9 Uplatnění PCM DuPont Energain [13] | 37 |
| Obrázek 11 Příklad využití PCM materiálu v podlahovém vytápění | 38 |
| Obrázek 12 Cihly s výplní materiálu PCM [28] | 39 |
| Obrázek 13 Prostředí ESP-r [25] | 44 |
| Obrázek 16 Soustava akumulčních panelů v laboratoři D307 | 48 |
| Obrázek 15 Jednotlivé vrstvy uvnitř panelu | 49 |
| Obrázek 16 Měřicí přístroj Almemo 2390-8 | 49 |
| Obrázek 17 Termokamera EasIR 4 | 50 |
| Obrázek 18 Naměřený průběh ohřevu tepelné soustavy PT400 | 51 |
| Obrázek 19 Naměřený průběh chladnutí tepelné soustavy PT400 | 51 |
| Obrázek 20 Ohřev topnými fóliemi požadovaná teplota 32 °C, regulátor nastaven $P=5$ °C, $I=150$ s, $D=0$ °C | 52 |
| Obrázek 21 Ohřev topnými fóliemi požadovaná teplota 32 °C, regulátor nastaven $P=0,1$ °C, $I=30$ s, $D=0$ °C | 53 |
| Obrázek 22 Aproximace chladnutí panelu – naměřená data | 54 |
