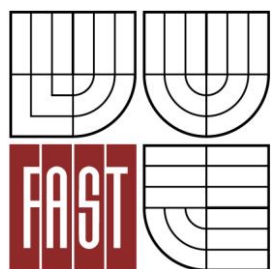




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

VLIV TEPELNÉ VODIVOSTI NA EFEKTIVITU AKUMULACE TEPLA

THE EFFECT OF THERMAL CONDUCTIVITY ON THE HEAT STORAGE EFFICIENCY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MARTIN STEIDL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID BEČKOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Martin Steidl
Název	Vliv tepelné vodivosti na efektivitu akumulace tepla
Vedoucí diplomové práce	Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016
V Brně dne 31. 3. 2015	

.....
prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Katalogy a odborná literatura. Předpis č. 62/2013 Sb. - Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 499/2006 Sb., o dokumentaci staveb. Předpis č. 499/2006 Sb. - Vyhláška o dokumentaci staveb. Předpis č. 20/2012 Sb. - Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby. Předpis č. 268/2009 Sb. - Vyhláška o technických požadavcích na stavby. Předpis č. 398/2009 Sb. - Vyhláška o obecných technických požadavcích zabezpečujících bezbariérové užívání staveb. Platné ČSN, příp. další podklady...

Zásady pro vypracování

Zadání VŠKP: Vliv tepelné vodivosti na efektivitu akumulace tepla
Cíl práce: Rámcové cíle práce jsou měření parametrů stavebních konstrukcí a studium procesů v nich probíhajících. Přesné stanovení cílů bude dohodnuto s vedoucím práce na základě odborné rozpravy v průběhu řešení teoretické části práce. Textová i výkresová část bude zpracována s využitím výpočetní techniky (v textovém a grafickém editoru). Výkresy budou opatřeny jednotným popisovým polem a k obhajobě budou předloženy složené do desek z tvrdého papíru potažených černým plátnem s předepsaným popisem se zlatým písmem.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o závislosti tepelné akumulace na tepelné vodivosti, která je charakterizovaná součinitelem tepelné vodivosti. Pro měření byly zvoleny dva základní materiály, a to univerzální omítková směs a sádrová omítka. Tepelná vodivost materiálů byla zvyšována přidáním mletého grafitu, který velice dobře vede teplo. U zhotovených vzorků se následně zkoumaly rozdíly v chování v nestacionárním teplotním poli a byly stanoveny tepelně-technické veličiny – měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti.

Klíčová slova

Tepelná vodivost materiálu

Tepelná akumulace materiálu

Tepelná jímavost materiálu

Grafit

Tepelná technika

Abstract

The diploma thesis is focused on the dependence of heat storage on thermal conductivity, which is characterized by the thermal conductivity coefficient. Two basic materials were chosen for the measurements – universal plaster mixture and gypsum plaster. The thermal conductivity of the materials was increased by adding milled graphite powder, which conducts the heat very well. The taken samples were then examined for differences in the behaviour in the non-stationary thermal field and thermal-technical parameters – the specific heat capacity and the thermal conductivity coefficient – were determined.

Keywords

Thermal conductivity of material

Heat storage of material

Thermal absorbing of material

Graphite

Thermal technology

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Martin Steidl *Vliv tepelné vodivosti na efektivitu akumulace tepla*. Brno, 2016. 85 s.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního
stavitelství. Vedoucí práce Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 1. 2016

.....
podpis autora
Bc. Martin Steidl

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, kterým je Ing. David Bečkovský, Ph.D., za jeho ochotné poskytnutí cenných rad a informací při řešení zadaných úkolů. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

V Brně dne 7. 1. 2016

.....
podpis autora
Bc. Martin Steidl

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Současný stav řešené problematiky	12
2.1	Tepelná zátěž budovy.....	12
2.2	Využívání obnovitelných zdrojů	14
2.2.1	Energetické zisky prostřednictvím oken.....	14
2.2.2	Energetické zisky vedením tepla obvodovou konstrukcí.....	16
2.3	Tepelně technické parametry	19
2.3.1	Teplotní útlum konstrukce	19
2.3.2	Fázový posun teplotních kmitů.....	19
2.3.3	Měrná tepelná kapacita	19
2.3.4	Součinitel přestupu tepla.....	20
2.3.5	Součinitel tepelné vodivosti	20
2.3.6	Tepelná jímavost materiálu.....	20
2.3.7	Tepelná jímavost konstrukce	21
2.4	Akumulace tepla.....	21
2.4.1	Akumulace krátkodobá a dlouhodobá	21
2.5	Způsoby akumulace tepla.....	23
2.6	Akumulace tepla v tradičních materiálech.....	24
2.6.1	Dřevo	24
2.6.2	Sádra	25
2.6.3	Keramika.....	25
2.6.4	Beton.....	26
2.6.5	Kámen.....	26
2.6.6	Omítka vápenocementová.....	27
2.7	Akumulační zásobníky.....	27

2.7.1	Vodní zásobníky	27
2.7.2	Štěrkové zásobníky tepla	28
2.8	Moderní způsoby zvýšení akumulace tepla	28
2.8.1	Materiály PCMs (Phase Change Materials) – materiály se změnou skupenství	28
2.8.2	Vosk	29
2.8.3	Voskové zásobníky	31
2.9	Grafit, jeho využití a vliv na tepelně-technické parametry	32
2.9.1	Šedý polystyren.....	32
2.9.2	Nabídka grafitu	33
3	Cíl práce.....	35
4	Příprava experimentu a měření	36
5	Použité přístroje, zařízení a pomůcky	54
5.1	Příprava	54
5.2	Pomůcky.....	54
5.3	Přístroje	54
5.4	Měření	54
6	Výsledky experimentu a jeho vyhodnocení.....	55
6.1	Měření vzorků namáhaných jednodenním teplotním kmitem.....	55
6.2	Měření vzorků izolovaných – simulace obvodové stěny – třídní kmit	59
6.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity	66
6.4	Aplikování rozdílných hodnot do programu Stabilita a Simulace	68
6.4.1	Simulace – léto.....	68
6.4.2	Stabilita – zima	70
6.5	Vliv příměsi grafitu na teplotní útlum a fázový posun teplotních kmitů konstrukce v letním období.....	71
6.6	Stanovení vlhkosti vzorků.....	75
6.7	Diskuze výsledků experimentu	76

7	Závěr	81
8	Seznam použitých zdrojů.....	82
9	Seznam použitých zkratek a symbolů.....	84
10	Seznam příloh	85

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá zvýšením akumulace tepla stavebních materiálů. Hlavním předmětem je zvýšení efektivity akumulace tepla omítkové směsi a sádrové omítky za použití mletého grafitu. Laboratorním měřením se testovalo, zda příměs grafitu o určitém hmotnostním procentu bude mít vliv na tepelně-technické parametry, které přímo ovlivňují rychlost akumulace tepla do látky. Pojednává také o různých možnostech akumulace tepla jak do tradičních materiálů, tak do moderních, prozatím v malé míře používaných materiálů.

2 Současný stav řešené problematiky

2.1 Tepelná zátěž budovy

Tepelná zátěž budovy se dělí na vnitřní a vnější. Za vnitřní tepelnou zátěž je považováno teplo vydávané spotřebiči, osvětlením a lidmi a oproti tepelným zátěžím vnějším jsou pouze zlomkové.[9]



Obr. 1 – rozdíl v architektuře 20. a 21. století – velikost prosklených ploch se výrazně liší [zdroj: www.roubenka-pronajem.cz; www.moderni-domy.cz]

Vnější zátěž je tvořena energetickými zisky obvodových konstrukcí formou konvekce a okny formou radiace a konvekce. Jak zátěž radiací, tak konvekcí, závisí na velikosti prosklené části A_g (m^2). Zátěž radiací závisí na intenzitě slunečního záření I_t (W/m^2), orientaci ke světovým stranám a technických parametrech zasklení.

Tepelná zátěž stěn je závislá jak na její ploše vystavené slunečnímu záření a na intenzitě slunečního záření, tak na skladbě, materiálovém řešení a orientace konstrukce ke světovým stranám.

U konvekce se počítá s přestupem tepla z vnějšího teplého prostředí do vnitřního chladnějšího prostředí. Vhodným návrhem obvodové stěny je možné využívat sluneční energii, která dopadne na povrch stěny odpoledne až v noci nebo časně ráno, kdy jsou venkovní teploty nízké. [8]

Například během poledne 21. srpna dopadne na každý m^2 konstrukce okolo 550 W energie. Na okno o rozměrech 1500x1500 mm tak při jasné obloze dopadne každou hodinu 1,2 kWh energie, která prostoupí do interiéru a na základě energetické a světelné propustnosti okna a součinitele světelné propustnosti okna se sníží o určitou hodnotu. Pokud je tedy na jih orientováno více obdobných oken, mohou svým energetickým ziskem ohrozit tepelnou pohodu interiéru a překročit mezní normovou teplotu vnitřního prostředí $T_{i,N} = 27^\circ\text{C}$.

Ovšem v období, kdy se venkovní teploty pohybují okolo příjemných $20\text{-}25^\circ\text{C}$ a noční teploty klesají k $5\text{-}10^\circ\text{C}$, se akumulace tepla dá využít efektivním způsobem. Slunce má v zimním období menší výšku nad obzorem a sluneční záření tak lépe proniká do interiéru. To je také důvod, proč jsou na m^2 plochy větší tepelné zisky. V říjnu hodnoty intenzity slunečního záření dosahují téměř 700 W/m^2 , což je o 150 W více než v srpnu. Teplo se naakumuluje do stavební konstrukce radiací a konvekcí. Radiací se akumuluje teplo v tu chvíli, kdy je povrch stěny ozářen paprsky, konvekcí v době, kdy vnitřní teplejší vzduch proudí okolo chladnější stavební konstrukce a předává jí tepelnou energii. Ve večerních hodinách začne teplota vzduchu v interiéru klesat dolů, tepelná energie akumulovaná v materiálu se postupně začne uvolňovat a přispívat k udržení teploty vzduchu.

V mnoha případech se budovy potýkají s přehříváním interiéru během letního období vlivem solárních zisků prosklenými částmi objektu a vnitřními zisky a teplota vystoupí nad normovou hodnotu $t_i = 27^\circ\text{C}$ a bude potřeba pro chlazení navrhnout klimatizační jednotku. Nástěnné jednotky mívají výkon zpravidla od 2,5 kW výš. Výrobci udávají průměrnou roční spotřebu okolo 150 kWh u nejméně výkonné klimatizační jednotky. Při takové spotřebě a vysoké pořizovací ceně a nákladech na údržbu je klimatizační jednotka velmi nevhodná a vznikají tak zbytečně vysoké náklady na provoz budovy, která zanechává větší ekologickou stopu.

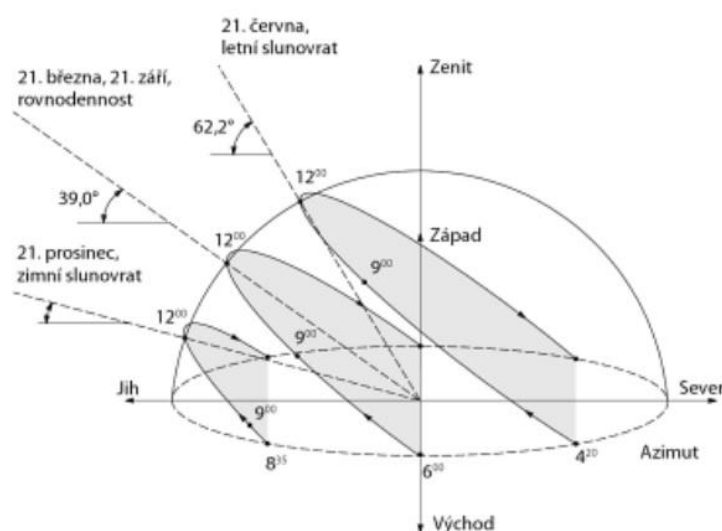
Problém úspory tepla na vytápění tak není jediný, který přispívá k tvorbě ekologické stopy. Solární zisky se během letních dnů pokud možno minimalizují navržením slunolamů, žaluzií, rolet nebo okenní výplně Heat Mirror s vnitřní fólií, která nepropouští teplo v létě z exteriéru do interiéru a v zimě z interiéru do exteriéru. [10]

2.2 Využívání obnovitelných zdrojů

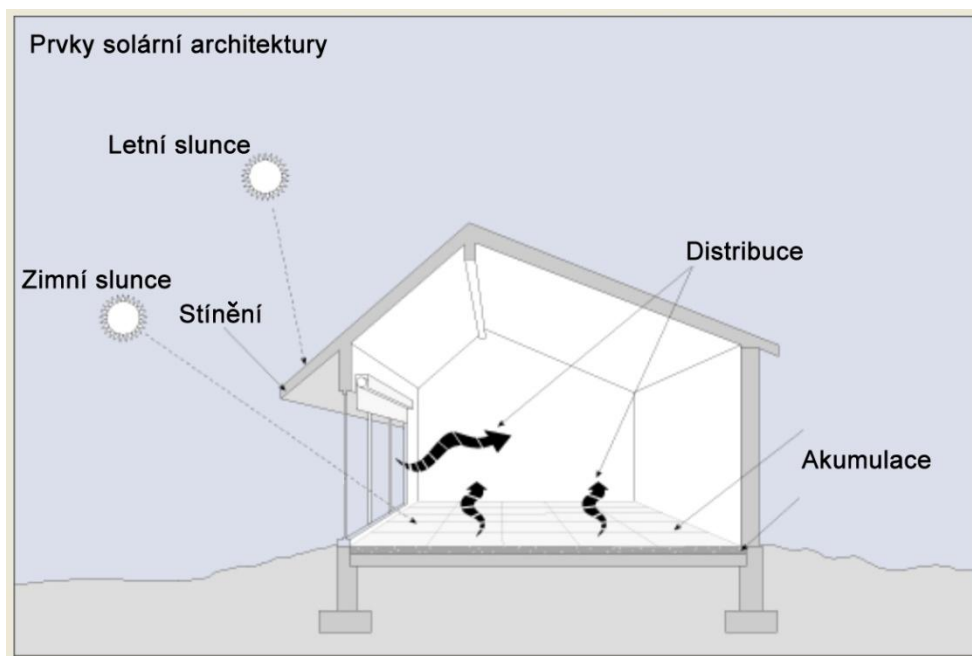
U bytové výstavby se uvažuje se slunečním zářením jak pasivním, tak aktivním. Jak ukazuje diagram 1, aktivní způsob využití sluneční energie je transformace na elektrickou energii pomocí fotovoltaických panelů nebo na teplo pro ohřev vody nebo vytápění objektu pomocí solárních kolektorů. Naproti tomu pasivní způsob využití energie uvažuje s přeměnou zachycené energie konstrukcemi budovy na teplo.

2.2.1 Energetické zisky prostřednictvím oken

Na obr. 5 je vidět roční úhrn dopadajícího záření. U bytové výstavby však hraje roli směr slunečního záření, resp. orientace stavební konstrukce a roční období. Na konstrukci orientovanou na jih dopadá daleko více sluneční energie než na konstrukci orientovanou na sever. Například 21. března dopadá v poledne na jižní stranu téměř 7x více energie než na stranu severní. Roční období zde figuruje ve výšce slunce nad obzorem h ($^{\circ}$). 21. června ve 12:00 hod. je v naší zeměpisné šířce výška slunce nad obzorem $62,2^{\circ}$, kdežto 21. prosince je výška pouze $16,5^{\circ}$ viz obr. 2. Díky snížení výšky slunce nad horizontem dopadají sluneční paprsky na větší plochu zasklení okna. [1]



Obr. 2 – Závislost výšky Slunce nad obzorem ($^{\circ}$) na ročním období [1]



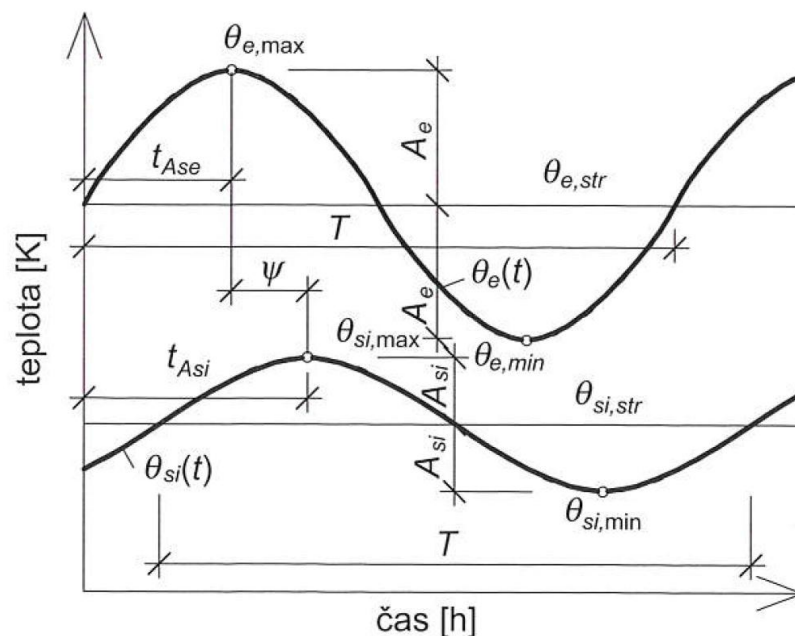
Obr. 3 – Prvky solární architektury – využití slunečního záření

[zdroj:www.stavebnikomunita.cz]

Celková energie, která dopadá na plochu zasklení, je však ponížena o určitou část, která závisí na několika faktorech. Jedná se zejména o celkovou propustnost slunečního záření okna, které vychází ze třech parametrů, a to propustnost slunečního záření okna, dále na základě počtu zasklení, znečištění zasklení a typu a úpravy zasklení, které zahrnuje pokovení okna, reflexní fólie, žaluzie, barevné provedení zasklení, záclony apod..

Při výpočtu energetické bilance zasklení, tedy při výpočtu celkových ztrát zasklením na jedné straně a s energetickými zisky vlivem slunečního záření na druhé straně, se uplatňuje parametr g (%). „Ten vyjadřuje propustnost slunečního záření, v rozmezí 0 až 1 (-) udává, kolik procent slunečního záření projde do interiéru. Je součtem krátkovlnné složky slunečního záření, které přímo pronikne do interiéru (T_e) a tepla, které izolační sklo absorbuje a znovu vyzáří do interiéru ($g = T_e + q$).“ [2]

S použitím lehkých obvodových konstrukcí ze dřeva vyvstává jeden zásadní problém, a to zejména u staveb, které mají mnoho prosklených ploch, nemají řešené stínění oken a případně i vzduchotechnickou jednotku pro výměnu vzduchu uvnitř objektu.



Obr. 4 – Fázové posunutí teplotních kmitů v letním období [11]

2.2.2 Energetické zisky vedením tepla obvodovou konstrukcí

Během letních měsíců se mohou objekty přehřívat. To je zapříčiněno jednak sluneční radiací skrze nestíněné prosklené plochy, ale z velké části taktéž prostupem tepla, které je vedeno konstrukcí během dne z teplejšího exteriéru do chladnějšího interiéru.

Tab 1 – Fázový posun v hodinách jednotlivých stavebních materiálů. [10]

Konstrukce	Fázový posun v hodinách
Zdivo cihelné z plných cihel, tl. 45 cm	14,7
Zdivo z cihel HELUZ STI 490 mm + tepelně izolační omítka	9,3
Ytong lambda 375 mm	15,0
KM Beta 240 mm + 180 mm minerální vlny	16,9
Šikmá střecha s 200 mm minerální vlny	4,7
Kamenné zdivo tl. 80 cm dle způsobu zdění	15,0 – 35,0

Jedná se o fázový posun teplotních kmitů, který vyjadřuje časový rozdíl (hod) mezi dobou maximální teploty na vnitřním povrchu a dobou maximální teploty venkovního vzduchu viz obr. 4. Působením slunce se povrch obvodového pláště budovy ohřívá a zvýšená teplota materiálu se šíří kondukcí směrem k interiéru. [4]

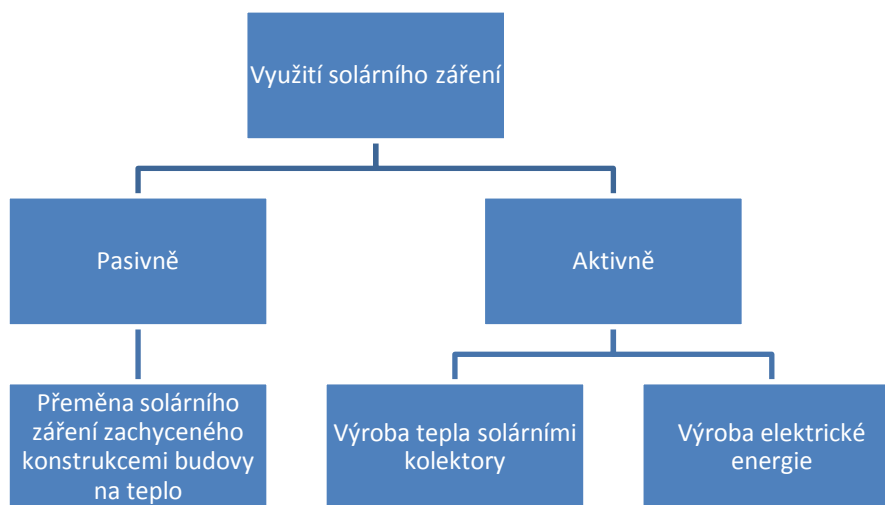


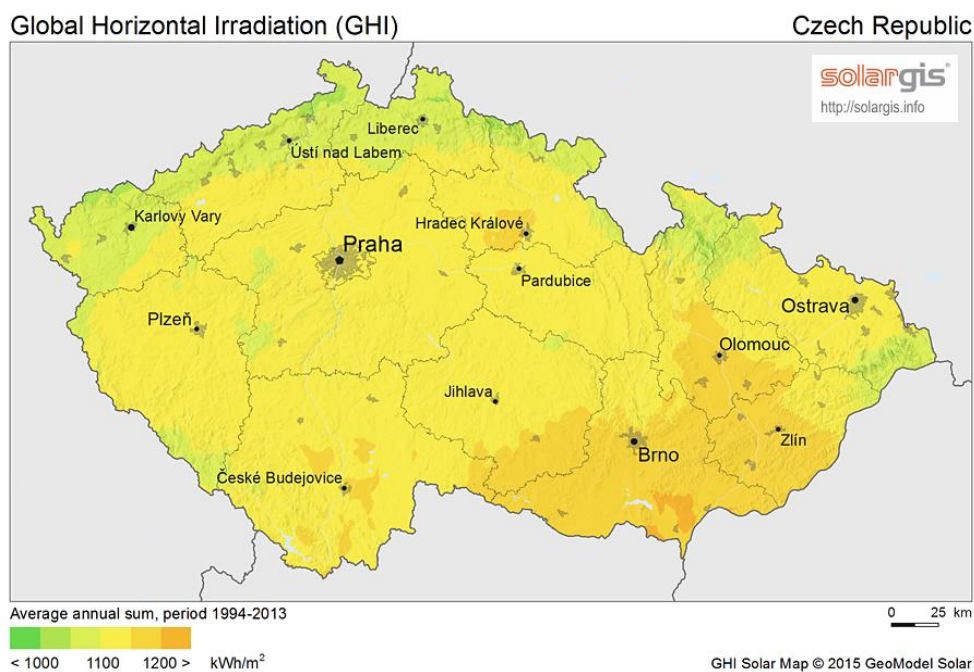
Diagram 1 - Znárodnění využití sluneční energie [zdroj: www.ekowatt.cz]

Cílem návrhu je, aby se fázový posun přibližoval co nejvíce 12 hodinám. Tím, co docílí skutečnosti, že stěna, která je přes den vystavena slunečnímu záření a je zahřívána, propustí tuto teplotu přes svoji mocnost do interiéru právě po 12 hodinách, tedy večer, kdy venkovní teplota poklesne a dochází k obrácenému tepelnému toku a k tepelným ztrátám. Stěna tak sálá teplo do interiéru. V tomto případě je potřebné, aby na vnitřní straně konstrukce byl navržen materiál, který má jednak vysokou tepelnou vodivost a schopnost akumulace tepla. Pokud je na vnitřní straně dřevo, které má malou tepelnou jímavost, akumulace tepla není tak výrazná, jako například u betonu, kamene nebo keramiky.

Tradiční keramické a vápenopískové zdící materiály dosahují hodnot fázového posunu 9-15 hodin, u zmiňovaných dřevostaveb se tato hodnota pohybuje okolo 3-7 hodin. [9]

Při použití této konstrukce na rodinném domě bude nejvyšší teploty na povrchu v interiéru dosaženo kolem 18:00, tedy tehdy, kdy je venkovní teplota stále poměrně vysoká, a tepelné zisky jsou nežádoucí.

Následně, v případě absence vzduchotechniky dochází k přehřívání budovy a musí být použito systému určených k chlazení. Jak je všeobecně známo, chlazení interiéru je daleko energeticky náročnější, než jeho vytápění a jelikož se používá nejčastěji klimatizace, která je poháněna elektřinou s vysokým činitelem emisního a konverzního faktoru, stává se tato záležitost ekologicky závažnou.



Obr. 5 – Na obrázku je znázorněn průměrný roční úhrn dopadajícího slunečního záření na m² za období 1994-2013. Na území České republiky jsou hodnoty v rozmezí 1000-1200 kWh/m² [zdroj: www.solargis.info.cz]

Využitím přebytečného tepla formou akumulace tepelné energie do stavební konstrukce s pozdějším využitím se nejenže eliminují náklady na chlazení objektu, ale ušetří i náklady na vytápění. Bohužel dřevo není tak dobrý akumulant tepla pro svou nízkou objemovou hmotnost a nízký součinitel tepelné vodivosti. Běžně se proto do interiéru dřevostaveb navrhuje vyzdívky z nepálených cihel nebo kamenné zdi, které mají řádově lepší tepelně akumulační schopnosti. Problém těchto řešení spočívá v tom, že se do dřevostavby, která je náchylná na vlhkost, vnáší mokrý proces zdění.

2.3 Tepelně technické parametry

2.3.1 Teplotní útlum konstrukce

„ – vyjadřuje schopnost konstrukce tlumit teplotní výkyvy vnějšího prostředí a udává, kolikrát je menší amplituda teploty vnitřního povrchu oproti amplitudě průběhu teploty venkovního vzduchu.“ [11]

$$v = \frac{1}{U \cdot R_{si}} \quad (1)$$

kde U je součinitel prostupu tepla v letním období ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
 R_{si} odpor při přestupu tepla na vnitřním povrchu ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)

2.3.2 Fázový posun teplotních kmitů

„ – fázové posunutí (zpoždění) teplotních kmitů vyjadřuje časový rozdíl (hod.) mezi dobou maximální teploty na vnitřním povrchu a dobou maximální teploty venkovního vzduchu. Fázové posunutí teplotních kmitů v letním období ψ (hod) se stanoví přibližně ze vztahu:“ [11]

$$\psi = 2,7 \cdot D \quad (2)$$

kde $D = \sum(R_j \cdot s_j)$
 R_j dle vztahu 15
 s_j dle vztahu 14

2.3.3 Měrná tepelná kapacita

„ – je mírou tepelné jímavosti látky vztažená na jednotku její hmotnosti. Rovná se množství energie, kterou je potřeba dodat vzorku materiálu o definované vlhkosti a hmotnosti 1 kg, aby se ohřál o 1 K., je definována vztahem:“ [11]

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta\theta} \quad (3)$$

kde c je měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 E energie (J)

m hmotnost látky (kg)
 $\Delta\Theta$ přírůstek teploty (K).

2.3.4 Součinitel přestupu tepla

„ – udává tepelný tok nebo výkon ve W , který se přenáší na 1 m^2 povrchu při rozdílu 1 K mezi teplotou stěny a teplotou prostředí. Je vyjádřen jako:“ [11]

$$R_{si} = \frac{q}{\Delta T} \quad (4)$$

kde R_{si} je součinitel přestupu tepla prouděním ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
 q hustota tepelného toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 ΔT rozdíl teplot mezi povrchem stěny a okolním prostředím (K).

2.3.5 Součinitel tepelné vodivosti

„ – vyjadřuje schopnost stejnorodého, izotropního materiálu vést teplo, je mírou schopnosti látky přenášet teplo vedením bez proudění látky. Je definován podílem hustoty ustáleného tepelného toku q a gradientu teploty v látce:“ [11]

$$\lambda = \frac{q}{-\text{grad}\Theta} \quad (5)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 $\text{grad}\Theta$ gradient teploty ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)
 q vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

2.3.6 Tepelná jímavost materiálu

„ – vyjadřuje schopnost materiálu přijímat teplo. Je definována vztahem:“ [11]

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho \quad (6)$$

kde b je tepelná jímavost ($\text{W}^2 \cdot \text{s}) / (\text{m}^4 \cdot \text{K}^2)$
 λ součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 ρ objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

2.3.7 Tepelná jímavost konstrukce

„ – vyjadřuje kontaktní ochlazovací účinek konstrukce na živý organismus, jednotkou je $(W \cdot s^{0,5}) / (m^2 \cdot K)$, stanoví se ze vztahu: “ [11]

$$B = B_{mat,j} \cdot (1 + K_j) \quad (7)$$

kde K_j je součinitel určující zvýšení (snížení) tepelné jímavosti povrchu vrstvy oproti tepelné jímavosti materiálu vrstvy, pro nejnižší vrstvu se uvažuje hodnota

$$K_j = 0$$

$B_{mat,1}$ tepelná jímavost materiálu j -té vrstvy stanovena ze vztahu:

$$B_{mat,j} = \sqrt{(\lambda_j \cdot c_j \cdot \rho_j)} \quad (8)$$

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

c měrná tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

ρ objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti ($kg \cdot m^{-3}$).

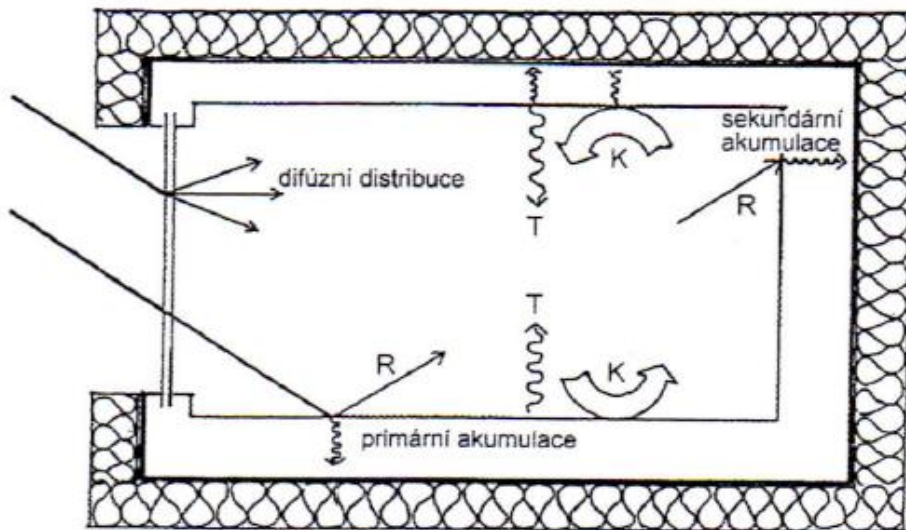
2.4 Akumulace tepla

Sluneční energie, která prostoupí do interiéru domu, ve většině případů převyšuje okamžité tepelné ztráty. Tato situace nastává logicky přes den, kdy je venku slunečné počasí a sluneční paprsky pronikají okny v případě absence stínění dovnitř domu. Zde nastává problém v období letních měsíců, kdy teplo nejsme schopni využít z důvodu vysokých exteriérových teplot. Proto je tento druh získaného tepla potřeba akumulovat a použít jej v období, kdy teploty poklesnou, a muselo by se v objektu přitápět.

2.4.1 Akumulace krátkodobá a dlouhodobá

Teplo se může akumulovat jak do stavebních konstrukcí krátkodobě, tak do akumulačních zásobníků s využitím energie v delším časovém horizontu. Akumulace tepla do stavební konstrukce má jednu nevýhodu. Akumulované teplo se uvolňuje prakticky ihned, jakmile teplota v interiéru poklesne. Pokud však objekt, příp. místnost momentálně nevyužíváme, tepelnou energii doslova ztratíme. Pokud akumulaci tepla

budeme řešit pomocí akumulčního zásobníku, teplo můžeme využít v tu chvíli, kdy opravdu potřebujeme.



Obr. 6 – Schéma akumulace tepla při přímém využití slunečního záření okny [11]

Teplo se do konstrukce dostává dvěma způsoby, a to přímým ozářením, kdy je konstrukce vystavena slunečním paprskům a konvektivním přenosem tepla, kdy proudící ohřátý vzduch v místnosti předává svoji tepelnou energii chladnější konstrukci domu. [10]

„Tepelná akumulace do stavebních konstrukcí závisí na měrné tepelné kapacitě c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) stavebního prvku, velikosti jeho povrchu, součiniteli přestupu tepla R_{si} ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$) mezi povrchem a vzduchem v místnosti, tepelné pohltivosti b ($(W^2 \cdot s)/(m^4 \cdot K^2)$) vyjadřující rychlost pronikání tepla do stavební konstrukce, teplotním rozdílu mezi vzduchem a povrchem konstrukce, době přívodu tepla do akumulujícího prvku a intenzitě slunečního záření.“ (Vaverka, 2006, s. 648)

Jak je popsáno výše, tepelná pohltivost b je závislá na objemové hmotnosti materiálu ρ , součiniteli tepelné vodivosti λ a měrné tepelné kapacitě c . To znamená, že pokud se zvýší součinitel tepelné vodivosti tradičního materiálu přidáním materiálu s daleko vyšším součinitelem tepelné vodivosti, zvýší se i schopnost akumulace tepla. Materiál bude schopen pojmout určité množství energie za kratší dobu a také určité množství energie opět odevzdat okolnímu prostředí. Pokud tak bude během dne docházet k výrazným teplotním výkyvům, tento materiál bude teplotu v prostředí vyrovnávat pružněji než materiál bez příměsí.

2.5 Způsoby akumulace tepla

Dobu využití obnovitelných zdrojů, jako sluneční záření nebo spalování biomasy nejsme schopni ovlivnit. Slunce svítí po většinu času v tu dobu, kdy zrovna teplo nepotřebujeme. Z toho důvodu je potřeba navrhnout způsob akumulace tohoto tepla pro pozdější využití ať už pro vytápění objektu, nebo pro ohřívání teplé užitkové vody.

Tepelnou energii je možno akumulovat 4 způsoby:

- akumulace s využitím citelného tepla
- akumulace s využitím skupenského tepla
- akumulace s využitím sorpčního tepla
- akumulace s využitím chemických reakcí

U bytové výstavby se používají nejčastěji zásobníky s využitím citelného tepla (vodní zásobníky), kdy se při předání tepla teplotně nosné látce zvýší její teplota. Zásobníky s využitím skupenského tepla pracují na odlišném principu, kdy se látce tepelná energie dodává, ale její teplota neroste, pouze se mění její skupenství z pevného na kapalné. [11]

Akumulační zásobníky se dále dělí na dvě skupiny z hlediska časových požadavků na:

- krátkodobé zásobníky
- dlouhodobé zásobníky

Krátkodobé zásobníky jsou použity pro uchování tepla pro maximálně několik dnů. Teplo získané během dne se akumuluje pro večerní spotřebu teplé vody, např. při hygieně. Dlouhodobé zásobníky jsou užívány i na časové období několika týdnů či měsíců, kdy se teplo uchovává pro využití v topné sezóně. [11]

Navržení objemu zásobníku pro budovu se odvíjí od jejího typu a účelu. Počet uživatelů má na velikost vliv tehdy, kdy je ze zásobníku odebírána tepelná energie pro ohřev teplé užitkové vody. Pokud se zásobník používá i pro vytápění budovy, musí se při návrhu počítat s celkovými tepelnými ztrátami objektu a s dobou, po kterou nebude zajištěna dodávka tepelné energie do systému jiným zdrojem tepla.

2.6 Akumulace tepla v tradičních materiálech

V následující kapitole jsou porovnány stavební materiály, které nejčastěji tvoří akumulaci vrstvu v běžné bytové výstavbě. V tabulce jsou znázorněny základní tepelně-technické vlastnosti materiálu, které mají vliv na akumulaci schopnosti. V posledním řádku tabulky je následně vypočteno, kolik tepelné energie je materiál o tloušťce 25 mm a ploše 1 m² schopný pojmout při zvýšení teploty materiálu o 1 K. Referenční tloušťka 25 mm byla zvolena jako tloušťka dvou sádkartonových desek tl. 12,5 mm, které se používají pro zhotovení příček nebo obklad dřevěných stěn a rámu dřevostaveb, nebo jako tloušťka vnitřní omítky.

2.6.1 Dřevo

Jak již bylo zmíněno výše, v dnešní době se začíná pomalu rozmáhat trh s dřevostavbami. Ty mají jednu zásadní nevýhodu a tou je nízká akumulace tepla. Pokud tak nastane přerušování dodávky tepla, v interiéru se rychle ochladí. Pokud se ovšem začne topit, stavba se rychle vytopí.

Jak je naznačeno v tabulce níže, dřevo je schopno pojmout více energie na 1 kg hmoty než beton nebo keramika, bohužel jeho nízká hustota a nízký součinitel tepelné vodivosti jeho tepelnou jímavost zhoršují. Kvůli nízké tepelné vodivosti se teplo hůře transportuje do látky a kvůli nízké objemové hmotnosti by muselo být použito většího objemu látky, aby se vyrovnala betonu nebo keramice.

Tab. 2 – Tepelně-technické vlastnosti dřeva [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,18	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	2510	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	400	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	180 520	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$
Množství uloženého tepla na 1 m ² , při tl. 25 mm	25,10	$\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

2.6.2 Sádra

Nejčastějším způsobem obložení interiérových zdí dřevostavby se provádí sádrokartonovými deskami. Pokud je dřevostavba z rámového konstrukčního systému dokonale zateplena, sádrokartonový obklad stěny bude tvořit akumulární vrstvu. Taktéž je tento materiál možné využít k obkladu vnitřního zateplení, které nemá prakticky žádnou tepelnou kapacitu. Sádra je horším akumulátem tepla než samotné dřevo.

Tab. 3 – Tepelně-technické vlastnosti sádry [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,22	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	1060	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	750	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	174900	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$
Množství uloženého tepla na 1 m^2 , při tl. 25 mm	9,75	$\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

2.6.3 Keramika

Keramické výrobky jsou další možnou variantou při zvyšování tepelné akumulace stavby. 1 m^2 stěny z keramického výrobku dokáže akumulovat až 1,5x více tepla než dřevo a 4x více jak sádrokartonová deska. V dřevostavbách se tak často zhotovují vnitřní nenosné příčky, které jsou nejčastěji situovány uprostřed dispozice domu tak, aby dodávaly v případě přerušení dodávky energie teplo do všech obytných místností. Nevýhodou tohoto provedení je vnášení mokrého procesu do stavby.

Tab. 4 – Tepelně-technické vlastnosti keramiky [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,86	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	900	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	1800	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	1 393 200	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$
Množství uloženého tepla na 1 m^2 , při tl. 25 mm	40,50	$\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

2.6.4 Beton

Beton se u dřevostaveb využívá prakticky pouze u základové desky, případně se do skladby podlah umísťují betonové dlaždice. Betonová vrstva se umísťuje nad podlahové topení, takže při topení se nejdříve nahřeje betonová roznášecí vrstva, která po nahřátí teplo předává dále do místnosti. Beton dokáže na 1 m² plochy akumulovat 2x více tepla než dřevo.

Tab. 5 – Tepelně-technické vlastnosti betonu [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	1,74	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	1020	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	2200	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	3 904 560	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$
Množství uloženého tepla na 1 m ² , při tl. 25 mm	56,10	$\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

2.6.5 Kámen

Kámen se u dřevostaveb používá obdobně jako keramické výrobky. Staví se z něj tepelně-akumulační příčky nebo je pouze v interiéru vyskládán jako součást vybavení interiéru a tvoří tak designový prvek. Na 1 m² dokáže zachytit obdobně jako beton až 2x více tepelné energie než dřevo. Stejně jako u cihel má tento proces negativní vliv na dřevo vnášením mokrého procesu do dřevostavby.

Tab. 6 – Tepelně-technické vlastnosti kamene [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	1,9	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	840	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	2500	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	3 904 560	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$
Množství uloženého tepla na 1 m ² , při tl. 25 mm	52,50	$\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

2.6.6 Omítka vápenocementová

Zděné stavby jsou v interiéru opatřovány nejčastěji vápennou omítkou. Ta tvoří podstatnou část tepelně akumulací vrstvy svislých konstrukcí. Teplo se v ní šíří stejnou rychlostí jako v keramickém výrobku, na druhou stranu má nižší objemovou hmotnost a měrnou tepelnou kapacitu.

Tab. 7 – Tepelně-technické vlastnosti vápenocementové omítky [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,88	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	840	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	1600	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	1 182 720	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$
Množství uloženého tepla na 1 m^2 , při tl. 25 mm	33,6	$\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}$

2.7 Akumulační zásobníky

2.7.1 Vodní zásobníky

Největší procento akumulací zásobníků, které se používají pro výstavbu rodinných domů, tvoří zásobníky s vodní náplní. Zásobníky se mohou napojit na kotel, elektrický dohříváč a tepelné čerpadlo a na solární kolektor. Objemy těchto zásobníků jsou na trhu dostupné od 120 l do 1000 l. Tento typ zásobníků je rozšířen zejména pro jejich cenovou dostupnost.

Moderní jsou v dnešní době akumulací nádrže s vnitřním zásobníkem. Tyto kompaktní nádrže umožňují jak uchování tepla pro vytápění objektu, tak pro ohřev vody. Na trhu jsou také k dostání jednotky, které v sobě mají zabudované tepelné čerpadlo. Tyto jednotky o velikosti šatní skříň dokáží nejen zajistit teplo pro vytápění a teplou užitkovou vodu, ale dokonce je i uchovat. Výhodou těchto jednotek je především jejich kompaktnost a malý rozměr, tudíž se kvůli nim nemusí zřizovat technická místnost, ale je možné je zabudovat do jiných účelových prostor.

Novým trendem v uchovávání tepla jsou stratifikační zásobníky, které jsou schopny ukládat přijatou ohřátou vodu ze solárního kolektoru přesně v té části zásobníku, kde je stejná teplota jako teplota vody na vstupu solárního okruhu do akumulací nádrže. Tím se zvýší účinnost, jelikož do solárního okruhu jde na vstupu co

možná nejchladnější voda a v horní části zásobníku je ukládána voda o co nejvyšší teplotě. Při odběru teplé vody je tak zaručen odběr o vysoké teplotě. [12]

Tab. 8 – Tepelně-technické vlastnosti vody [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,6	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	4180	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Hustota ρ	998	$kg \cdot m^{-3}$
Tepelná jímavost b	263 655 000	$(W^2 \cdot s)/(m^4 \cdot K^2)$

2.7.2 Štěrkové zásobníky tepla

Štěrkové zásobníky jsou nejméně rozšířené z důvodu daleko menší měrné tepelné kapacity oproti vodě a vosku. Z toho důvodu jsou štěrkové zásobníky větší, jelikož na stejný objem zásobníku akumulují až 5x méně tepelné energie. Zásobníky jsou tvořeny nejčastěji z betonové jámy, která je vyplněná štěrkem. Mezi jednotlivými zrny štěrku je proháněn ohřátý vzduch, který předává štěrku svoji tepelnou energii. Ohřátý vzduch může být přiváděn, např. ze zemních kolektorů, slunečních kolektorů nebo tepelných čerpadel. [12]

Štěrk musí mít určitou frakci, aby byla zajištěna efektivní funkčnost systému. V případě, že bude štěrk hrubý, bude vytvořena malá styčná plocha vzduchu s kamenem a transport tepla nebude natolik velký. Pokud však budou zrna štěrku příliš malá, a tudíž i mezery mezi jednotlivými zrny, bude potřeba vynaložit větší tlak, který bude hnát vzduch mezi zrny. Optimální velikost zrn je v rozsahu 2-5 cm. [12]

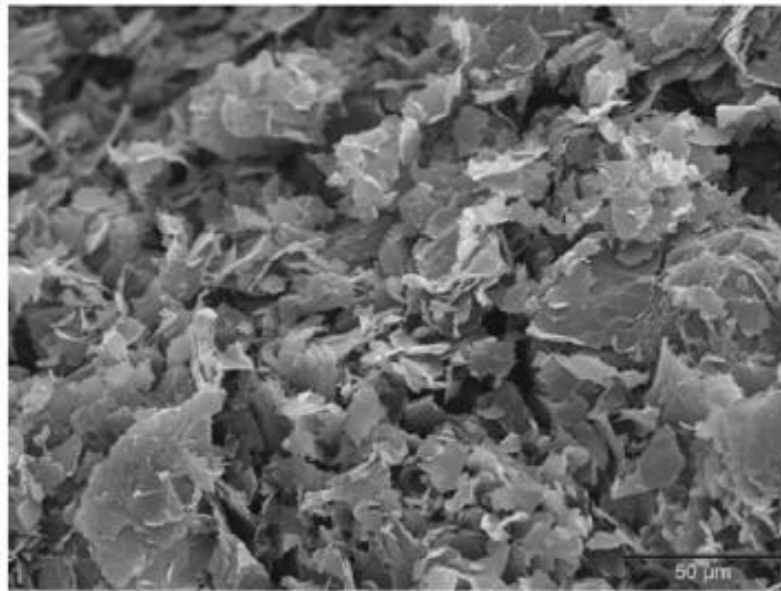
2.8 Moderní způsoby zvýšení akumulace tepla

2.8.1 Materiály PCMs (Phase Change Materials) – materiály se změnou skupenství

Materiály se změnou skupenství z pevného na kapalné jsou dnes aplikovány jako efektivní akumulanty tepla. Tyto materiály zahrnují například vodu, solné hydráty, vosky, některé hydrocarbonáty a slitiny kovu. Hydráty solí používané pro akumulaci tepla ve výstavbě vynikají nízkými náklady na materiál, na druhou stranu vysokými náklady na zpracování. Ekonomičtější je využívání materiálů přírodních s průměrnou

cenou, s vysokým latentním teplem a nízkými náklady na zpracování, tj. ty, které jsou nerozpustné ve vodě, nereagují na vzduchu a s běžnými obalovými materiály. [5]

Materiály PCMs, které se využívají pro akumulaci tepla, se dělí do dvou základních skupin, a to anorganické a organické. Anorganické materiály zahrnují hydráty solí, kovy a jejich slitiny. Organické materiály zahrnují vosky, mastné kyseliny a polyalkoholy. [5] (pozn. překlad autora)



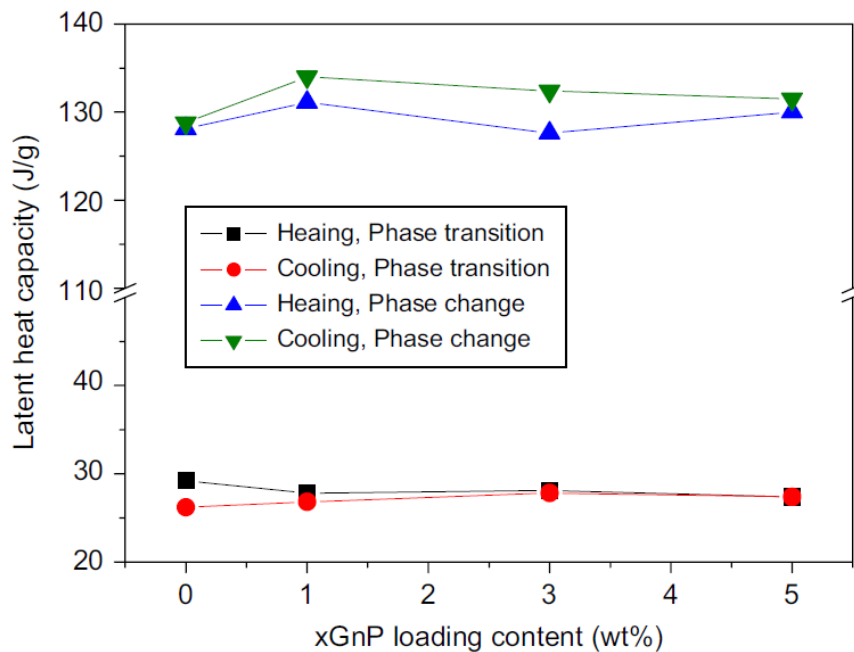
Obr. 7 – zvětšenina expandovaného grafitu (zvětšeno 350x) [5]