| Obrázek 23 Aproximace chladnutí panelu – vypočtená data | 55 |
| Obrázek 24 Vliv rozdílu teplot povrchu panelu a okolí na součinitel přestupu tepla | 61 |
| Obrázek 25 Průběhy chladnutí – naměřené hodnoty | 62 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 26 Průběhy chladnutí (simulace Matlab) | 63 |
| Obrázek 27 Termogram Emisivita = 0,6, povrchová teplota panelu 33,1 °C, Teplota okolí 25 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 3,2 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-02 17:08:00 | 65 |
| Obrázek 28 Termogram Emisivita = 0,39, povrchová teplota panelu 32,7 °C, Teplota okolí 25 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 3,5 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-02 16:24:00 | 66 |
| Obrázek 29 Sestava akumulčních panelů (natřený povrch) - měření tepelného toku a povrchové teploty | 67 |
| Obrázek 30 Termogram vrchní části panelu Emisivita = 0,97, povrchová teplota panelu 29,5 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 5 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:18:00 | 68 |
| Obrázek 31 Termogram spodní části panelu Emisivita = 0,97, povrchová teplota panelu 29,4 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 5 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:19:00 | 68 |
| Obrázek 32 Termogram celého panelu Emisivita = 0,97, povrchová teplota panelu 29,4 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 7 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:23:00 | 69 |
| Obrázek 33 Termogram obou panelů Emisivita = 0,98, povrchová teplota panelu vlevo 29,2 °C, panel vpravo 32,8 °C, Teplota okolí 24,8 °C, vlhkost 40 %, vzdálenost od objektu 8,5 m, Datum a čas pořízení: 2014-04-08 19:52:00 | 69 |