2.8.2 Vosk

Vosk je v současnosti považován za nejvíce nadějný PCM materiál, protože má vysoké latentní teplo, nízké pořizovací náklady, je stabilní, netoxický a nekorozivní. Vosk je široce využíván v aplikacích pro LHTES (Latent Heat Thermal Energy Storage) – akumulace tepla formou latentní energie kvůli jeho vhodným teplotním charakteristikám, jako jsou různé teploty změny fází, nízká teplota varu, vynikající teplotní a chemická stálost. [5] (pozn. překlad autora)

V zahraničí byl tento materiál široce použit v oboru letectví, mikroelektroniky, vojenských elektronických systémech pro jeho vynikající chladicí schopnost formou transportu tepla do materiálu a jeho vysoké elektrické vodivosti. Parafin je schopen při změně skupenství formou latentního tepla pojmout až 130 J/g. Navzdory těmto žádoucím vlastnostem má parafin nízkou tepelnou vodivost (0,21 – 0,24 W/mK). To je zásadní nedostatek, který zapříčiní nevyužití celé oblasti tání a krystalizace a určuje tak

limity pro jeho využití. Tento problém byl vyřešen aplikováním vysoce tepelně vodivých částic přímo do parafinového vosku. [5] (pozn. překlad autora)



Graf 1 – Latentní akumulace tepla parafínu/xGnP při přechodu a změně fáze v J/g v závislosti na obsahu hmotnostního procenta [5]

Jako vysoce tepelný vodič jsou použity expandované grafitové nanodestičky (xGnP – exfoliated graphite nanoPlatelets), které disponují tepelnou vodivostí až 140 W/(mK) a dále vykazují vysokou pórovitost a velký poměr stran destiček. [5] (pozn. překlad autora)

Výzkumem byl zjištěn vzrůst tepelné vodivosti. Zatímco tepelná vodivost čistého parafínu byla 0,26 W/mK, teplotná vodivost kompozitního PCM materiálu, která obsahovala 7% hmotnostního podílu grafitu xGnP byla zjištěna 0,8 W/(mK). Se zvyšováním obsahu grafitu v parafínu roste téměř linerárně tepelná a elektrická vodivost této disperze. Na druhou stranu latentní teplo, které se u čistého parafínu pohybuje v rozmezí 50-55°C, nebylo zvyšováním hmotnostního podílu grafitu sníženo. xGnP je tedy považován jako efektivní podpůrce zlepšování vedení tepla bez redukování jeho latentní tepelné kapacity. [5] (pozn. překlad autora)

2.8.3 Voskové zásobníky

Voskové zásobníky tepla pracují na jiném principu než vodní zásobníky. Zatímco se u vodních zásobníků s přiváděním tepelné energie zvyšuje teplota vody, u voskových zásobníků se vosk ohřívá jen do určité hranice, a to tepla tání T_t (°C). Ta se pohybuje okolo 50-55°C. Jakmile je dosaženo této hranice, vosk se i přes dodávku tepla přestane ohřívát a pouze mění své skupenství z pevného na kapalné. Toto skupenské teplo tání se také nazývá latentní teplo. Výhodou změny skupenství u vosku je to, že nedochází k podstatnému zvyšování objemu látky, a tudíž ani ke zvýšení tlaku. Parafínový vosk je levný, netečný, má vysokou hodnotu skupenského tepla tání. K záporům této látky lze přiřadit nízkou tepelnou vodivost charakterizovanou součinitelem $\lambda = 0,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tato nízká hodnota zapříčiní pomalé vedení tepla do vnitra vosku a sníží tak účinnost. Jak bylo popsáno výše, tento součinitel teplotní vodivosti se zvyšuje použitím moderních technologií, tedy přidáním upraveného grafitu, nebo zaběhnutými technologiemi, a to vložením kovových matic nebo lamel do zásobníku. [12]

Jak je znázorněno v tabulce 9, měrná tepelná kapacita vosku je přibližně o $900 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ menší. To by znamenalo, že vosku nepojme tolik tepla jako voda. Ovšem díky latentnímu teplu, které dosahuje hodnot až $130 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, se tepelná kapacita této látky podstatně zvýší.

Pro srovnání:

200 l (200 kg) vodní akumulární zásobník, při ohřátí z 21 °C na 55 °C pojme celkem $Q = 4180 \cdot 200 \cdot 34 = 28,4 \text{ MJ}$ energie.

200 l (190 kg) voskovým zásobníkem, který pojme celkem $Q = 3240 \cdot 190 \cdot 34 + 190 \cdot 130000 = 45,6 \text{ MJ}$ tepelné energie.

Jak je zřejmé ze zjednodušeného výpočtu, voskový zásobník o stejném objemu jako vodní dokáže pojmout až 1,6x více tepelné energie.

Tab. 9 – Tepelně-technické vlastnosti vosku [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,26	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	3240	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	950	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	263 655 000	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$

2.9 Grafit, jeho využití a vliv na tepelně-technické parametry

„Grafit je šesterečná modifikace uhlíku. Díky své specifické krystalické mřížce má ve směru kolmém na krystalickou osu c velmi nízkou tvrdost a dokonalou štěpnost. Zároveň má vysokou tepelnou a elektrickou vodivost, nízký koeficient tření a je odolný proti kyselinám a žáruvzdorný.“ [13]

„Podle velikosti vloček rozeznáváme grafit makrokrystalický ($>0,1$ mm), mikrokrystalický (0,001 - 0,1 mm) a kryptokrystalický (též amorfni, $<0,001$ mm). Různé velikosti šupinek mají různé využití i cenu. Všechny formy grafitu se využívají jako žáruvzdorný materiál. V oxidační atmosféře je grafit stálý jen do 500 °C, ale v redukční ho lze použít až do 3700 °C. Makrokrystalický grafit se používá v ocelárnách na nátěry. Kryptokrystalický grafit se používá ve slévárenství do formovacích písků a nátěrů forem. Mikro- a kryptokrystalický grafit se používají jako mazivo. Další použití jsou v gumárenském průmyslu, výroba baterií, tužek aj.“ [13]

Ve stavebnictví má grafit prozatím velmi malé zastoupení, a to především kvůli jeho vysoké ceně. V současnosti je ve stavebnictví nejvíce používán jako příměs do laků nebo je používán pro výrobu šedého polystyrenu. V následujících letech může najít uplatnění právě při výrobě stavebních materiálů, u kterých se očekává vysoká tepelná jímavost.

Tab. 10 – Tepelně-technické vlastnosti grafitu [6]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Součinitel tepelné vodivosti λ	119-165	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	837	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Hustota ρ	2250	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná jímavost b	263 655 000	$(\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$

2.9.1 Šedý polystyren

Největší uplatnění grafitu je při výrobě šedého polystyrenu. Ten má oproti klasickému polystyrenu lepší součinitel tepelné vodivosti. Zatímco klasický bílý polystyren má součinitel tepelné vodivosti $\lambda_b = 0,037-0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, šedý polystyren na $\lambda_s = 0,031-0,032 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tohoto rozdílu je dosaženo aplikováním jemně

rozemletého grafitu na nanočástice, kterým je rovnoměrně vyplněna pevná fáze polystyrenu. [13]

Jak je ale možné, že příměs velmi vodivého grafitu do tepelného izolantu zmenší jeho tepelnou vodivost? Je to dáno tím, že se zmenší složka radiačního (sálavého) prostupu tepla. Teplo v polystyrenu se šíří vedením v pevné fázi, prouděním v plynné fázi v uzavřených kuličkách a sáláním. Z výzkumu bylo zjištěno, že pokud se zvýší objemová hmotnost polystyrenu (tím pádem se zmenší objem stejného množství materiálu), sníží se i radiační složka prostupu tepla a tedy i součinitel λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Bohužel tento postup není zrovna nejlevnější variantou, jelikož pro stejný objem desky se musí použít daleko více materiálu. [13]

Proto byl na trh uveden šedý polystyren, který má grafitové částičky rovnoměrně rozprostřeny po povrchu kuliček PES, které účinkují jako mikroskopické absorbéry a zároveň reflektory. Mikroskopické částice se nedotýkají, díky tomu se nezvyšuje tepelná vodivost vedením tepla.

2.9.2 Nabídka grafitu

Na trhu je grafit běžně k dostání v několika modifikacích. Pro různé účely se dají pořídit grafitové přířezy, které se nabízejí v široké škále rozměrů. Další variantou je grafit v práškové podobě. Ten může být namletý na různé frakce. Nejčastější z nich jsou:

- Grafit vločkový o zrnitosti 0,16 mm
- Grafit jemně mletý o zrnitosti 0,025 mm
- Grafit pudrový o zrnitosti 7 μm

Ceny za 1 kg této látky se pohybují v závislosti na velikosti balení a velikosti frakce od 80 do 300 Kč/kg.



Obr. 8 – Jemně mletý grafit frakce 0,025 mm [7]

3 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zjistit, jaký vliv má přidání grafitu do tradičních materiálů. Konkrétně se jedná o univerzální omítkovou směs a sádrovou omítku, které jsou hojně užívány na mnohých typech staveb. Měřením vzorků se zjistí součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), který má vliv na tepelou jímavost materiálů b ($\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$. Čím vyšší součinitel λ bude naměřen, tím vyšší bude akumulční schopnost materiálů.

Materiál bude umístěn do klimakomory, kde bude měřen v neustáleném teplotním poli. Naměřené hodnoty následně budou zanalyzovány, zda se materiál dokáže pružněji přizpůsobovat teplotním výkyvům ve vnitřním prostředí a zda se tepelná energie naakumulovaná do materiálu během teplého dne ze stavebního materiálu uvolňuje právě v tu chvíli, kdy venkovní teplota poklesne k nejnižší hodnotě.

4 Příprava experimentu a měření

Pro provedení experimentu byly zvoleny dva základní tradiční materiály, do kterých byl přimíchán mletý grafit. Prvním je univerzální omítková a zdící malta, která je složena z minerálního plniva, cementu, vápenného hydrátu a přísad zlepšujících zpracovatelské a užitné vlastnosti směsi. Jako druhý materiál byla zvolena sádrová omítka filcovaná, která se skládá z minerálního plniva, sádry, vápenného hydrátu a přísad zlepšujících zpracovatelské a užitné vlastnosti směsi.

Do zvolených materiálů byl následně přimícháván grafit jemně mletý o zrnitosti 0,025 mm.

Jelikož grafit nebyl v tradičních materiálech použit a není známo, jaký má vliv na zpracovatelnost směsi a na následné vysychání a zrání materiálu a jeho pevnost, soudržnost a křehkost, bylo zhotoveno 10 vzorků z 8 různých směsí, na kterých byla hmatem vyzkoušena soudržnost a pevnost materiálu.



Obr. 9 – Vážení grafitu na laboratorní váze Radwag WLC 12/F1/K

Vzorky byly zhotoveny z připravených omítkových a sádrových směsí a mletého grafitu. Vzorky bez obsahu grafitu byly připravené z přesně naváženého množství materiálu a tomu odpovídajícímu množství záměsové vody. Ve směsích, které obsahovaly grafit, bylo přidáno tolik vody, aby byla zaručena její dobrá zpracovatelnost.

K vážení materiálu byla používána laboratorní váha s přesností 0,1 g.

Grafit byl do jednotlivých vzorků přidáván v množství 0,5; 1,0; a 5,0 hmotnostních procent. Směs, která obsahovala 5 hm. % grafitu byla již hůře zpracovatelná a mastná.

Ze směsí byly na podložce vytvarované destičky o tl. přibližně 20 mm, které se nechaly týden zrát.

Výsledkem bylo nepopraskání materiálu a nedrolivá struktura materiálu. Zhotovené vzorky dle procentuálního obsahu grafitu a látky jsou zanesené do tabulky 11 a znázorněny na obrázku 10.

Tab. 11 – Přehled zkušebních vzorků

Označení směsi	Složení vzorku	Počet zhotovených vzorků
1	Univerzální omítka	2
2	Univerzální omítka + grafit 1,0 hmotnostních %	2
3	Univerzální omítka + grafit 5,0 hmotnostních %	1
4	Sádrová omítka	1
5	Sádrová omítka + grafit 1,0 hmotnostních %	1
6	Sádrová omítka + grafit 5,0 hmotnostních %	1
7	Univerzální omítka + grafit 0,5 hmotnostních %	1
8	Sádrová omítka + grafit 0,5 hmotnostních %	1

Po provedení vizuální zkoušky zpracovatelnosti a celistvosti materiálu byla na základě objemu jednotlivých látek spočítána přibližná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Výpočet byl proveden dle níže uvedeného vztahu 9. Jedná se o hodnoty, kterých by bylo dosaženo při úplné homogenizaci směsi. Jednotlivé vstupní a výstupní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12.



Obr. 10 – Zkušební vzorky z 8 druhů směsí

$$\lambda_v = \frac{m_1 \times \lambda_1 + m_2 \times \lambda_2}{m_c} \quad (9)$$

kde	λ_v	je výsledný součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$)
	m_1	hmotnost omítkové směsi (kg)
	λ_1	součinitel tepelné vodivosti směsi ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$)
	m_2	hmotnost grafitu (kg)
	λ_2	součinitel tepelné vodivosti grafitu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$)
	m_c	celková hmotnost směsi (kg)

Jak je možné vidět v tabulce, výsledná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_v s příměsí 0,5 hm. % a 1,0 hm. % se pohybuje v rozmezí 1,2-2,2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$. Tato hodnota je pro pokus nezajímavá, jelikož je téměř stejná jako hodnota součinitele tepelné vodivosti betonu nebo kamene. Při 5% hmotnostním obsahu již hodnota vzrůstá na přibližných 7,2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$. Takto vysoké hodnoty nedosahuje žádný materiál běžně používaný při výstavbě bytových a rodinných domů.

Z toho důvodu byl zvolen 5% hmotnostní podíl grafitu v látce, ze kterého byly zhotoveny vzorky, které byly předmětem měření.

Tab. 12 – Přibližné stanovení součinitele tepelné vodivosti λ_v ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) jednotlivých směsí

Materiál	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Hmotnost (g)	Hmotnostní procento (%)	Celková hmotnost směsi (g)	λ_v ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Omítka	0,79	500			
Grafit	140	2,5	0,50%	502,5	1,483
		5	1%	505	2,168
		25	5%	525	7,419
Materiál	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Hmotnost (g)	Hmotnostní procento (%)	Celková hmotnost směsi (g)	λ_v ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Sádra	0,6	500			
Grafit	140	2,5	0,50%	502,5	1,294
		5	1%	505	1,980
		25	5%	525	7,238

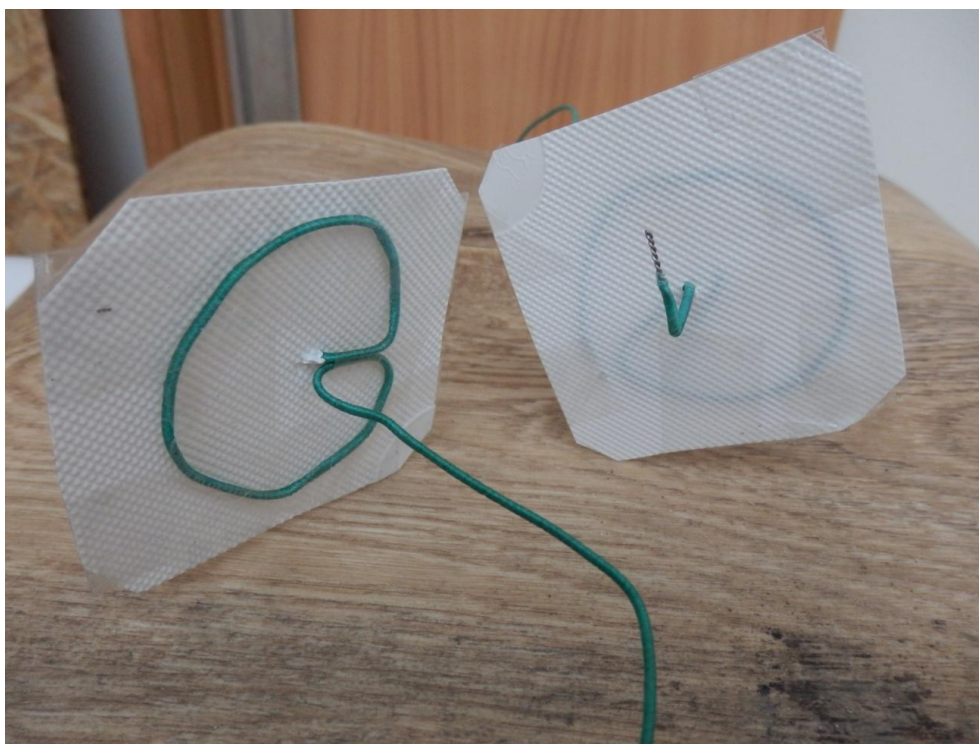
Pro zhotovení vzorku byly připraveny formy. Na ty byly použity přířezy z dřevotřískové desky s hladkou povrchovou úpravou, aby se hotové vzorky lépe odbednily a vyjmuly z formy. Jednotlivé přířezy byly slepeny dohromady lepidlem. Rozměr jednotlivých forem je 320×320 mm. Výšky forem byly zvoleny 2,0 a 4,0 cm. Celkový počet zhotovených forem je 8 ks, přičemž 4 ks forem mají výšku 2,0 cm a 4 ks forem mají výšku 4,0 cm.

Vzorků se pro měření zhotovilo celkem 16 ks. Každý testovaný materiál tak měl 8 ks vzorků, z nichž 4 ks byly tl. 2,0 cm a 4 ks byly tl. 4,0 cm; 4 ks byly s příměsí grafitu a 4 ks byly bez příměsí grafitu; ve 4 ks byla osazena teplotní čidla a 4 ks byly ponechány bez těchto čidel. Kompletní přehled zhotovených vzorků je znázorněn v tabulce 13 níže.

Před započítáním zhotovování vzorků bylo nutné připravit teplotní čidla. Ta byla umístěna uprostřed desky jak v ploše, tak v tloušťce. Bylo tedy nutné vymyslet způsob, jak docílit toho, aby čidla byla přesně v polovině tloušťky a během manipulace s čidlem se pozice drátku neměnila.



Obr. 11 – Formy zhotovené z dřevotřískových desek



Obr. 12 – Teplotní čidla připravená k osazení

Tab. 13 – Přehled všech zhotovených vzorků a rozdělení dle obsahu grafitu a osazení čidel

Č.	Materiál	Grafit	Tloušťka (cm)	Čidlo
1	Omítková směs	ANO	2	ANO
2				NE
3			4	ANO
4				NE
5		NE	2	ANO
6				NE
7			4	ANO
8				NE
9	Sádrová omítka	ANO	2	ANO
10				NE
11			4	ANO
12				NE
13		NE	2	ANO
14				NE
15			4	ANO
16				NE

Pro vyřešení tohoto úkolu byl použit čtverec tvrdého plastu o rozměrech cca 50×50 mm, do kterého byl uprostřed udělán malý otvor. Tímto otvorem se protáhl konec teplotního čidla o 2,0 cm v případě desky tl. 2,0 cm a o 3,0 cm v případě desky o tl. 4,0 cm. Konec drátu se pro lepší stabilitu ohnul o 1,0 cm, takže celková délka drátu vyčnívajícího z tvrdého plastu byla 1,0 cm a 2,0 cm, což jsou délky odpovídající polovině tloušťky vzorku. Drát teplotního čidla se z druhé strany plastu přilepil lepicí páskou, aby se pokud možno nevychýlil z kolmého směru. Ukázka připraveného čidla je na obrázku 12.

Jakmile byly připraveny formy a čidla, byly zhotoveny vzorky. Zhotovovaly se obdobným způsobem jako při zhotovování zkušebních destiček. Pro každý vzorek byla navážena přesná hmotnost materiálu, grafitu a přesný objem záměsové vody pomocí laboratorní váhy. Potřebná hmotnost materiálu se určila ze vztahu 10.



Obr. 13 – Aretace teplotního čidla v kolmé poloze

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

kde

m	je hmotnost materiálu (kg)
ρ	objemová hmotnost materiálu (kg/m^3)
V	objem formy (m^3)

Tab. 14 – Pořadí měření zhotovených vzorků

Pořadí měření	Vzorek
1.	Sádrová omítka tl. 4,0 cm + sádrová omítka tl. 4,0 cm + grafit
2.	Sádrová omítka tl. 2,0 cm + sádrová omítka tl. 2,0 cm + grafit
3.	Omítková směs tl. 4,0 cm + omítková směs tl. 4,0 cm + grafit
4.	Omítková směs tl. 2,0 cm + omítková směs tl. 2,0 cm + grafit

Směs se za pomoci elektrické vrtačky s nástavcem pro mísení promíchala a vložila do formy. Zde bylo nutné směs dostatečně ztuhnout, aby v materiálu nezůstávaly vzduchové bubliny, které by mohly zkreslit naměřené hodnoty.

Do určených vzorků se po naplnění forem nainstalovala teplotní čidla a pomocí dřevěných přířezů a latí se stabilizovala v kolmém směru, viz obrázek 13.

Během zrání omítek bylo nutné vzorky hydratovat, aby nedošlo k jejich popraskání vlivem smršťování od vysychání. I přes dostatečné hydratování vzorků během zrání a původní test soudržnosti na zhotovených destičkách se však nepodařilo zabránit popraskání vzorků z univerzální omítkové směsi s příměsí 5 hmotnostních % grafitu. Již po 12 hodinách byly vzorky popraskány a nebylo možné je použít pro další měření.

Z toho důvodu byla zhotovena směs stejným způsobem, která byla obohacena o příměs polyesterových vláken. Ta působí jako rozptýlená výztuž a přenáší tahové síly od smršťování a zabraňuje tak tvorbě trhlin na vzorku. Vlákna, která byla použita do směsi, jsou zachycena na obrázku 15.

Po úspěšném zhotovení všech vzorků proběhlo jejich odbednění a odříznutí plastové destičky sloužící pro aretaci teplotního čidla. Takto připravené vzorky byly následně měřeny.

První měření probíhalo v klimakomoře. Zde se vždy 2 vzorky umístily na rošt a na každý vzorek se na jeho povrch přilepilo další teplotní čidlo pomocí lepicí pásky. Čidlo nesmělo být nalepeno příliš u kraje, ale naopak v ploše, aby teplota nebyla ovlivňována rychlejším ohříváním nebo chlazením rohu vzorku. Tato čidla se protáhla otvorem ve stěně klimakomory a utěsnila se pružnou zátkou. Čidla se následně zapojila do teploměru s funkcí zaznamenávání dat na paměťovou kartu, který se nastavil na snímání a ukládání teploty každých 10 minut. Zapojení čidel do dataloggeru je znázorněno na obrázku 17.

Na každém vzorku tak byly měřeny teploty na povrchu tělesa a uprostřed jeho tloušťky. Tím se mohlo na časové ose sledovat, jak dlouho trvá vedení tepla z povrchu dovnitř tělesa. Měření probíhalo celkem 4x, vždy se do klimakomory umístil vzorek s příměsí grafitu a bez příměsi grafitu, aby bylo možné porovnat případné rozdíly ve vedení a v akumulaci tepla. V tabulce je znázorněn postup měření.



Obr. 14 – Popraskání vzorků s příměsí grafitu

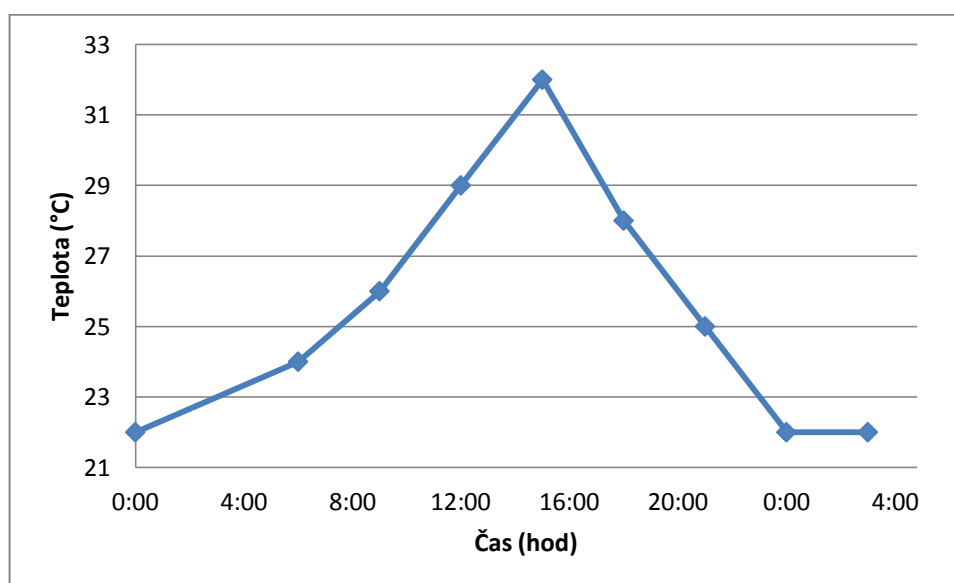


Obr. 15 – Polyesterová vlákna

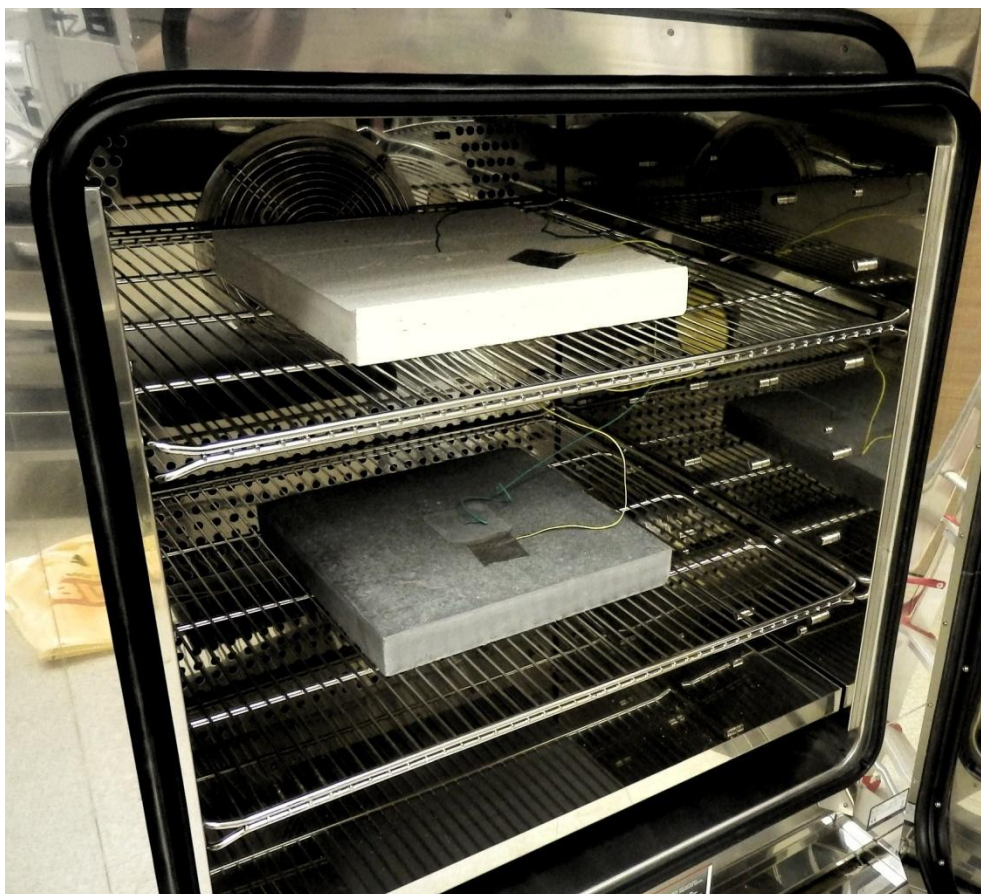
Vzorky se v klimakomoře zatěžovaly teplotním kmitem odpovídajícím dennímu průběhu venkovních teplot. Průběh teplot je znázorněn v tabulce 15. Z naměřených hodnot tak bude jasné, který ze dvou materiálů se rychleji zahřívá (akumuluje teplo) a který rychleji ochlazuje (vyzařuje teplo). Materiál s vyšší tepelnou vodivostí, tedy s vyšším součinitelem tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$), vede teplo rychleji, a proto bude teplota uprostřed vzorku s příměsí grafitu vyšší, než u vzorku bez příměsí grafitu.

Tab. 15 – Teplotní kmit

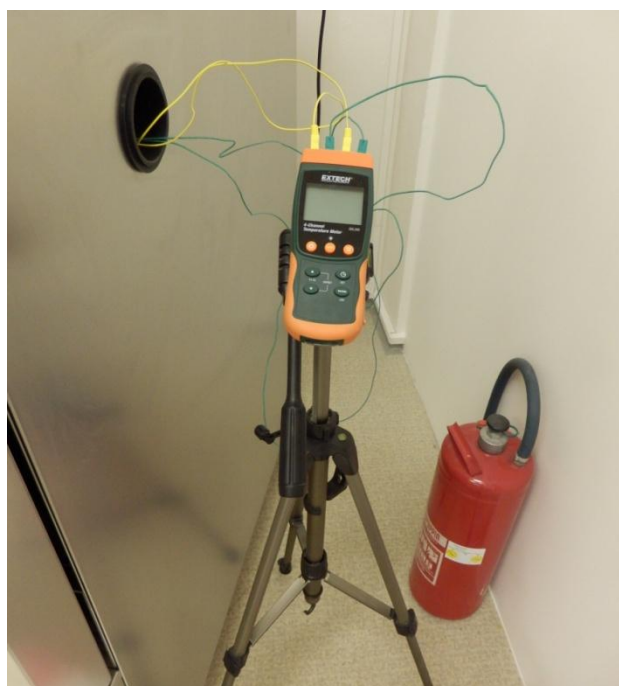
Č.	Časový úsek	Doba trvání (h)	Teplota (°C)
1	00:00 – 06:00	6,0	22,0
2	06:00 – 09:00	3,0	24,0
3	09:00 – 12:00	3,0	26,0
4	12:00 – 15:00	3,0	29,0
5	15:00 – 18:00	3,0	32,0
6	18:00 – 21:00	3,0	28,0
7	21:00 – 24:00	3,0	25,0
8	24:00 – 03:00	3,0	22,0
9	03:00 – 03:00	24,0	22,0



Graf 2 – Grafické znázornění teplotního kmitu pro tepelné zatěžování vzorků



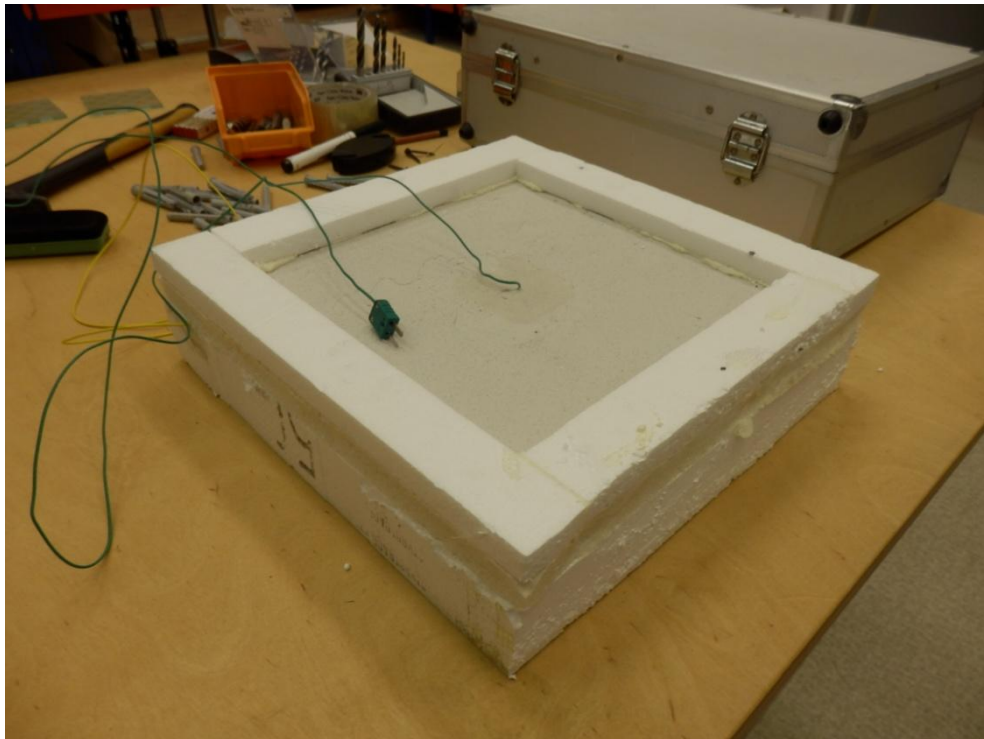
Obr. 16 – Vzorokly v klimakomoře s osazenými teplotními čidly připravené k měření



Obr. 17 – Napojení teplotních čidel do teploměru se záznamem na paměťovou kartu

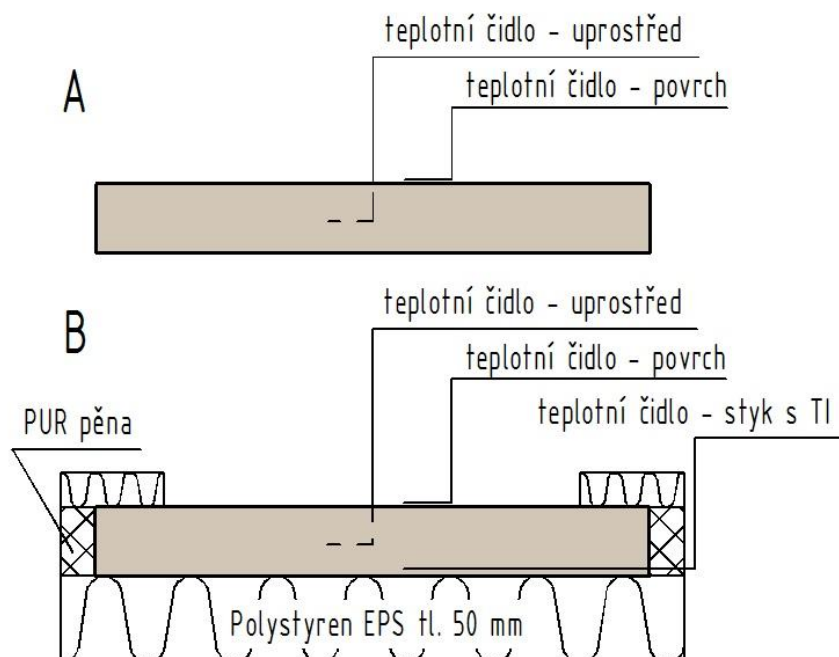
Teplotní kmit značí denní průběh teplot. Kmit začíná o půlnoci na $22,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, po 6 hodinách se teplota zvýší o $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ atd. Maximální teploty $32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je dosaženo mezi 15:00–18:00 hodinami a následně teplota začne klesat k původním $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po skončení kmitu, který trvá 24 hodin, nastává ustálení teplotního kmitu na dalších 27 hodin.

Další měření bylo obdobné, avšak vzorek měl simulovat obvodovou stěnu, která je ohřívána pouze z jedné strany. Tímto způsobem se daleko lépe simuluje teplotní průběh v konstrukci. Vzorek o tl. 2,0 cm byl oblepen tepelnou izolací z polystyrenu zespodu tl. 5,0 cm, vrch desky se oblepil po obvodě páskem o šířce 4,0 cm a okraje se dopěníly PUR pěnou, aby teplotní pole odpovídalo co nejdříve realitě. Teplotní čidla byla osazena na povrchu vzorku, uprostřed vzorku a naspod vzorku (mezi vzorkem a tepelnou izolací). Z výsledků měření bude možné zjistit průběh teplot v celé tloušťce vzorku a bude možné zjistit, jakou maximální teplotou bude disponovat spodní strana vzorku při nastaveném teplotním kmitu. Jinak řečeno bude možné zjistit rozložení teploty ve vzorku.



Obr. 18 – Zaizolování vzorků pomocí polystyrenu pro simulaci obvodové stěny

Během tohoto měření mohl být do klimakomory umístěn pouze jeden vzorek, a to z toho důvodu, že teploměr, který ukládá data do paměti má pouze 4 kanály pro připojení teplotního čidla. Jelikož jeden vzorek má 3 čidla, další vzorek nebylo možné zapojit.



Obr. 19 – Schéma umístění teplotních čidel na vzorcích; A – teplotní čidla pro měření jednodenního kmitu; B – teplotní čidla na tepelně izolovaném vzorku pro měření třídenního kmitu

Měření probíhalo na vzorcích ze sádry a sádry s příměsí grafitu. Byly vystaveny teplotnímu kmitu uvedeném v tabulce 16 po dobu přibližně 3 dnů. Nyní však nebyly použity průměrné venkovní teploty, avšak průměrné interiérové teploty.

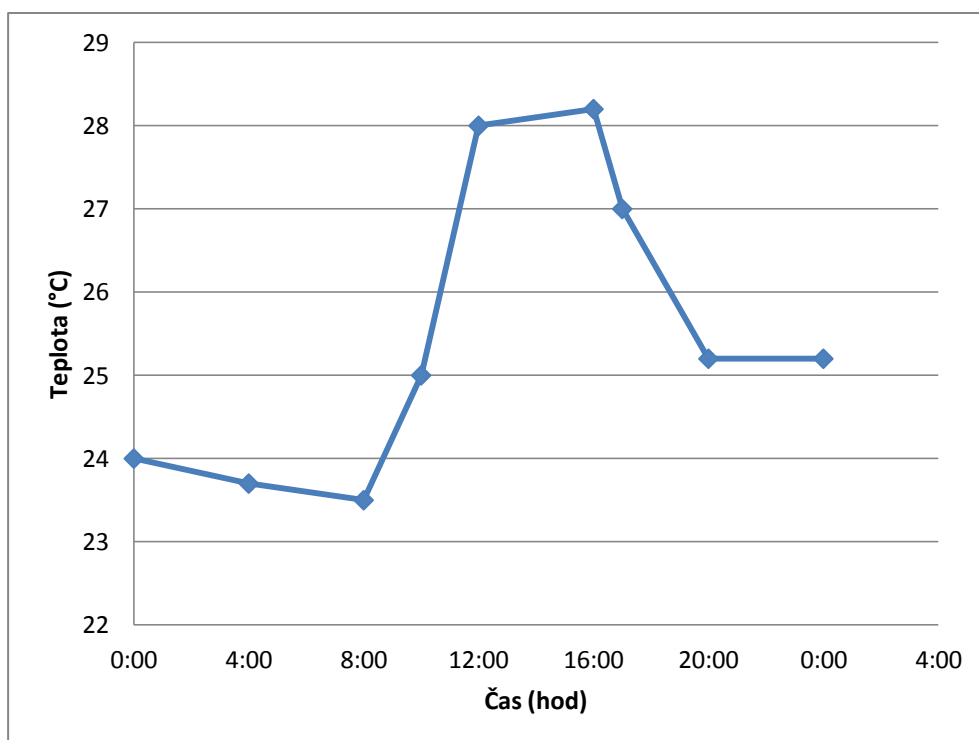
Po dokončení měření změn tepla na vzorcích v závislosti na teplotních kmitech se pokračovalo stanovením hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) pomocí měřicího přístroje – Isometu model 2104. Na stůl se připravily podkladky z tepelného izolantu, na které se umísťovaly jednotlivé vzorky tak, aby pod nimi byla vzduchová mezera. Čidlo bylo umísťováno na vzorku tak, aby se pod ním nevyskytoval podkladek. Každý vzorek tl. 2,0 cm, který byl použit pro měření v klimakomoře, byl zapomocí čidla změřen na 4 místech. Ostatní vzorky tl. 4,0 cm byly změřeny pouze jednou z důvodu ověření, zda se hodnota nepohybuje v širokém rozmezí. Taktéž byly změřeny

ostatní vzorky, které nebyly použity pro měření v klimakomoře a jedním měřením bylo porovnáno, zda se hodnoty součinitele tepelné vodivosti výrazně neliší.

Tab. 16 – Teplotní kmit pro zatěžování tepelně-izolovaného vzorku

Teplotní kmit pro zatěžování tepelně-izolovaného vzorku			
Č.	Časový úsek	Doba trvání (h)	Teplota (°C)
1	00:00 – 04:00	4,0	24,0
2	04:00 – 08:00	4,0	23,7
3	08:00 – 10:00	2,0	23,5
4	10:00 – 12:00	2,0	25,0
5	12:00 – 16:00	4,0	28,0
6	16:00 – 17:00	1,0	28,2
7	17:00 – 20:00	3,0	27,0
8	20:00 – 24:00	4,0	25,2

Pozn.: Teplotní kmit se opakuje 3x



Graf 3 - Grafické znázornění teplotního kmitu pro tepelné zatěžování vzorků izolovaných tepelnou izolací

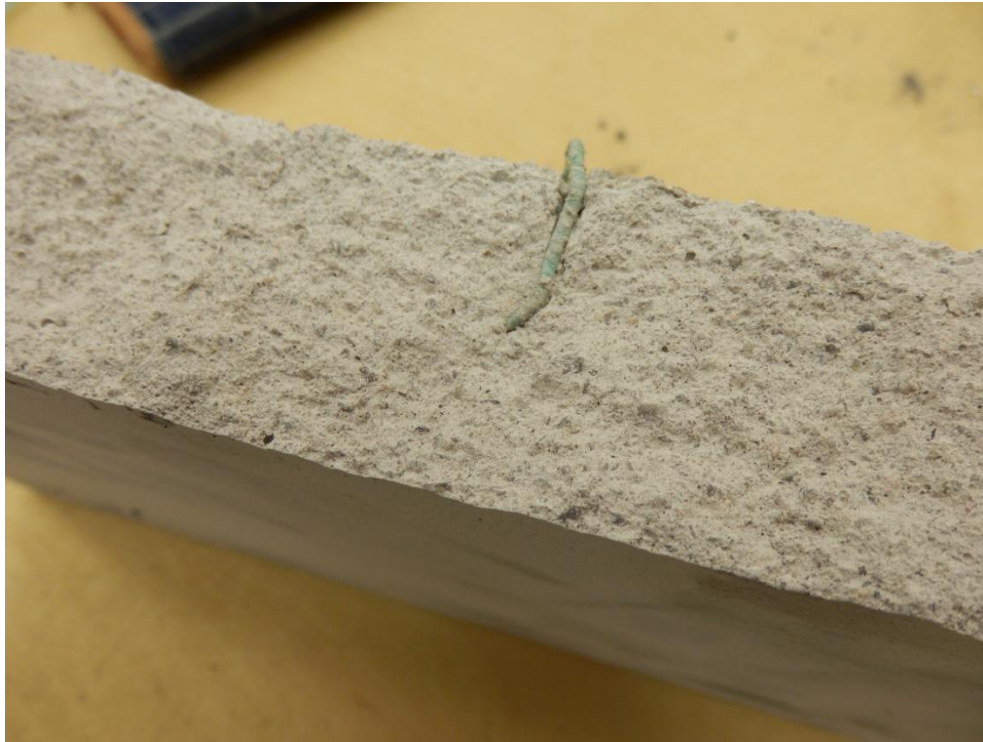
Po dokončení měření byly jednotlivé vzorky s osazenými čidly, které byly použity pro měření v klimakomoře, rozbity na poloviny a zkontrolováno, zda umístění teplotního čidla odpovídá přesně polovině tloušťky jednotlivých vzorků. Na obrázku je možné vidět osazení teplotního čidla v desce z omítkové směsi tl. 4,0 cm.

Po rozbití vzorků, které byly měřeny v klimakomoře, byly použity jednotlivé úlomky k orientačnímu změření vlhkosti vzorků gravimetrickou metodou. Z každého druhu materiálu byly použity 3 odštipnuté kusy, které se položily na Petriho misky a zvažily se na laboratorní váze s přesností 0,01 g. Následně se vzorky vysoušely při teplotě 80 °C po dobu 72 hod. Po dokončení vysoušení se vzorky opět zvažily na laboratorní váze, viz obr. 23.

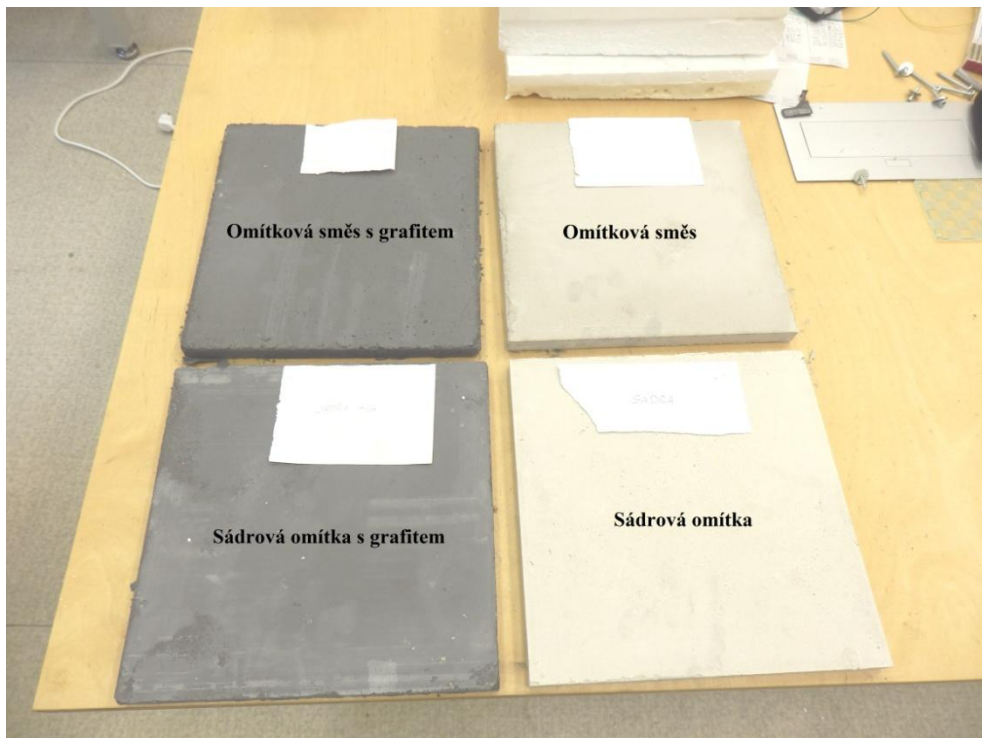


Obr. 20 – Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ pomocí Isometu model 2104

Posledním krokem tohoto měření byl pokus o grafické zachycení rozdílných teplot vzorků vlivem akumulace tepla pomocí termokamery. Jednotlivé vzorky tl. 2,0 cm bez čidel se položily na stůl vedle sebe, viz obr. 22.