| Obrázek 34 Průběh vnitřní teploty, ohřev na 35 °C | 70 |
| Obrázek 35 Průběh teplot a tepelného toku na upravovaném panelu | 72 |
| Obrázek 36 Průběh teplot a tepelného toku na neupraveném panelu | 73 |
| Obrázek 37 Ohřev teplá voda, průběh teplot a tepelného toku (upravený panel) | 74 |
| Obrázek 38 Model tepelně akumulčního panelu SolidWorks | 76 |
| Obrázek 39 Uložení panelu v místnosti | 77 |
| Obrázek 40 Plošný graf teplot | 78 |
| Obrázek 43 Řez místností a panelu | 78 |
| Obrázek 42 Model místnosti a uložení akumulční desky na stěnu | 80 |
| Obrázek 43 Trajektorie přirozeného proudění modelu stěna | 80 |
| Obrázek 44 Simulace chladnutí panelu, počáteční teplota 32,3 °C | 81 |
| Obrázek 45 Počáteční průběh teplot – řez stěnou a panelem | 81 |
| Obrázek 46 Trajektorie proudění model podlaha | 82 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 47 Průběh teplot – řez místností a panelu | 83 |
| Obrázek 48 Plošný graf teplot, využití akumulčních desek na stěně..... | 84 |
| Obrázek 49 Trajektorie proudění stěna..... | 84 |
| Obrázek 50 Plošný graf teploty, uložení strop..... | 85 |
| Obrázek 53 Model místnosti D307 se zjednodušeným akumulčním panelem | 86 |
| Obrázek 54 Teplotní řez místností a panelu - stěna..... | 86 |
| Obrázek 53 Teplotní řez místností a panelu - podlaha | 87 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Parametry C, n pro výpočet Nusseltova kritéria | 26 |
| Tabulka 2 Činitel korekce v závislosti na určující teplotě [4] | 27 |
| Tabulka 3 Vlastnosti panelu DuPont Energain[13] | 35 |
| Tabulka 4 Emisivita materiálů použitých na soustavě s akumulacími panely [27]..... | 56 |