Obr. 21 – Znárodnění umístění čidla uprostřed vzorku



Obr. 22 – Vzorky tl. 2,0 cm připravené pro focení termokamerou

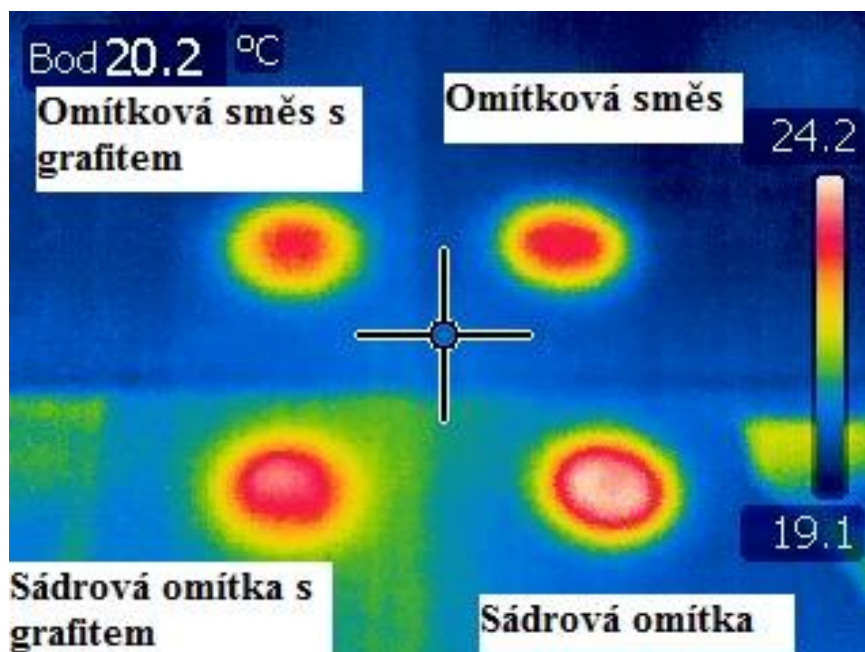


Obr. 23 – Vážení vysušených úlomků vzorků pro stanovení orientační vlhkosti vzorků

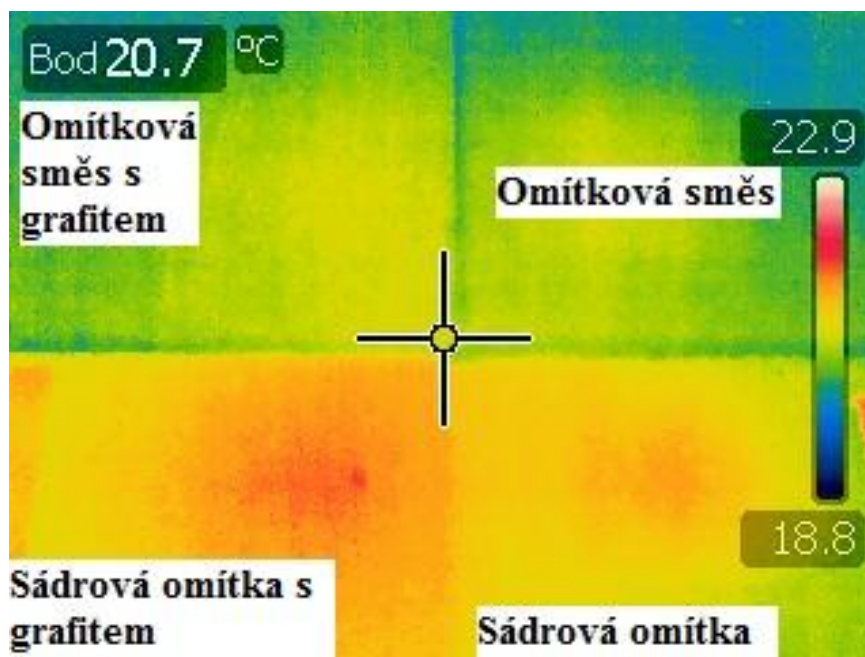
Do sušárny byly umístěny 4 kovové matice, které v tomto případě poslouží jako nositel tepelné energie. Matice byly nahřáty na 50,0 °C. Po nahřátí se matice umístily na jednotlivé vzorky a nechaly se zde položené přibližně 60 s. Po uplynutí této doby se matice sundaly a místa na vzorcích, která byla vystavena působení tepla byla vyfocena termokamerou. Záznam je vidět na obr. 24. Na horní polovině obrázku jsou vzorky zhotovené z omítkové směsi, vzorky na spodní polovině jsou zhotovené ze sádrové omítky. Vzorky s grafity jsou umístěny na levé straně, na pravé straně jsou vzorky bez příměsi. Jak je možné vidět, vzorky bez příměsi grafitu mají na svém povrchu daleko vyšší teplotu, jelikož teplo neodvádí tak rychle jako materiál se zvýšeným součinitelem tepelné vodivosti. Důsledkem toho je na vzorku z omítkové směsi bez grafitu červené kolečko o větším poloměru a na sádrovém vzorku je dokonce nejvyšší teplota znázorněna bílým polem.

Vzorky se poté nechaly přibližně dalších 5 minut chladnout a opět se termokamerou vyfotila exponovaná místa. Snímek je vidět na obrázku 25. Zde je patrná obrácená situace, kdy teplejší jsou vzorky s grafitem. Tomu u vzorku z omítkové směsi naznačuje větší pole o žluto-zelené barvě a u sádrového vzorku větší červené pole. Lze

tak konstatovat, že vzorky s příměsí grafitu odevzdávají přijaté teplo s jistým opožděním a po delší časový úsek, oproti vzorkům bez příměsi grafitu, jelikož je teplo akumulováno ve větší hloubce materiálu. Teplo je na vzorcích s grafitem taktéž díky většímu součiniteli tepelné vodivosti rozvedeno po větší ploše vzorku.



Obr. 24 – Vzorky vyfocené termokamerou po nahřátí kovovými maticemi o teplotě 50 °C po dobu 60 s



Obr. 25 – Vzorky vyfocené termokamerou po chladnutí po dobu 5 minut

5 Použité přístroje, zařízení a pomůcky

5.1 Příprava

Pro přípravu celého měření a výrobu vzorků byly zapotřebí:

5.2 Pomůcky

Metr, pila, lepicí páska, lepidlo na dřevo, kýbl, elektrická vrtačka, nástavec na míchání, zednická lžíce, nerezové hladítko, dřevěné přířezy a latě, kladivo, kombinačky, dláto, odměrky, plastové čtverce, kovové matice, teplotní čidla typu K (NiCr, teplotní rozsah $-40 - 200$ °C, rozlišení dataloggeru $0,1$ °C)

5.3 Přístroje

- elektrická vrtačka
- laboratorní váha RADWAG WLC 12/F1/K s maximálním zatížením 12 kg a citlivostí 0,2 g

5.4 Měření

Pro úspěšné vyhodnocení dat bylo zapotřebí u vzorků stanovit součinitel tepelné vodivosti a chování vzorků v nestacionárním teplotním poli.

Pro měření zkoumání odezvy vzorku na změnu teploty, stanovení součinitele tepelné vodivosti a grafické znázornění akumulace a sálání tepla bylo použito tohoto zařízení:

- klimakomora memmert CTC 256
- čtyřkanálový teploměr Extech SDL200
- termokamera
- Isomet model 2104 se sondou s účinným rozsahem $0,30 - 2,00$ W/(m·K)
- sušárna memmert UN 30

6 Výsledky experimentu a jeho vyhodnocení

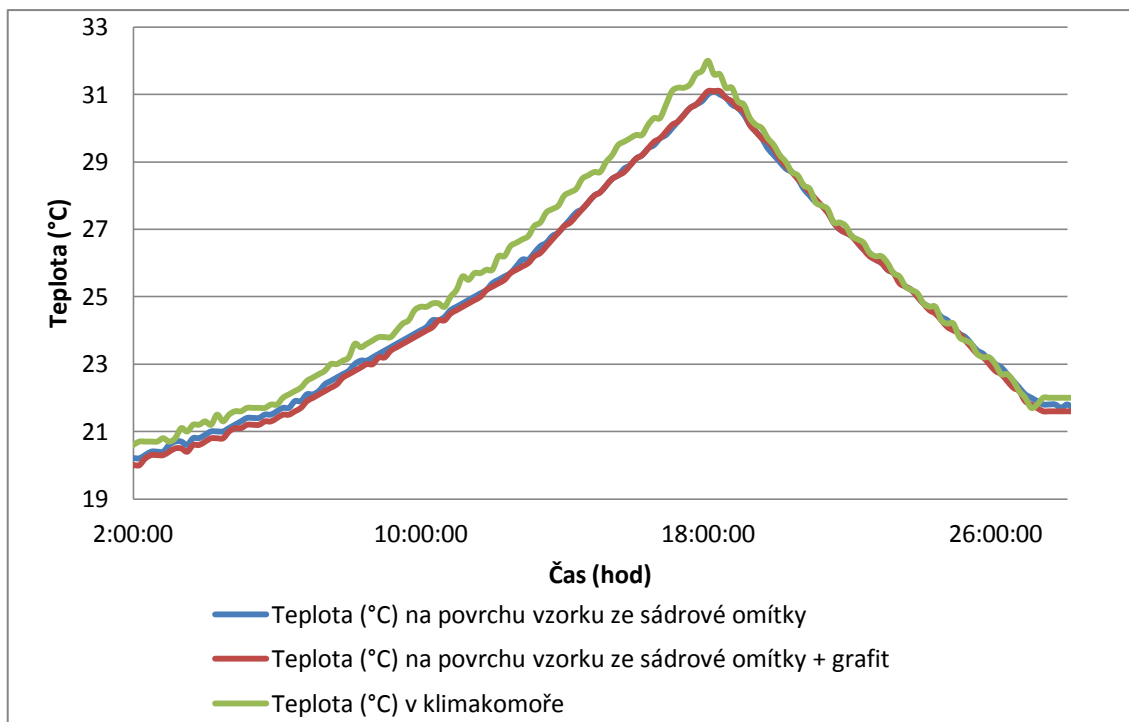
6.1 Měření vzorků namáhaných jednodenním teplotním kmitem

V příložených grafech je znázorněn teplotní kmit měřených vzorků ze sádrové omítky a omítkové směsi tl. 2,0 cm. Grafy 4 a 6 se týkají povrchových teplot $T_{p,x}$ (°C) vzorků s grafitem a bez grafitu v závislosti na teplotě v klimakomoře, grafy 5 a 7 se týkají teplot $T_{u,x}$ (°C) uprostřed vzorků, taktéž s příměsí grafitu a bez grafitu v závislosti na teplotě T_k (°C) v klimakomoře.

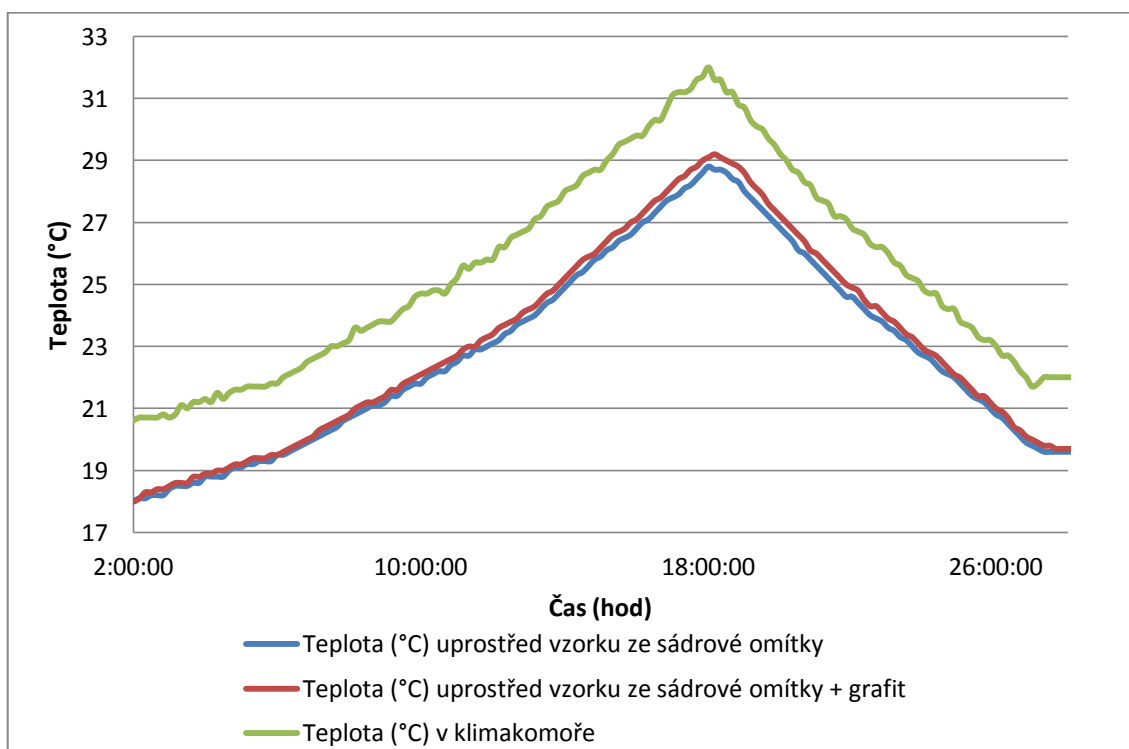
V tabulkách jsou následně uvedeny naměřené hodnoty teplot vzorků v závislosti na teplotě v klimakomoře. Data jsou v tomto případě zaznamenána po 2 hodinách.

Tab. 17 – Teploty na povrchu $T_{p,s}$; $T_{p,sg}$ (°C) a uprostřed $T_{u,s}$; $T_{u,sg}$ (°C) sádrového vzorku tl. 2,0 cm v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C)

Sádrový vzorek tl. 2,0 cm						
Datum provádění zkoušky	Čas (hod)	Teplota na povrchu sádrového vzorku $T_{p,x}$ (°C)		Teplota uprostřed vzorku $T_{u,x}$ (°C)		Teplota v klimakomoře T_k (°C)
		Bez grafitu	S grafitem	Bez grafitu	S grafitem	
18.11.2015	0:00:00	18,9	18,9	17,6	17,7	22,2
18.11.2015	2:00:00	20,2	20,0	18,0	18,0	20,6
18.11.2015	4:00:00	20,9	20,7	18,8	18,9	21,3
18.11.2015	6:00:00	21,6	21,4	19,5	19,5	21,8
18.11.2015	8:00:00	22,8	22,7	20,7	20,8	23,2
18.11.2015	10:00:00	24,0	23,9	21,8	22,1	24,7
18.11.2015	12:00:00	25,4	25,3	23,1	23,4	25,8
18.11.2015	14:00:00	27,1	27,1	24,9	25,2	28,0
19.11.2015	16:00:00	29,1	29,1	26,8	27,1	29,8
19.11.2015	18:00:00	31,0	31,1	28,8	29,1	32,0
19.11.2015	20:00:00	29,0	29,1	26,8	27,2	29,2
19.11.2015	22:00:00	26,8	26,8	24,6	24,9	26,8
19.11.2015	24:00:00	24,8	24,8	22,7	22,9	24,8
19.11.2015	26:00:00	23,0	22,8	20,8	21,0	23,0
19.11.2015	28:00:00	21,8	21,6	19,6	19,7	22,0



Graf 4 – Grafické znázornění změny teploty $T_{p,s}$; $T_{p,sg}$ (°C) v čase na povrchu sádrového vzorku tl. 2,0 cm



Graf 5 – Grafické znázornění změny teploty $T_{u,s}$; $T_{u,sg}$ (°C) v čase uprostřed sádrového vzorku a sádrového vzorku s grafitem tl. 2,0 cm

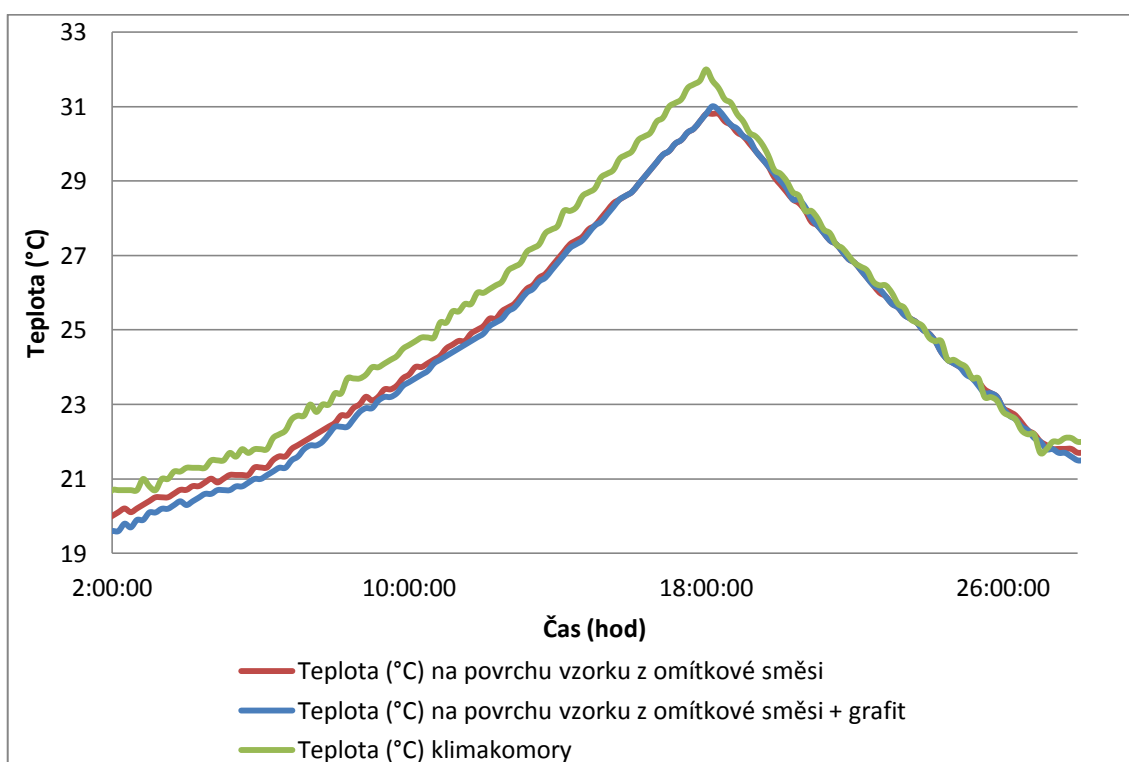
Jak je z tabulky i grafu patrné, povrch vzorku s grafitem je v mnohých případech nižší než teplota $T_{p,x}$ ($^{\circ}\text{C}$) povrchu vzorku bez grafitu. Je to dáno zvýšením součinitele tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ke kterému došlo přidáním grafitu, který vede teplo podstatně lépe než čistá sádrová omítka nebo omítková směs. Teplo se tak z povrchu odvádí do jádra vzorku, čímž je způsoben chladnější povrch tělesa. U čisté sádry a omítkové směsi se teplo akumuluje na povrchu a dovnitř tělesa je odváděno pomaleji. Stejný efekt nastává v praxi tehdy, když položíme ruku na ocel nebo na dřevo. Jelikož má ocel mnohonásobně větší tepelnou vodivost, odvádí teplo dovnitř materiálu a povrch se nám jeví jako studený. Pokud položíme ruku na dřevo, které teplo nevede natolik dobře jako ocel, zdá se nám teplé, jelikož se teplo neodvádí dál a zůstává v materiálu v těsné blízkosti ruky.

Tab. 18 – Teploty na povrchu $T_{p,o}$; $T_{p,og}$ ($^{\circ}\text{C}$) a uprostřed $T_{u,o}$; $T_{u,og}$ ($^{\circ}\text{C}$) vzorku z omítkové směsi a omítkové směsi s příměsí grafitu tl. 2,0 cm v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k ($^{\circ}\text{C}$)

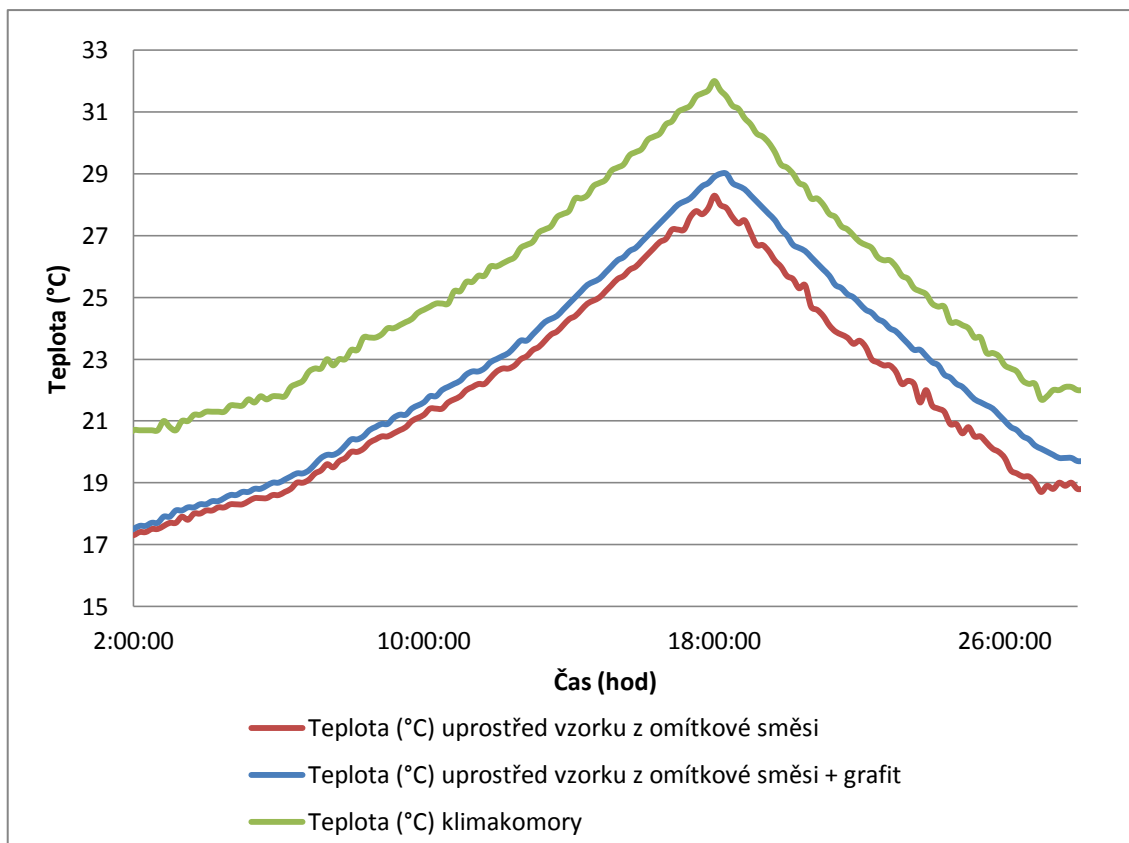
Vzorek z omítkové směsi tl. 2,0 cm						
Datum provádění zkoušky	Čas (hod)	Teplota na povrchu sádrového vzorku $T_{p,x}$ ($^{\circ}\text{C}$)		Teplota uprostřed vzorku $T_{u,x}$ ($^{\circ}\text{C}$)		Teplota v klimakomoře T_k ($^{\circ}\text{C}$)
		Bez grafitu	S grafitem	Bez grafitu	S grafitem	
21.11.2015	0:00:00	21,3	21,7	21,5	22,0	24,5
21.11.2015	2:00:00	19,6	20,0	17,5	17,3	20,7
21.11.2015	4:00:00	20,3	20,7	18,3	18,1	21,3
21.11.2015	6:00:00	21,0	21,3	19,0	18,6	21,8
21.11.2015	8:00:00	22,4	22,5	20,4	20,0	23,3
21.11.2015	10:00:00	23,6	23,8	21,6	21,2	24,6
22.11.2015	12:00:00	24,9	25,1	23,0	22,6	26,0
22.11.2015	14:00:00	26,8	26,9	24,8	24,3	27,8
22.11.2015	16:00:00	28,7	28,7	26,8	26,2	29,8
22.11.2015	18:00:00	30,8	30,8	28,9	28,3	32,0
22.11.2015	20:00:00	29,0	28,9	27,0	25,7	29,2
22.11.2015	22:00:00	26,8	26,8	24,8	23,6	26,8
22.11.2015	24:00:00	24,9	24,9	22,9	21,5	24,8
22.11.2015	26:00:00	22,9	22,9	21,0	19,8	22,8
22.11.2015	28:00:00	21,5	21,7	19,7	18,8	22,0

Po překlenutí teplotní špičky, tedy kolem 18:00 hod. je patrné, že se teploty na povrchu výrazně neliší. Po 26 hodinách, kdy dochází k ustálení teploty v klimakomoře na hodnotě 22 °C, můžeme sledovat, že povrch sádrového vzorku s grafitem je stále chladnější než povrch vzorku bez grafitu a přispívá tak akumulací tepla formou jeho odvodu do mocnosti materiálu k ideální interiérové teplotě.

Na grafu teplot $T_{u,x}$ (°C) uprostřed vzorku je možné vidět, že vzorky s příměsí grafitu jsou uprostřed své mocnosti teplejší než vzorky bez grafitu. Díky zvýšené tepelné vodivosti materiálu se teplo akumuluje do větší hloubky vzorku, tzn., že se podstatně zvýší tepelná kapacita konstrukce. Teplotní spád není u vzorku s grafitem natolik markantní jako u vzorku bez grafitu. Po 26 hodinách po ustálení teplot na 22 °C je teplota uprostřed mocnosti vzorku s grafitem větší přibližně o 0,2 °C. To nasvědčuje faktu, že se vzorek s grafitem dokáže v libovolné úrovni prohřát o více °C.



Graf 6 – Grafické znázornění změny teploty $T_{p,o}$ (°C) v čase na povrchu vzorku z omítkové směsi tl. 2,0 cm



Graf 7 – Grafické znázornění změny teploty $T_{u,o}$ (°C) v čase uprostřed vzorku z omítkové směsi tl. 2,0 cm

6.2 Měření vzorků izolovaných – simulace obvodové stěny – třídenní kmit

Pro zatížení třídenním kmitem byly vybrány vzorky ze sádrové omítky o tl. 2,0 cm. Vzorky byly zaizolovány polystyrenem a byly zatíženy teplotním kmitem, který je znázorněn v tabulce 16 výše.

V tabulkách 19 a 21 jsou následně uvedeny naměřené hodnoty teplot vzorků na povrchu a uprostřed vzorku a na styku vzorku s tepelným izolantem v závislosti na teplotě v klimakomoře. Data jsou v tomto případě zaznamenána po 2 hodinách.

Jak je možné v tabulkách 19 a 21 vidět, teplota na povrchu a uprostřed vzorku se výrazně neliší. Teplota měřená na povrchu a uprostřed vzorku s grafitem je v průměru o 0,08 – 0,1 °C vyšší jak teplota na vzorku bez příměsi grafitu. V místě styku vzorku s tepelným izolantem je však rozdíl teplot výrazněji odlišný, a to v průměru o 0,38 °C při rozdílu teploty v klimakomoře o 0,01 °C. Průměrná teplota na sádrovém vzorku s grafitem je v průměru o 0,29 °C vyšší. Každý kilogram vápenocementové omítky

s příměsí grafitu tak s měrnou tepelnou kapacitou $c = 840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ dokáže pojmout o 244 J energie více než omítka bez příměsí grafitu.

Tab. 19 – Teploty na povrchu $T_{p,s,i}$ ($^{\circ}\text{C}$), uprostřed vzorku $T_{u,s,i}$ ($^{\circ}\text{C}$) a na styku vzorku s tepelnou izolací $T_{ti,s,i}$ ($^{\circ}\text{C}$), v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k ($^{\circ}\text{C}$), vzorek z omítkové směsi tl. 2,0 cm

Sádrový vzorek tl. 2,0 cm					
Datum provádění zkoušky	Čas (hod)	Teplota na povrchu vzorku $T_{p,s,i}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota uprostřed vzorku $T_{u,s,i}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota na styku s TI $T_{ti,s,i}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota v klimakomoře T_k ($^{\circ}\text{C}$)
1.12.2015	12:00:00	23,1	22,9	22,7	24,8
1.12.2015	14:00:00	24,6	24,5	24,3	26,5
2.12.2015	16:00:00	26,1	26,1	25,9	28,0
2.12.2015	18:00:00	26,4	26,5	26,4	27,7
2.12.2015	20:00:00	25,6	25,7	25,5	26,8
2.12.2015	22:00:00	24,8	24,8	24,8	26,1
2.12.2015	24:00:00	23,9	24,0	23,9	25,2
2.12.2015	26:00:00	23,4	23,4	23,3	24,6
2.12.2015	28:00:00	22,7	22,7	22,6	24,1
2.12.2015	30:00:00	22,5	22,4	22,4	23,7
2.12.2015	32:00:00	22,3	22,3	22,3	23,7
2.12.2015	34:00:00	22,1	22,1	22,0	23,3
2.12.2015	36:00:00	23,3	23,2	23,1	24,8

Tab. 20 – Průměrné teploty T_p ($^{\circ}\text{C}$), nejnižší teploty T_l ($^{\circ}\text{C}$) a nejvyšší teploty T_h ($^{\circ}\text{C}$) na povrchu, uprostřed vzorku a na styku vzorku s tepelnou izolací v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k ($^{\circ}\text{C}$) – sádrový vzorek tl. 2,0 cm

Průměrné, nejnižší a nejvyšší teploty na sádrovém vzorku tl. 2,0 cm				
	Teplota na povrchu vzorku ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota uprostřed vzorku ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota na styku s TI ($^{\circ}\text{C}$)	Teplota v klimakomoře ($^{\circ}\text{C}$)
Průměrné teploty T_p ($^{\circ}\text{C}$)	23,65	23,60	23,50	25,13
Nejnižší teplota T_l ($^{\circ}\text{C}$)	18,40	18,40	18,30	20,00
Nejvyšší teplota T_h ($^{\circ}\text{C}$)	26,60	26,60	26,40	28,20
Průměrná teplota na desce T_p ($^{\circ}\text{C}$)	23,58			

Tab. 21 – Teploty na povrchu $T_{p,sg,i}$ (°C), uprostřed vzorku $T_{u,sg,i}$ (°C), a na styku vzorku s tepelnou izolací $T_{ti,sg,i}$ (°C) v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C), vzorek z omítkové směsi s grafitem tl. 2,0 cm

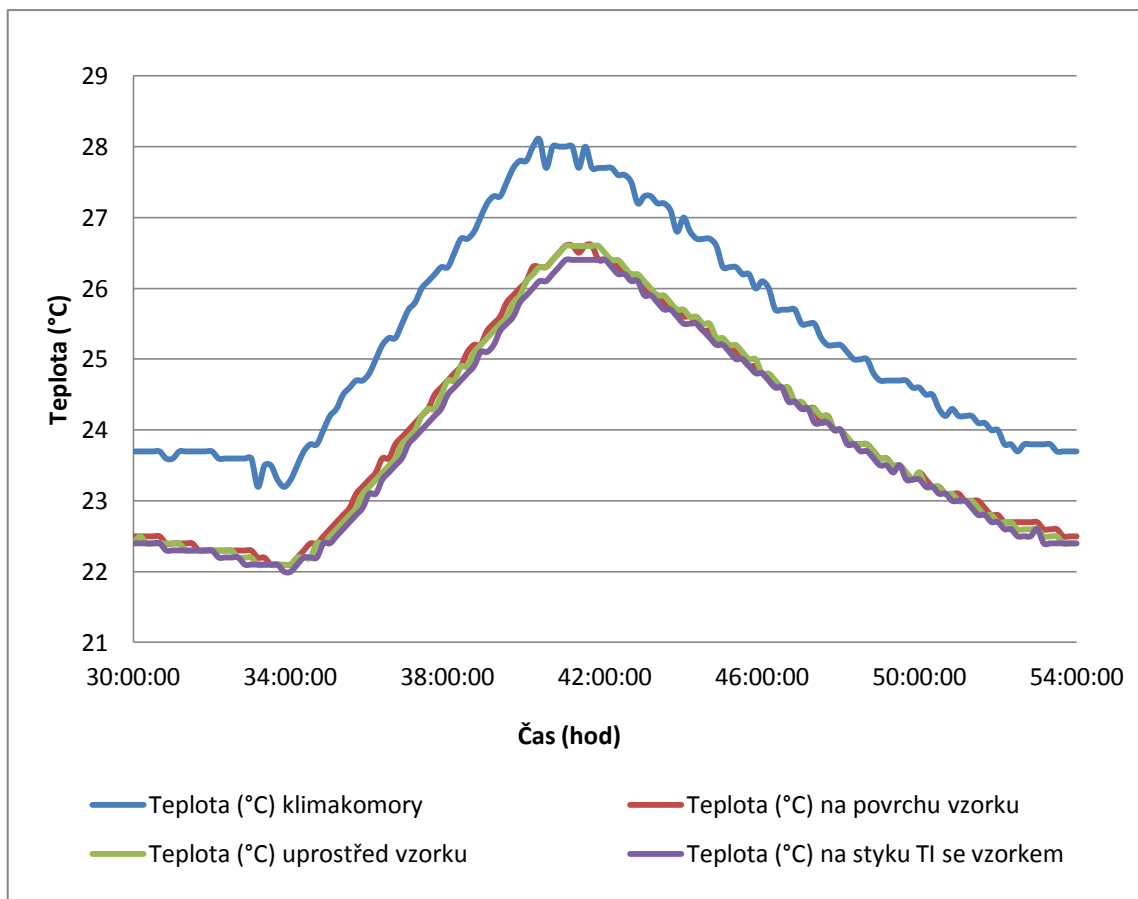
Sádrový vzorek s grafitem tl. 2,0 cm					
Datum provádění zkoušky	Čas (hod)	Teplota na povrchu vzorku $T_{p,sg,i}$ (°C)	Teplota uprostřed vzorku $T_{u,sg,i}$ (°C)	Teplota na styku s TI $T_{ti,sg,i}$ (°C)	Teplota v klimakomoře T_k (°C)
5.12.2015	12:00:00	23,3	23,1	23,3	25,0
5.12.2015	14:00:00	24,8	24,6	24,8	26,6
5.12.2015	16:00:00	26,3	26,2	26,3	28,1
5.12.2015	18:00:00	26,4	26,4	26,6	27,6
5.12.2015	20:00:00	25,6	25,7	25,9	26,8
5.12.2015	22:00:00	24,3	24,6	24,9	26,2
5.12.2015	24:00:00	23,7	23,5	23,7	25,8
5.12.2015	26:00:00	23,1	23,1	23,4	24,5
5.12.2015	28:00:00	22,6	22,6	22,9	23,8
5.12.2015	30:00:00	22,5	22,4	22,6	24,0
6.12.2015	32:00:00	22,3	22,3	22,5	23,7
6.12.2015	34:00:00	22,2	22,1	22,3	23,3
6.12.2015	36:00:00	23,4	23,2	23,4	25,0

Tab. 22 – Průměrné teploty T_p (°C), nejnižší teploty T_l (°C) a nejvyšší teploty T_h (°C) na povrchu, uprostřed desky a na styku vzorku s tepelnou izolací v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – sádrový vzorek s příměsí grafitu tl. 2,0 cm

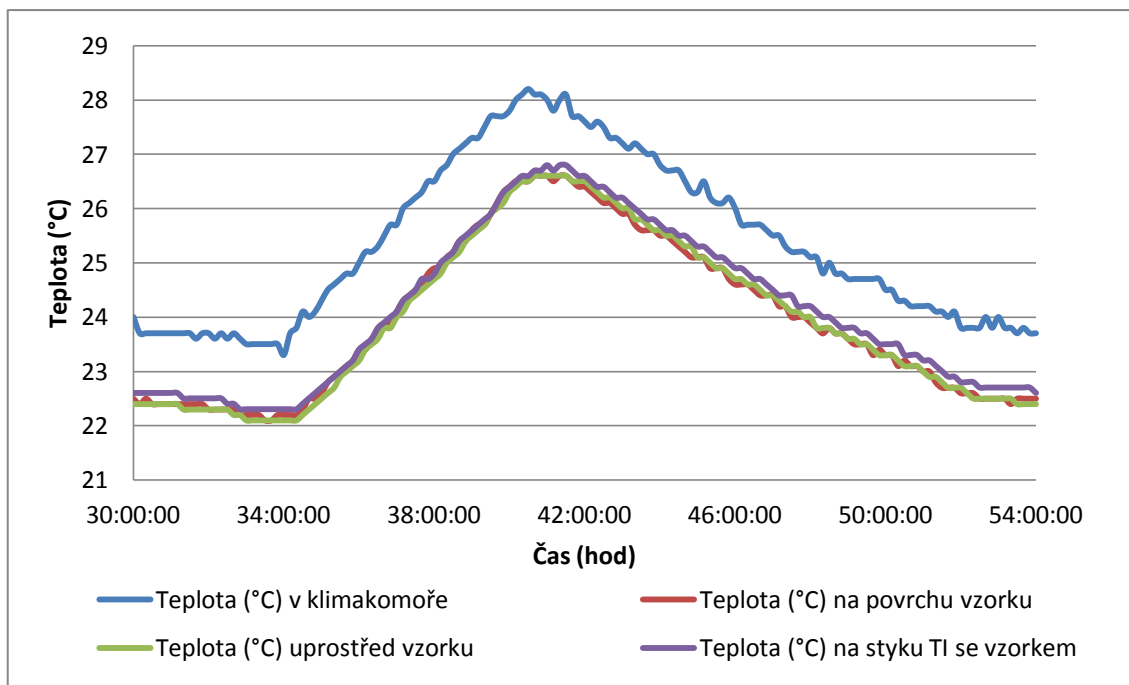
Průměrné, nejnižší a nejvyšší teploty na sádrovém vzorku s příměsí grafitu tl. 2,0 cm				
	Teplota na povrchu vzorku (°C)	Teplota uprostřed vzorku (°C)	Teplota na styku s TI (°C)	Teplota v klimakomoře (°C)
Průměrné teploty T_p (°C)	23,74	23,70	23,88	25,14
Minimální teplota T_l (°C)	19,60	19,40	19,70	20,10
Maximální teplota T_h (°C)	26,70	26,70	26,80	28,20
Průměrná teplota na desce T_p (°C)	23,77			

Na grafech 8 a 9 je vidět, že teploty jsou téměř po celou dobu nárůstu teploty uspořádány v určitém pořadí, kdy nejteplejší je povrch vzorku, následně jádro vzorku a v poslední řadě styk vzorku s tepelným izolantem. Při poklesu teploty je již nejteplejší prostředek vzorku, nejchladnější je styk s tepelnou izolací a mezi těmito křivkami je nachází teplota povrchu.

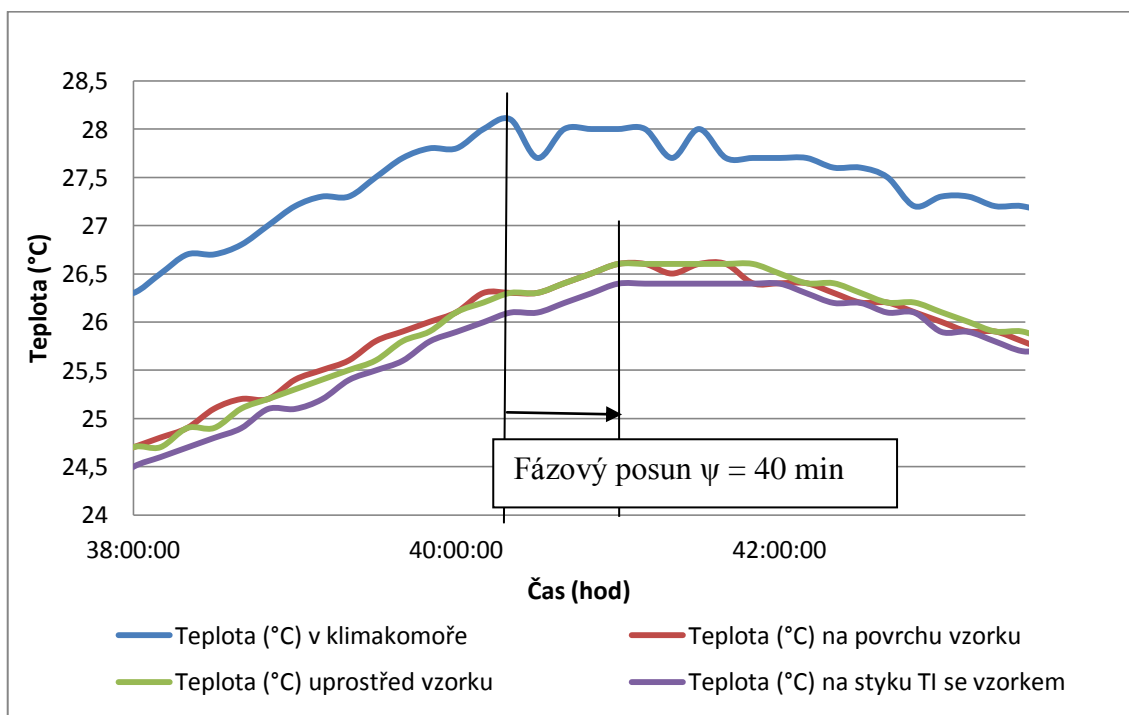
Opačná situace nastává u vzorku s grafitem, kde teplota na styku s tepelným izolantem je téměř po celou dobu teplotního kmitu nejvyšší. Při růstu teploty je teplota povrchu takřka obdobná jako u styku s tepelnou izolací a jádro vzorku je nejchladnější. Při poklesu teploty je teplota na povrchu nejnižší a teplota uprostřed vzorku se pohybuje mezi teplotou povrchu a styku s tepelnou izolací.



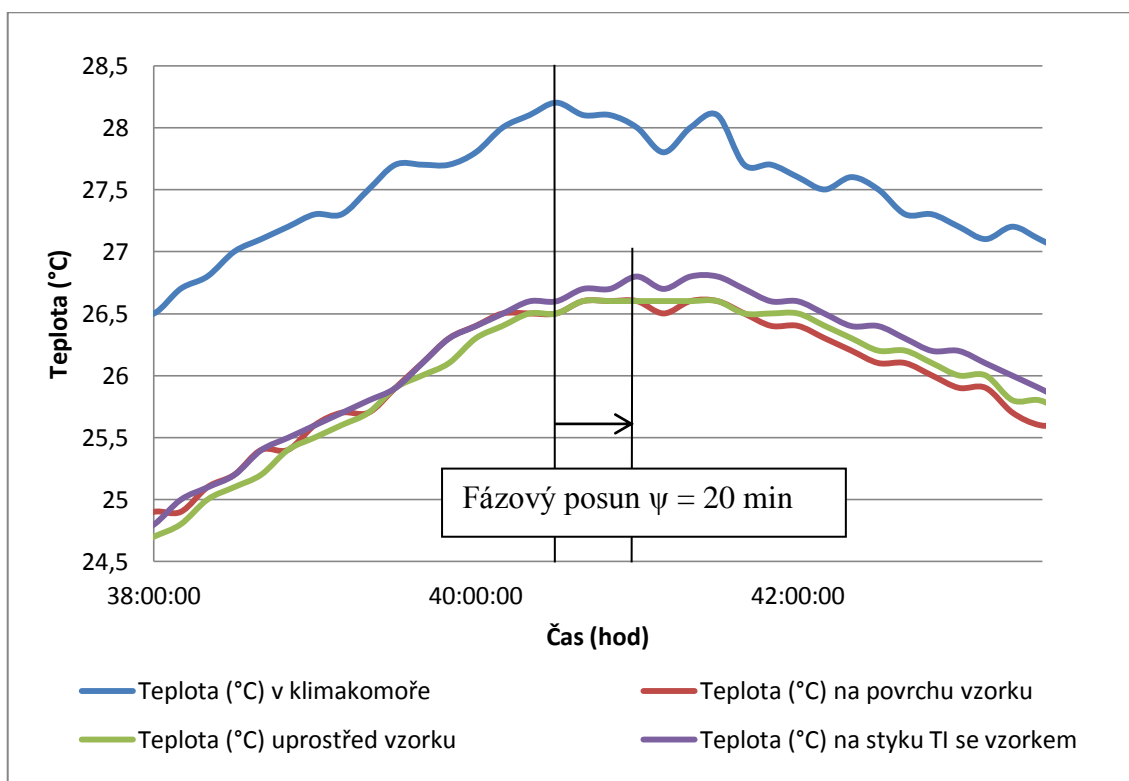
Graf 8 – Grafické znázornění změny teploty v čase na povrchu vzorku $T_{p,s,i}$ (°C), uprostřed vzorku $T_{u,s,i}$ (°C), a na styku vzorku s tepelnou izolací $T_{i,s,i}$ (°C) v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – sádra tl. 2,0 cm – výsek z vícedenního kmitu



Graf 9 – Znázornění změny teploty v čase na povrchu vzorku $T_{p,sg,i}$ (°C), uprostřed vzorku $T_{u,sg,i}$ (°C) a na styku vzorku s tepelnou izolací $T_{ti,sg,i}$ (°C) v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – sádra s grafitem tl. 2,0 cm – výsek z vícedenního kmitu



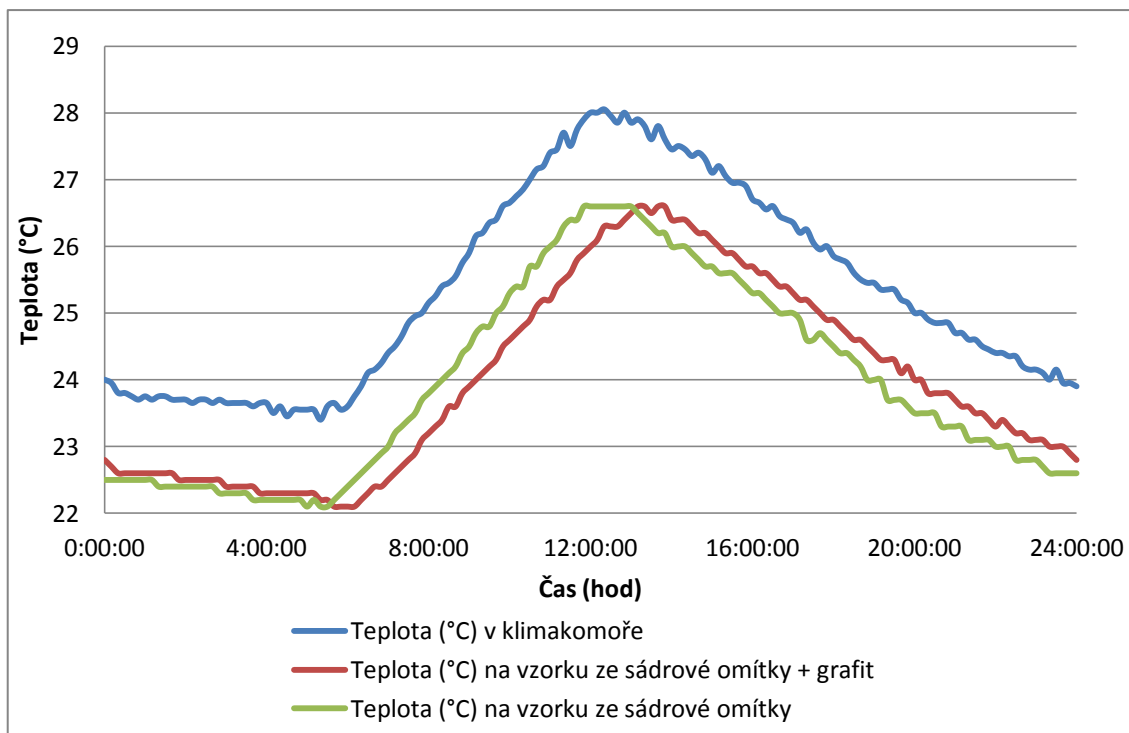
Graf 10 – Průběh teplot T_x (°C) na vzorku tl. 2,0 cm ze sádrové omítky v teplotní špičce v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – výsek z vícedenního kmitu



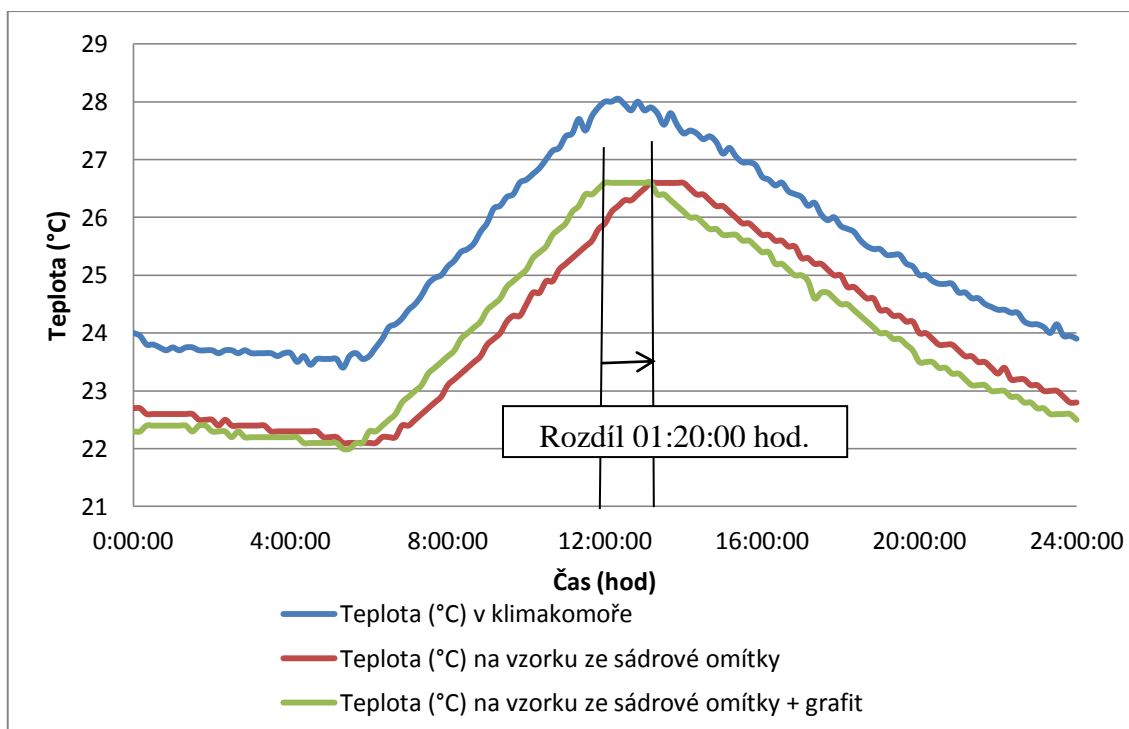
Graf 11 – Průběh teplot T_x (°C) na vzorku tl. 2,0 cm ze sádrové omítky s příměsí grafitu v teplotní špičce v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – výsek z vícedenního kmitu

Na grafu 12 je znázorněn průběh teplot na povrchu vzorku. Je zřejmé, že povrch vzorku s příměsí grafitu se ohřívá pomaleji než vzorek bez grafitu, jelikož je teplo odváděno rychleji do mocnosti materiálu. Při chladnutí je povrch vzorku s grafitem teplejší. Na grafu 13 je zobrazen průběh teplot uprostřed vzorků. Zde nastává změna, kdy je teplota uprostřed vzorku s grafitem větší než na vzorku bez grafitu. Teplo je sem dováděno rychleji. Obdobný případ je i na styku vzorku s tepelnou izolací, kde teplota vzorku s grafitem roste rychlejším tempem, ale při chladnutí má již téměř totožnou teplotu jako vzorek bez příměsi, viz graf 14.