| Tabulka 5 Měření emisivity infrapyrometr panel 1 | 57 |
| Tabulka 6 Měření emisivity infrapyrometr panel 2 | 58 |
| Tabulka 7 Naměřené a vypočtené hodnoty Termální soustava | 59 |
| Tabulka 8 Biotovo kritérium..... | 62 |
| Tabulka 9 Časová konstanta - naměřený průběh teplot..... | 63 |
| Tabulka 10 Časová konstanta – simulace Matlab..... | 64 |
| Tabulka 11 Časová konstanta, úprava panelu..... | 71 |
| Tabulka 12 Naměřené a vypočtené hodnoty, úprava panelu | 71 |
| Tabulka 13 Naměřené hodnoty, ohřev teplou vodou..... | 75 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Graf teplot, tepelného toku ohřevu a chladnutí 32 °C

Příloha P II: Graf teplot, tepelného toku ohřevu a chladnutí 33 °C

Příloha P III: Graf teplot, tepelného toku ohřevu a chladnutí 34 °C

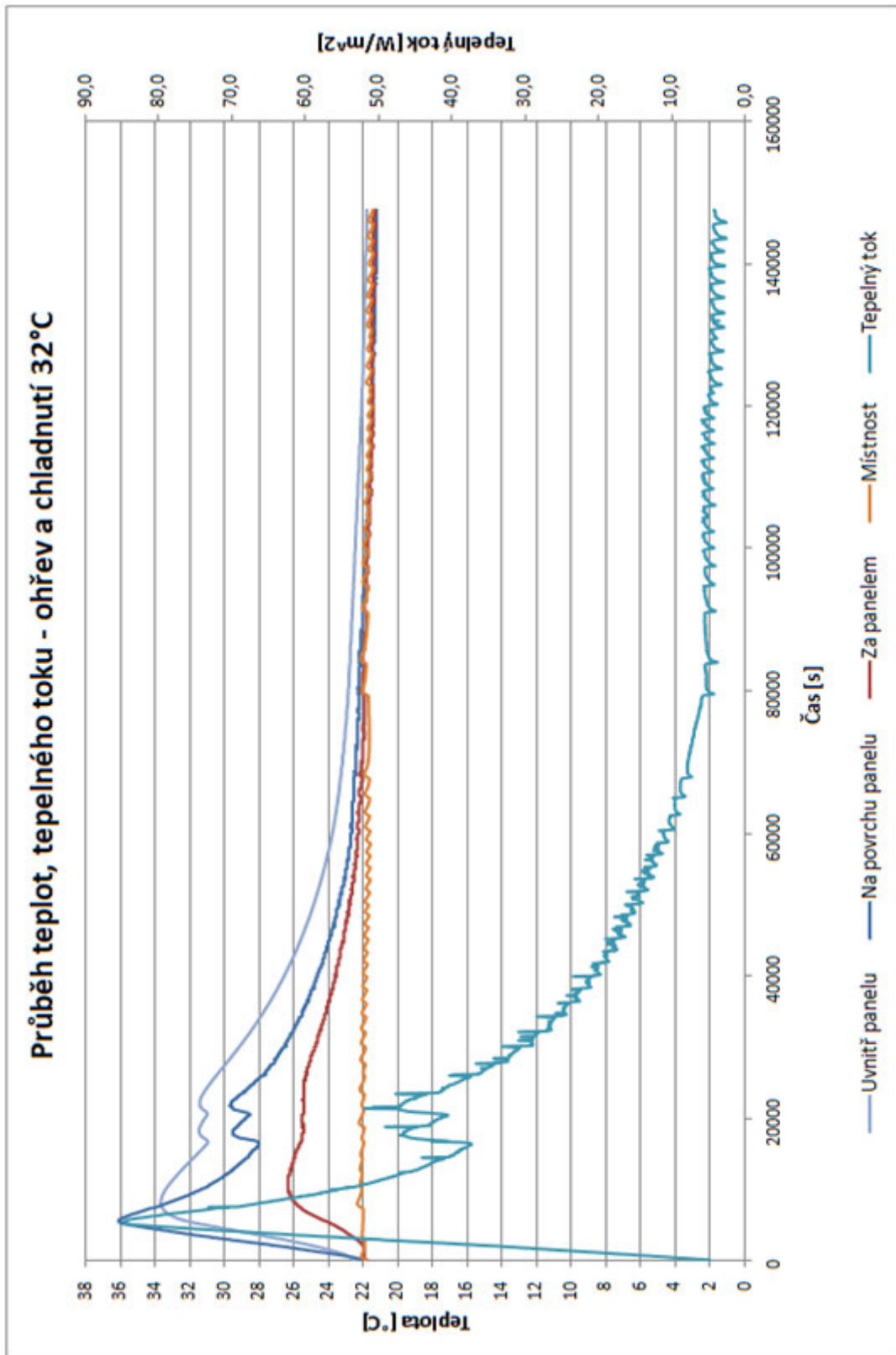