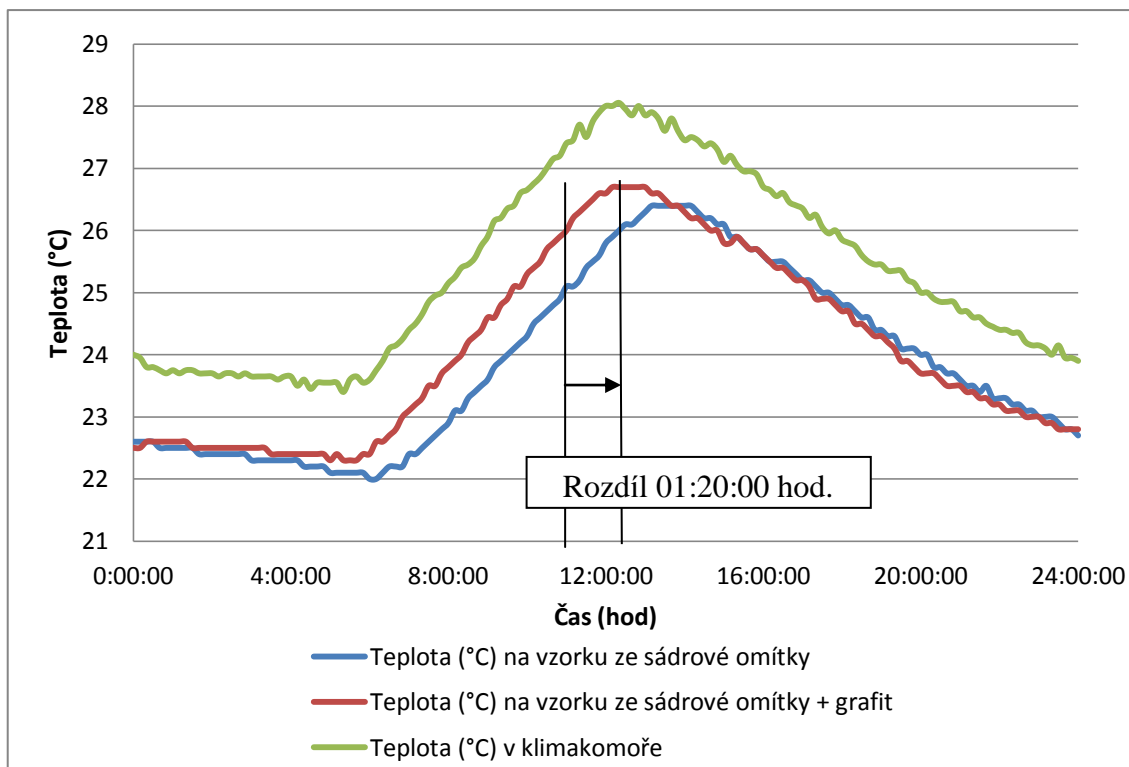
Fázový posun na vzorku s příměsí grafitu je poloviční oproti vzorku bez grafitu, viz graf 10 a 11. Na grafech 13 a 14 je taktéž znázorněn časový rozdíl při prohřívání jádra vzorku a styku vzorku s TI. Stejné teploty v jakékoli úrovni je u vzorku bez příměsi grafitu dosaženo o 80 minut později než u vzorku s grafitem.



Graf 12 – Grafické znázornění rozdílných teplot $T_{p,s,i}$ (°C) a $T_{p,sg,i}$ (°C) na povrchu vzorku, tl. 2,0 cm ze sádry a sádry s grafitem v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – výsek z vícedenního kmitu



Graf 13 – Grafické znázornění rozdílných teplot $T_{u,s,i}$ (°C) a $T_{u,sg,i}$ (°C) uprostřed vzorku tl. 2,0 cm ze sádry a sádry s grafitem v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – výsek z vícedenního kmitu



Graf 14 – Grafické znázornění rozdílných teplot $T_{ii,s,i}$ (°C) a $T_{ii,sg,i}$ (°C) uprostřed vzorku tl. 2,0 cm ze sádry a sádry s grafitem v závislosti na teplotě v klimakomoře T_k (°C) – výsek z vícedenního kmitu

6.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity

Jednolivé vzorky, které byly použity pro měření v klimakomoře a byly umístěny ve stejné místnosti o stejné vlhkosti, byly změřeny pomocí měřicího přístroje Isometu a jednotlivé naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity jsou zaneseny do tabulky 23 a 24.

Na vzorcích o tl. 2,0 cm bylo provedeno měření na 4 místech vzorku a na vzorcích o tl. 4,0 cm bylo provedeno jedno kontrolní měření, zda se hodnoty nebudou výrazně vychylovat. Zjištěná průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti je u omítkové směsi s grafitem v průměru o 15 % vyšší než u omítkové směsi bez grafitu. U sádrové omítky s grafitem je nárůst součinitele tepelné vodivosti oproti sádrové omítce bez grafitu 40%.

Tyto hodnoty naznačují tomu, že nebylo dosaženo dokonalé homogenizace směsi, jelikož dle přibližného výpočtu měl součinitel tepelné vodivosti vzrůst 10-12x.

V tomto případě však hodnoty součinitele tepelné vodivosti dosahují u omítkové směsi přibližně stejných hodnot jako keramické výrobky.

Tab. 23 – Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Materiál	Tloušťka desky 2,0 cm				Tloušťka desky 4,0 cm	Průměrná hodnota
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Měření č. 4	Měření č. 5	
	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)					
Omítková směs	0,835	0,836	0,857	0,817	0,842	0,840
Omítková směs s grafitem	1,020	0,971	0,909	1,000	0,944	0,970
Sádrová omítka	0,368	0,353	0,351	0,361	0,342	0,360
Sádrová omítka s grafitem	0,463	0,509	0,519	0,522	0,509	0,500

Tab. 24 – Naměřené hodnoty měrné tepelné kapacity c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

Materiál	Tloušťka desky 2,0 cm				Tloušťka desky 4,0 cm	Průměrná hodnota
	Měření č. 1	Měření č. 2	Měření č. 3	Měření č. 4	Měření č. 5	
	c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)					
Omítková směs	1620	1670	1700	1690	1510	1638
Omítková směs s grafitem	1700	1690	1680	1720	1570	1672
Sádrová omítka	1530	1520	1510	1530	1430	1504
Sádrová omítka s grafitem	1360	1560	1540	1530	1500	1498

Jak bylo měřením zjištěno, příměs grafitu má nepatrný vliv na měrnou tepelnou kapacitu c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$). Čistý grafit má totiž hodnotu měrné tepelné kapacity přibližně poloviční oproti zkoušeným materiálům. Odchyly v naměřených hodnotách tak mohou být způsobeny nepřesností měření.

6.4 Aplikování rozdílných hodnot do programu Stabilita a Simulace

Pro aplikování různých naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti materiálů a zjištění vlivu na tepelnou stabilitu obytné místnosti rodinného domu byl zvolen dřevěný konstrukční systém z masivního dřeva tl. 124 mm, který je zateplený minerální izolací tl. 180 mm.

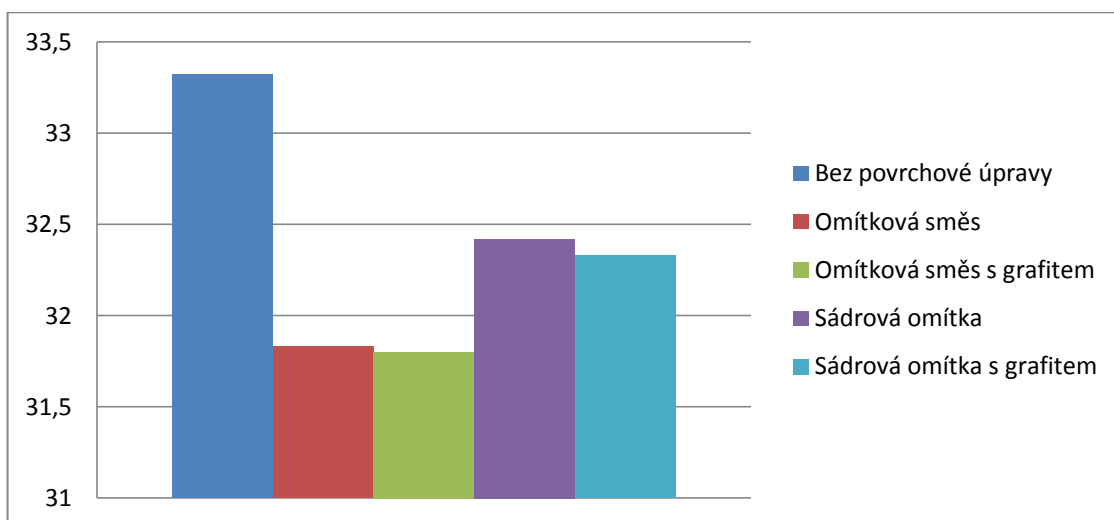
6.4.1 Simulace – léto

Záměrem tohoto posouzení je zjištění, do jaké míry má přidání grafitu do vnitřní omítky vliv na tepelnou stabilitu místnosti a do jaké míry dokáže eliminovat přehřívání v interiéru během slunečného dne. Dle ČSN 73 0540 nesmí teplota v místnosti vystoupit nad hranici $T_{ai,max,N} = 27,0^{\circ}\text{C}$. Pro posouzení byla zvolena místnost orientovaná na jihozápad v 2.NP rodinného domu v podkroví. V programu bylo testováno, jak se chová místnost, která má stěny z pohledového dřeva bez povrchové úpravy, dále jak se chová s omítkami tl. 2,0 cm a s omítkami s příměsí grafitu tl. 2,0 cm. Návrhové teploty a intenzita slunečního záření byly uvažovány pro 21. srpen. Na oknech se neuvažovalo s žádným stínícím prvkem, který by omezoval šíření tepla radiací a kondukcí.

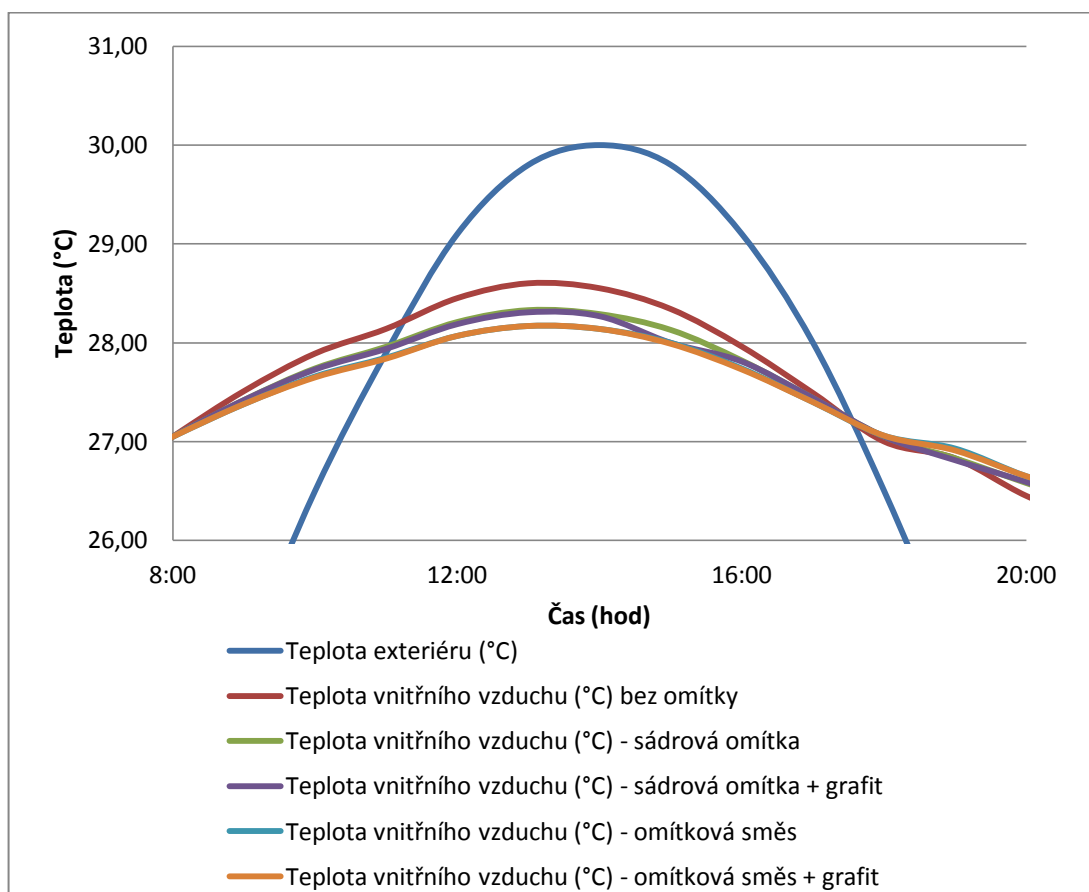
Výsledné minimální, maximální a průměrné teploty vnitřního vzduchu jsou zaneseny do tabulky 25. Je zřejmé, že povrchová úprava u dřevostaveb má jistý význam, jelikož je vnitřní teplota vzduchu v místnosti za stejných návrhových podmínek nižší přibližně o $1,5^{\circ}\text{C}$. Avšak přidání grafitu do omítkové směsi již takový efekt na tepelnou stabilitu místnosti v letních měsících nemá, jelikož maximální teplota je snížena pouze o $0,03^{\circ}\text{C}$, u sádrové omítky tato hodnota činí $0,09^{\circ}\text{C}$.

Tab. 25 – Výsledné minimální $T_l (^{\circ}\text{C})$, maximální $T_h (^{\circ}\text{C})$ a průměrné teploty $T_a (^{\circ}\text{C})$ v interiéru v závislosti na povrchové úpravě stěn

Materiál	Minimální teplota $T_l (^{\circ}\text{C})$	Maximální teplota $T_h (^{\circ}\text{C})$	Průměrná teplota $T_a (^{\circ}\text{C})$
Bez omítek	25,37	33,32	27,12
Omítková směs	25,84	31,83	27,12
Omítková směs s grafitem	25,85	31,80	27,12
Sádrová omítka	25,66	32,42	27,13
Sádrová omítka s grafitem	25,69	32,33	27,12



Graf 15 – Grafické znázornění maximálních teplot T_i (°C) vzduchu v interiéru v závislosti na povrchové úpravě stěny



Graf 16 – Závislost teploty vnitřního vzduchu T_i (°C) na exteriérové teplotě T_e (°C) a úpravě povrchu stěn

6.4.2 Stabilita – zima

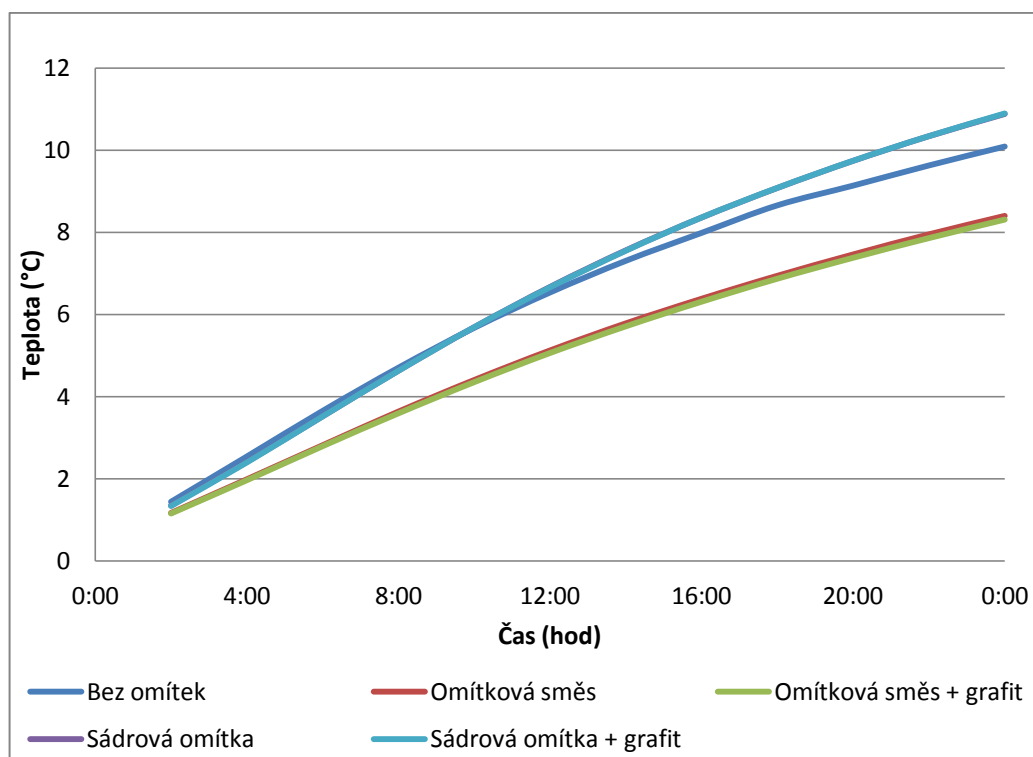
Záměrem tohoto posouzení je zjištění, do jaké míry má přidání grafitu do vnitřní omítky vliv na tepelnou stabilitu místnosti v zimním období. Dle ČSN 730540 nesmí teplota v interiéru při otopné přestávce (uvažujeme 6 hodin) klesnout o $\Delta T_{r,N} = 4,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro posouzení bylo uvažováno s obytnou místností v 2.NP rodinného domu v podkrovní s orientací na severo-východ s oknem na východ. Návrhové teploty v exteriéru jsou $T_e = -17 \text{ }^\circ\text{C}$, v interiéru $T_i = 21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tab. 26 – Pokles teploty T_i ($^\circ\text{C}$) vzduchu v interiéru v závislosti na délce otopné přestávky (hod.) a povrchové úpravě stěny

Délka otopné přestávky (hod)	$\Delta T_{r(x:xx)}$ ($^\circ\text{C}$)				
	Bez omítek	Omítková směs	Omítková směs + grafit	Sádrová omítka	Sádrová omítka + grafit
2:00	1,44	1,16	1,15	1,35	1,34
4:00	2,54	1,98	1,96	2,41	2,40
6:00	3,65	2,81	2,79	3,52	3,52
8:00	4,70	3,63	3,59	4,63	4,63
10:00	5,67	4,40	4,35	5,69	5,69
12:00	6,53	5,12	5,06	6,67	6,66
14:00	7,30	5,78	5,71	7,56	7,55
16:00	7,98	6,38	6,31	8,36	8,36
18:00	8,85	6,94	6,87	9,08	9,08
20:00	9,13	7,46	7,38	9,74	9,74
22:00	9,62	7,95	7,86	10,34	10,34
24:00	10,08	8,40	8,31	10,88	10,89

Druhý sloupec tabulky 26 znázorňuje, o kolik stupňů klesne vnitřní teplota za určitou dobu od přerušení dodávky tepla. Pokud tedy bude stěna ponechána bez povrchové úpravy, teplota by měla klesat v závislosti na čase tímto tempem. Pokud bude stěna opatřena univerzální omítkou tl. 2,0 cm, teplota klesá v závislosti na čase výrazně pomaleji. Po celém dni otopné přestávky teplota klesne o 1,6 $^\circ\text{C}$ méně. Pokud se do této

omítky přidá 5 hm. % grafitu, situace se zlepší, avšak nijak výrazněji. Teplota se zde oproti omítce bez příměsi grafitu liší pouze o 0,01-0,09 °C. U sádrové omítky nastává zcela odlišný případ, kdy pro prvních 8 hodin otopné přestávky je pokles teploty nižší, následně ale teplota začne klesat mnohem rychleji a po jednom dni otopné přestávky je teplota v místnosti o 0,8 °C nižší než teplota v místnosti bez sádrové omítky. Přidáním grafitu do sádrové omítky nevzniká prakticky žádná změna, teploty jsou v mnoha případech shodné nebo se liší maximálně o 0,01 °C. Hodnoty jsou graficky znázorněny na grafu 17.



Graf 17 – Pokles teploty T_i (°C) vzduchu v interiéru v závislosti na délce otopné přestávky (hod.) a povrchové úpravě stěny

6.5 Vliv příměsi grafitu na teplotní útlum a fázový posun teplotních kmitů konstrukce v letním období

Záměrem této kapitoly je zjistit, jak velký vliv má příměs grafitu v omítce na teplotní útlum konstrukce v letním období a fázový posun teplotních kmitů konstrukce v letním období. Jelikož teplotní útlum společně s fázovým posunem teplotních kmitů má podstatný vliv na přehřívání interiéru v letním období, je záměrem tyto hodnoty navrhnout na optimální úrovni.