Příloha P IV: Graf teplot, tepelného toku ohřevu a chladnutí 35 °C

Příloha P V: Graf teplot, tepelného toku ohřevu a chladnutí 36 °C

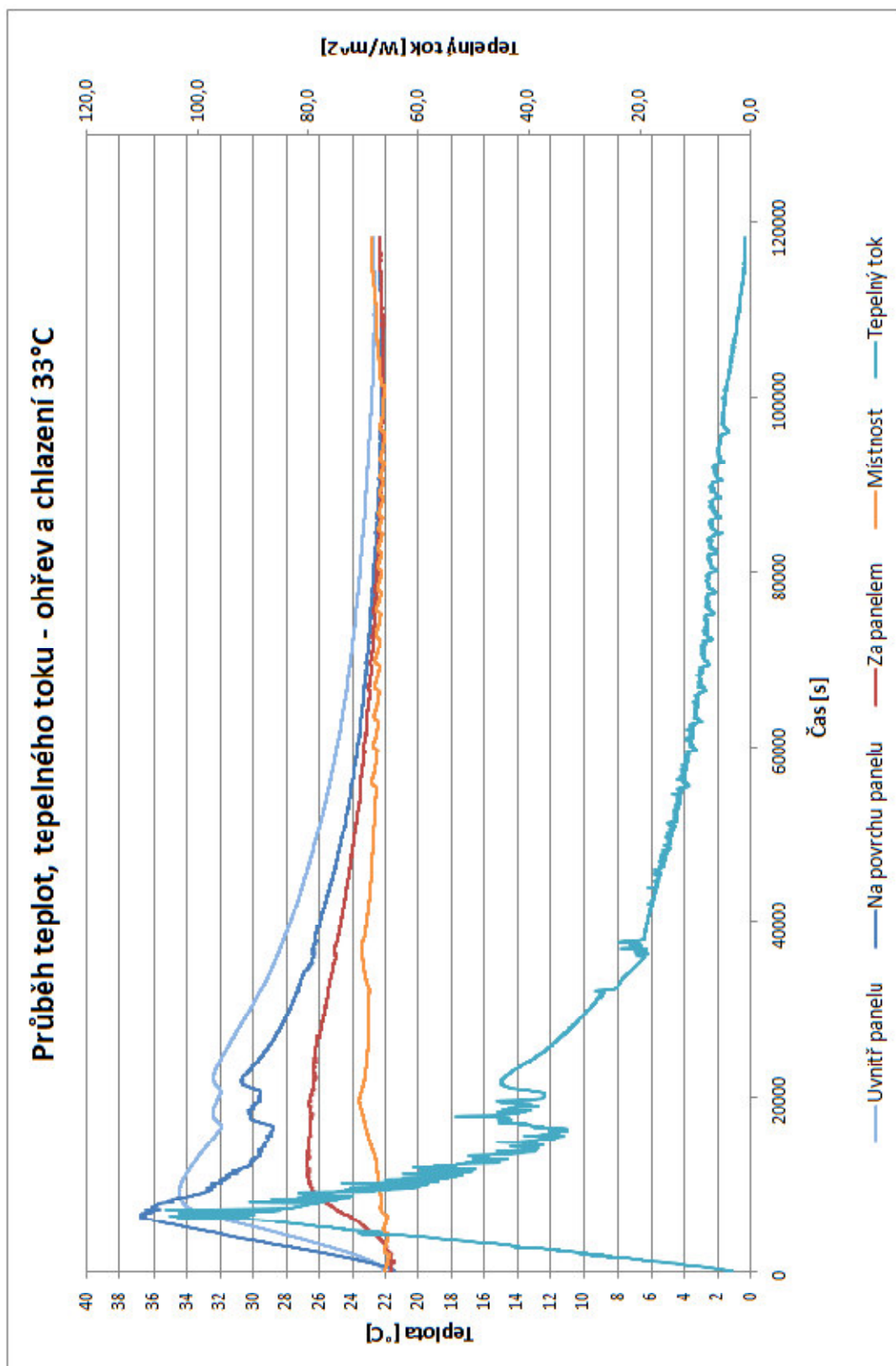
Příloha P VI: Graf teplot, tepelného toku ohřevu a chladnutí 37 °C

CD obsahuje pdf a doc soubor předložené diplomové práce

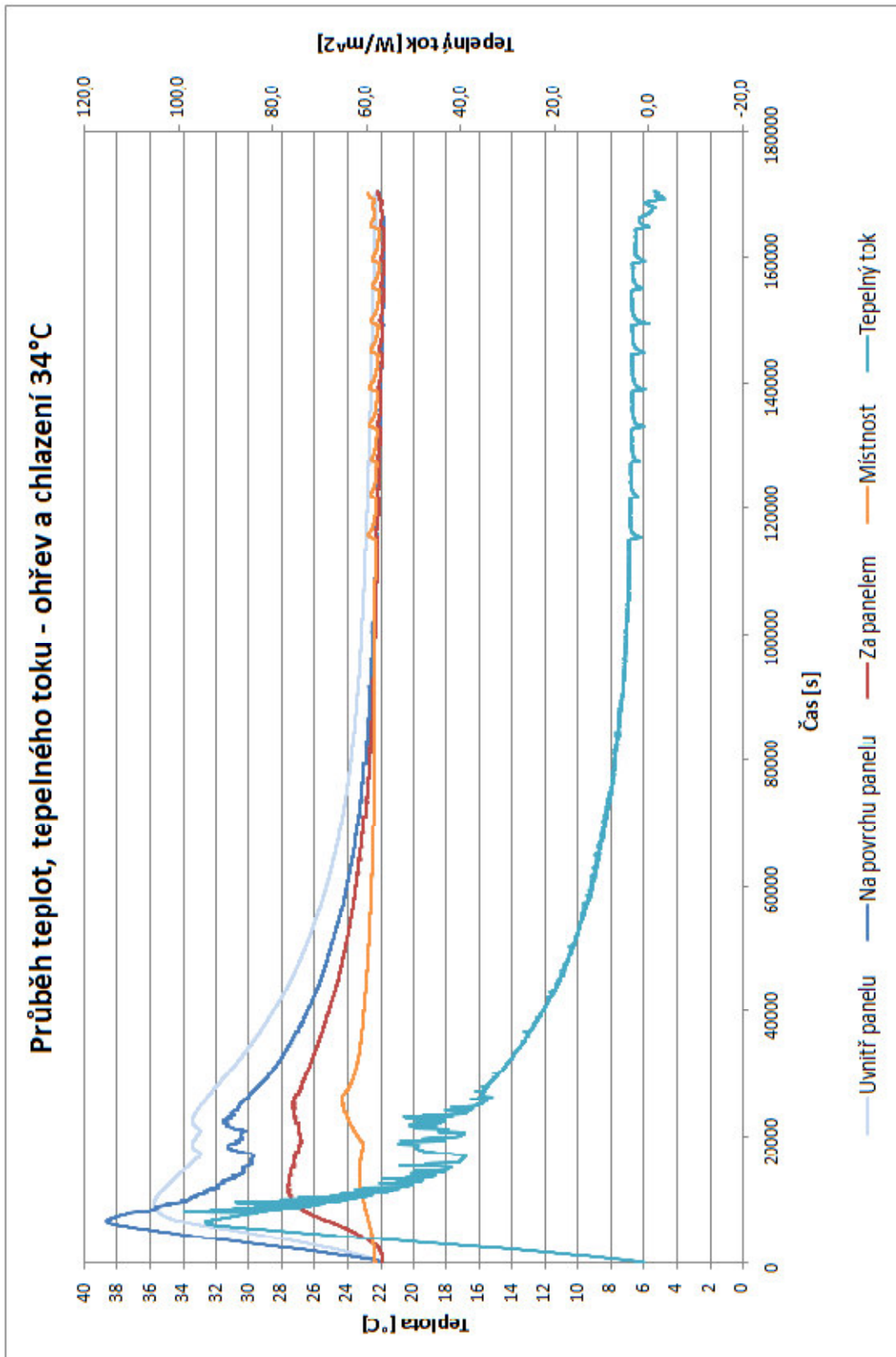
PŘÍLOHA PI: GRAF TEPLOT, TEPELÉHO TOKU OHŘEVU A CHLADNUTÍ 32 °C



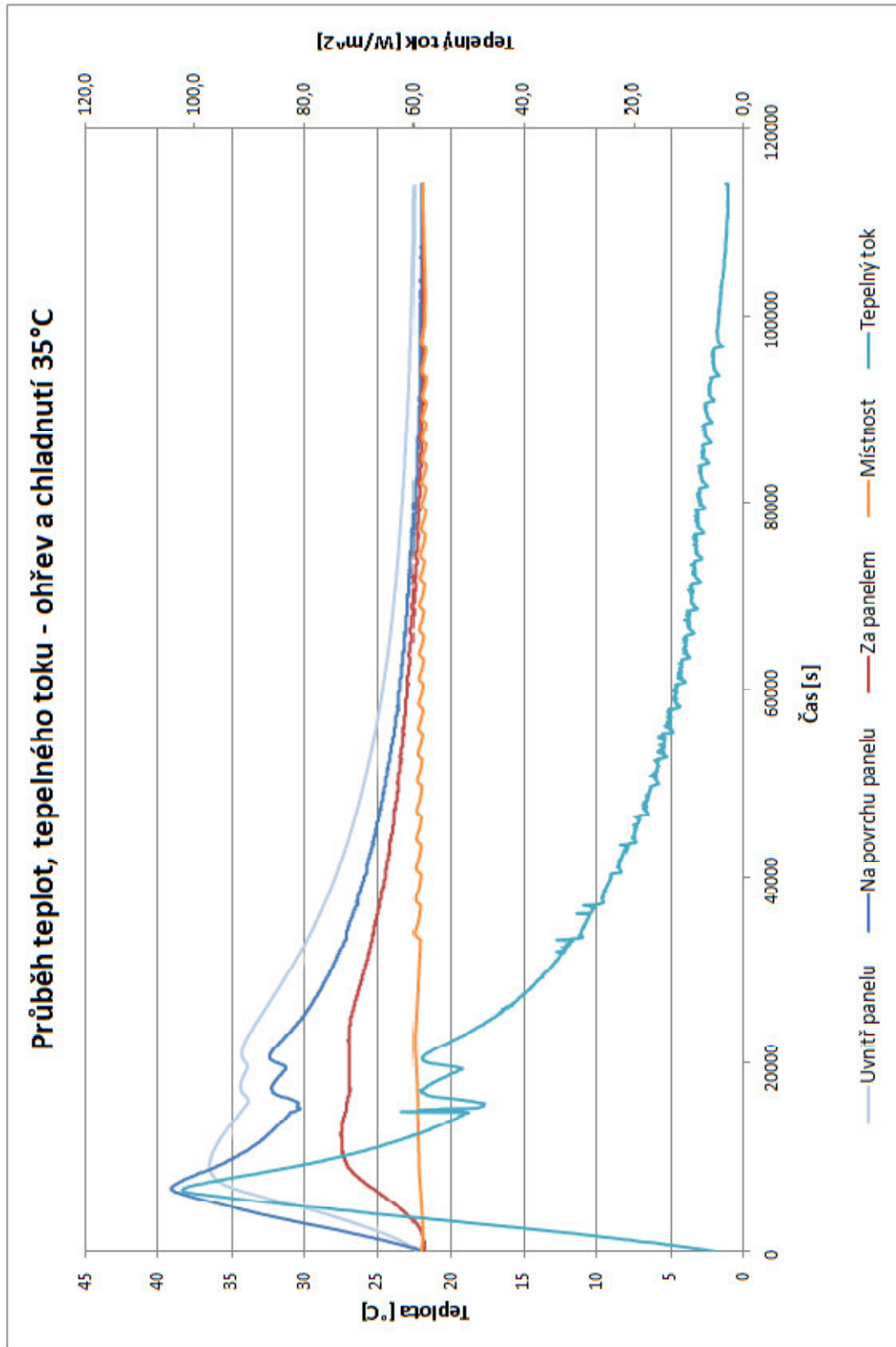
PŘÍLOHA P II: GRAF TEPLOT, TEPELÉHO TOKU OHŘEVU A CHLADNUTÍ 33 °C



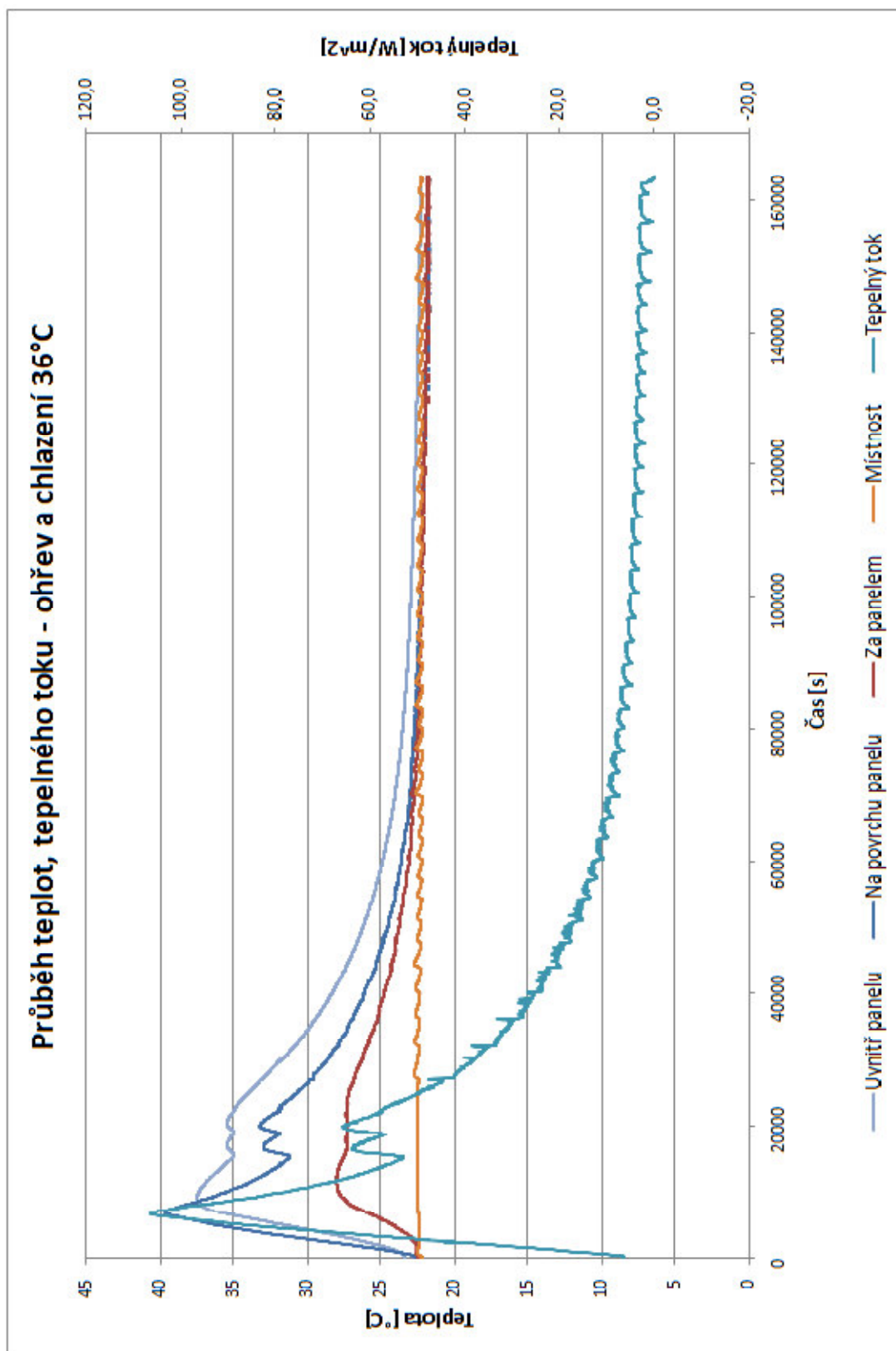
PŘÍLOHA P III: GRAFTEPLOT, TEPELÉHO TOKU OHŘEVU A CHLADNUTÍ 34 °C



PŘÍLOHA P IV: GRAF TEPLIT, TEPELÉHO TOKU OHŘEVU A CHLADNUTÍ 35 °C



PŘÍLOHA P V: GRAF TEPLOT, TEPELÉHO TOKU OHŘEVU A CHLADNUTÍ 36 °C



PŘÍLOHA P VI: GRAF TEPLŮT, TEPELÉHO TOKU OHŘEVU A CHLADNUTÍ 37 °C