Pro přibližný výpočet teplotního útlumu v (-) konstrukce v letním období byl použit vztah 11.

$$v = 0,7 \cdot \exp\left(\frac{D}{\sqrt{2}}\right) \cdot \frac{s_1+u_0}{s_1+u_1} \cdot \frac{s_2+u_1}{s_2+u_2} \cdot \dots \cdot \frac{s_n+u_{n-1}}{s_n+u_n} \cdot \frac{1/R_{se} + u_n}{1/R_{se}} \quad (11)$$

kde

$$D = \sum(R_j \cdot s_j) \quad (12)$$

$$u_0 = \frac{1}{R_{si}} \quad (13)$$

$$s_j = 0,008525 \cdot \sqrt{(\lambda_j \cdot c_j \cdot \rho_j)} \quad (14)$$

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (15)$$

$$u_j = \frac{R_j \cdot s_j^2 + u_{j-1}}{1 + R_j \cdot u_{j-1}} \quad (16)$$

kde v je teplotní útlum konstrukce (-)
 R_j tepelný odpor ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
 u_j tepelná pohltivost vnějšího povrchu konstrukce j -té vrstvy konstrukce
 R_{se} odpor při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce v letním období ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
 R_{si} odpor při přestupu tepla na vnitřním povrchu konstrukce ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
 λ součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 ρ objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 d tloušťka vrstvy (m)

Pro přibližný výpočet fázového posunutí teplotních kmitů ψ (hod.) v letním období byl použit vztah 17.

$$\psi = 2,7 \cdot D \quad (17)$$

kde

$$D = \sum(R_j \cdot s_j) \quad (18)$$

kde R_j je dle vztahu 15
 s_j dle vztahu 14
 ψ fázový posun teplotních kmitů (hod.)

Ve výpočtu bylo uvažováno s parametry konstrukce uvedenými v tabulkách 27, 29 a 31 a následně byl proveden výpočet jednotlivých veličin, které jsou uvedeny v tabulkách 28, 30 a 32.

Konstrukce 1 - dřevěná konstrukce bez omítek

Tab. 27 – Fyzikální vlastnosti materiálu ve skladbě obvodové stěny bez omítky na vnitřní straně stěny

	λ_j ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	c_j ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ρ_j ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Dřevěný masivní panel	0,180	2510,00	400,00
Tepelná izolace – MW	0,041	800,00	160,00

Tab. 28 – Fyzikální veličiny pro výpočet fázového posunu ψ (hod.) skladby bez povrchové vnitřní úpravy

	s_j	d_j (m)	R_j ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)	$R_j \cdot s_j$	u_j
Dřevěný masivní panel	3,625	0,124	0,689	2,497	3,625
Tepelná izolace – MW	0,618	0,180	4,390	2,712	0,313

Konstrukce 2 – dřevěná konstrukce s omítkou sádrovou

Tab. 29 – Fyzikální vlastnosti materiálu ve skladbě obvodové stěny s omítkou na vnitřní straně stěny

	λ_j ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	c_j ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	ρ_j ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Omítka tl. 2,0 cm	0,360	1498,00	1300,00
Dřevěný masivní panel	0,180	2510,00	400,00
Tepelná izolace – MW	0,041	800,00	160,00

Tab. 30 – Fyzikální veličiny pro výpočet fázového posunu ψ (hod.) skladby s vnitřní povrchovou úpravou

	s_j	d_j (m)	R_j ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_j \cdot s_j$	u_j
Omítka tl. 2,0 cm	7,140	0,020	0,056	0,397	7,140
Dřevěný masivní panel	3,625	0,124	0,689	2,497	3,625
Tepelná izolace – MW	0,618	0,180	4,390	2,712	0,313

Konstrukce 3 – dřevěná konstrukce s omítkou sádrovou s příměsí grafitu

Tab. 31 – Fyzikální vlastnosti materiálu ve skladbě obvodové stěny s omítkou na vnitřní straně stěny s příměsí grafitu

	λ_j ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	c_j ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	ρ_j ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Omítka tl. 2,0 cm	0,500	1504,00	1300,00
Dřevěný masivní panel	0,180	2510,00	400,00
Tepelná izolace – MW	0,041	800,00	160,00

Tab. 32 – Fyzikální veličiny pro výpočet fázového posunu ψ (hod.) s vnitřní povrchovou úpravou s příměsí grafitu

	s_j	d_j (m)	R_j ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)	$R_j \cdot s_j$	u_j
Omítka tl. 2,0 cm	8,432	0,020	0,040	0,337	8,432
Dřevěný masivní panel	3,625	0,124	0,689	2,497	3,625
Tepelná izolace – MW	0,618	0,180	4,390	2,712	0,313

Po dosažení jednotlivých veličin do vzorců byly vypočítány přibližné hodnoty teplotního útlumu a fázového posunutí teplotního kmitu v letním období dřevěné lehké konstrukce. Výsledky jsou zaznačeny v tabulce 33.

Tab. 33 – Výsledné hodnoty fázového posunu (hod.) a teplotního útlumu (-) dřevěné konstrukce se sádrovou omítkou

Konstrukce	v (-)	Ψ (hod)
K1 – bez omítek	254,08	14,07
K2 – sádrová omítka	336,35	15,14
K3 – sádrová omítka + grafit	322,51	14,98

Na zvolené konstrukci se hodnoty fázového posunu Ψ (hod) a teplotního útlumu konstrukce v (-) změnil výrazně přidáním omítek na svislou nosnou konstrukci. V případě aplikování grafitu do sádrové omítky se hodnoty zmíněných veličin snížily v závislosti na zvýšení součinitele tepelné vodivosti.

6.6 Stanovení vlhkosti vzorků

Z každého vzorku byly odlomeny 3 kusy materiálu, které byly použity pro orientační stanovení hmotnostní vlhkosti vzorků metodou gravimetrickou. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 34.

Tab. 34 – Hmotnosti vzorků (g) použité pro stanovení orientační vlhkosti (%) vzorků

Materiál	Hmotnost vlhkého vzorku (g)	Hmotnost vysušeného vzorku (g)
Sádrová omítka	271,65	267,10
Sádrová omítka s grafitem	217,19	213,71
Omítková směs	280,85	278,40
Omítková směs s grafitem	237,90	235,97

Na základě změřených hmotností vlhkých a vysušených vzorků byla stanovena vlhkost ze vztahu 19.

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (19)$$

kde m_v je hmotnost vlhkého vzorku (g)
 m_s hmotnost vysušeného vzorku (g)

Výsledné hmotnostní vlhkosti jsou zanesené v tabulce 35.

Tab. 35 – Vlhkosti vzorků (%)

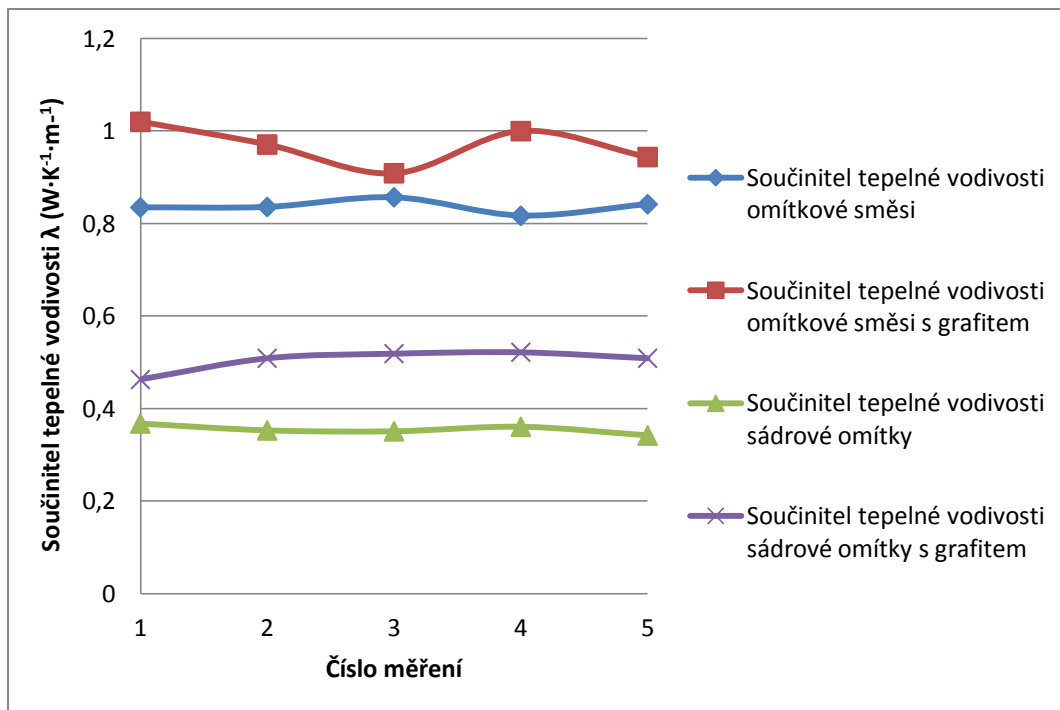
Materiál	Vlhkost vzorku (%)
Sádrová omítka	1,70
Sádrová omítka s grafitem	1,63
Omítková směs	0,88
Omítková směs s grafitem	0,82

6.7 Diskuze výsledků experimentu

Akumulační schopnost materiálu vyjadřuje fyzikální veličina tepelná jímavost materiálu b ($W^2 \cdot s$)/($m^4 \cdot K^2$). Ta závisí na třech fyzikálních parametrech, a to objemové hmotnosti materiálu ρ ($kg \cdot m^{-3}$), měrné tepelné kapacitě c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) a součiniteli tepelné vodivosti λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Vzhledem k tomu, že grafit má větší objemovou hmotnost a rozdílnou tepelnou kapacitu, bude i v tomto směru přispívat ke změně akumulčních schopností. Cílem této práce je ovšem zjistit pouze vliv tepelné vodivosti na akumulční schopnost materiálu. Čím bude součinitel λ vyšší, tím vyšší bude hodnota tepelné jímavosti a tudíž i akumulční schopnost. Na grafech 21 a 22 je znázorněna prakticky lineární závislost tepelné jímavosti na součiniteli tepelné vodivosti.

Na grafu 18 je možné vidět, o kolik se zvýšil součinitel λ vlivem přidání 5 hmotnostních % grafitu do příměsi. Příměsí 5 hmotnostních % grafitu do omítkové směsi došlo k nárůstu o 40 % u sádrové omítky a o 15 % u omítkové univerzální směsi.

To naznačuje fakt, že i takto malé množství příměsi s vyšší tepelnou vodivostí dokáže zvýšit vodivost až 3x.



Graf 18 – Hodnota součinitele tepelné vodivosti λ v závislosti na obsahu tepelně vodivého grafitu (%)

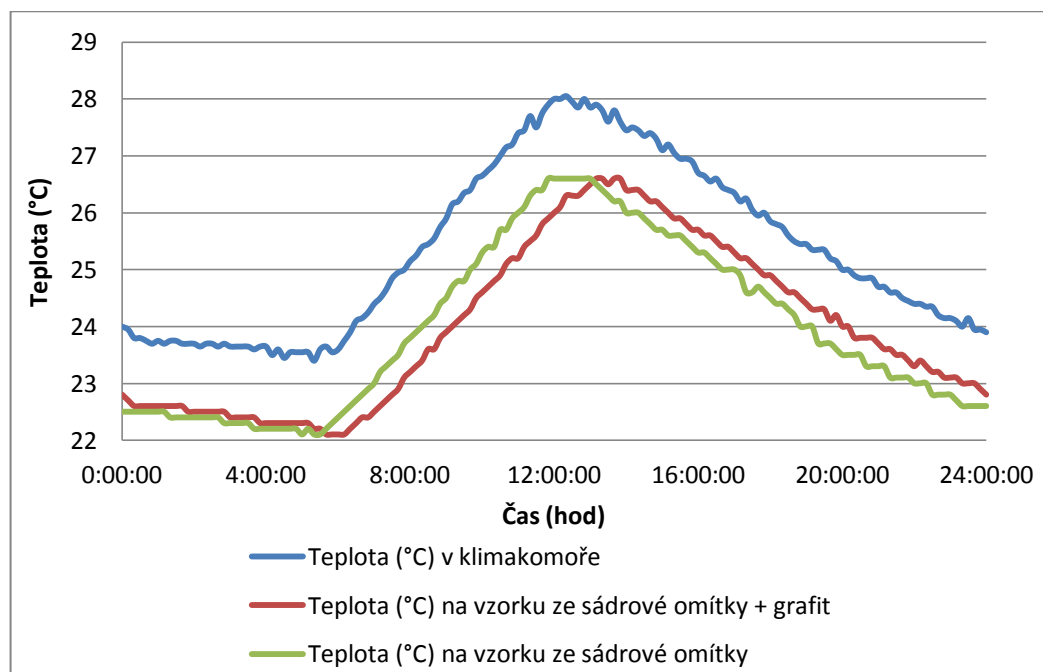
Na grafech 4-14 v kapitole 6.1-6.2 je možné pozorovat, že akumulční schopnost umožňuje rychlejší přenos tepla kondukcí do mocnosti materiálu. Grafit sám o sobě nezvýšil měrnou tepelnou kapacitu, tedy v kilogramu látky při rozdílu teploty 1 K nepojme materiál více energie, nicméně zvýšenou tepelnou vodivostí zajistí prohřátí vzorků do větší hloubky a teplo se neakumuluje pouze na povrchu látky. V případě, že se teplo ukládá pouze na povrchu konstrukce, předává svoji tepelnou energii okolnímu prostředí sáláním, kondukcí a konvekcí ihned, jakmile teplota interiéru poklesne. Pokud je ale teplo naakumulované hlouběji, při poklesu teploty v interiéru dojde k předání veškeré tepelné energie s jistým zpožděním, které závisí na hloubce prohřátí a součiniteli tepelné vodivosti λ . Lze tedy konstatovat, že za stejnou dobu zahřívání se vzorek s grafitem prohřeje v libovolné úrovni o více °C, což způsobí uložení většího množství energie v kilogramu látky.

Na grafech 10 a 11 je znázorněno opoždění nárustu teploty u vzorku bez grafitu oproti vzorku s grafitu o cca 80 min. Na grafech 13 a 14 je znázorněn fázový posun u

vzorku ze sádry s grafitem a bez grafitu. Maximální teploty je na vzorku s příměsí grafitu v místě styku vzorku s TI dosaženo po 20 minutách od teplotní špičky v klimakomoře, tedy fázový posun teplotních kmitů $\psi = 20$ min. U vzorku bez grafitu je tato hodnota fázového posunu dvojnásobná, tedy $\psi = 40$ min. Je tedy zřejmé, že materiál s příměsí grafitu dokáže na teplotní změny reagovat daleko pružněji.

Prohřívání povrchu vzorků a schopnost odvádět teplo do jádra materiálu je taktéž znázorněno na obrázcích 24 a 25. U vzorků s příměsí grafitu jsou vidět barevná pole o nižší teplotě, jelikož energii transportují do jádra materiálu, kdežto vzorky bez grafitu s nižší tepelnou vodivostí akumulují teplo blízko povrchu vzorku. Po přibližně 5 minutách chladnutí nastává obrácená situace, kdy povrch vzorků s grafitem je teplejší, jelikož teplo je vedeno z větší hloubky materiálu.

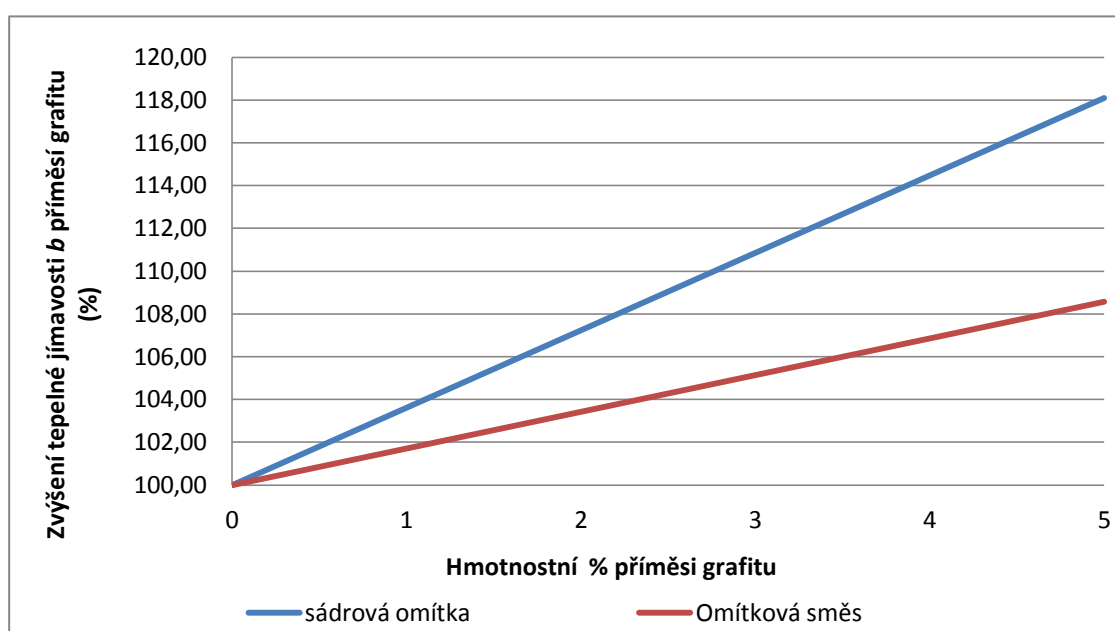
Na grafech je taktéž možno vidět, že při nárustu teploty v klimakomoře je vlivem odvodu tepla kondukcí povrch vzorku chladnější, což může v letních horkých dnech přispívat k ochlazování interiéru a vlivem nižší povrchové teploty taktéž přispívat k optimální pocitové teplotě.



Graf 19 – Grafické znázornění rozdílných teplot $T_{p,x}$ (°C) na povrchu vzorku tl. 2,0 cm ze sádry a sádry s grafitem v závislosti na teplotě v klimakomoře

Příměs grafitu, který zvýší tepelnou vodivost materiálu, tak zvyšuje tepelnou jímavost materiálu. Rozdíly v teplotách na povrchu vzorku ze sádrové omítky a sádrové omítky s grafitem jsou pouze v desetínách stupňů, jak je vidět na grafu 19.

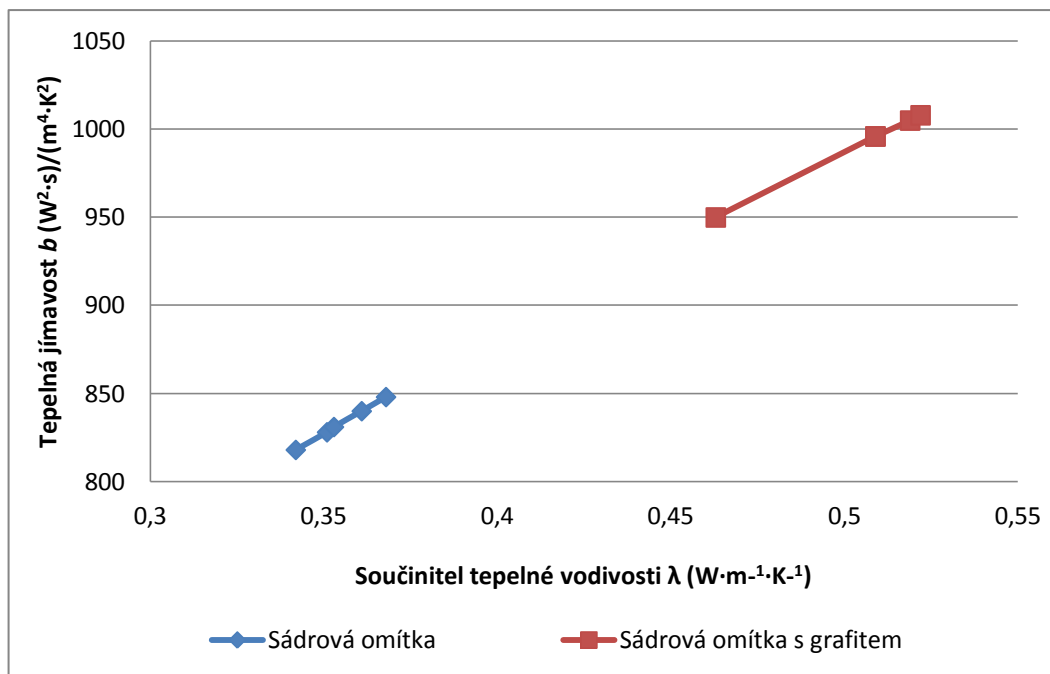
Vzhledem k těmto hodnotám byla provedena aplikace rozdílných povrchových úprav na stěny různých obytných místností v dřevostavbě. Posuzovaly se dvě nejrizikovější místnosti, jedna pro letní a druhá pro zimní období. Implementováním rozdílných naměřených hodnot tepelně-technických veličin se došlo k závěru, že na vnitřní stabilitu v zimním a letním období má příměs 5 hmotnostních % grafitu zanedbatelný vliv, jelikož hodnoty se liší o setiny až desetiny stupňů.



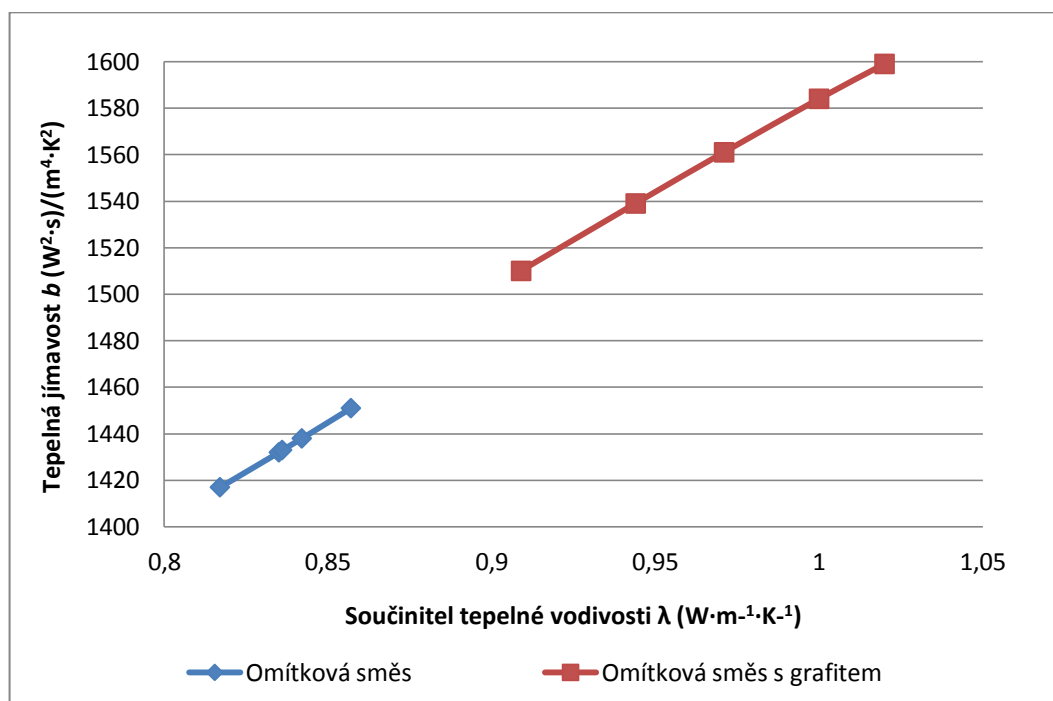
Graf 20 – Vliv příměsi grafitu (%) na tepelnou jímavost materiálu b

Taktéž byl pro dřevěnou konstrukci vypočten vliv na fázový posun a teplotní útlum konstrukce. Zvýšením tepelné vodivosti přidáním grafitu se docílilo 4% snížení teplotního útlumu konstrukce a 1% snížení fázového posunu teplotních kmitů.

Příměs grafitu v množství 5 hmotnostních % má vliv na zvýšení akumulčních schopností, ovšem změny jsou natolik nepatrné, že použití ve stavebnictví by bylo neefektivní. Pro použití ve výstavbě by se muselo uvažovat s větším hmotnostním podílem grafitu, který má však podstatný vliv na zpracovatelnost směsi a její následnou soudržnost a pevnost a použití by se muselo prokázat.



Graf 21 – Závislost tepelné jímavosti materiálu b na součiniteli tepelné jímavosti λ – sádrová omítka



Graf 22 – Závislost tepelné jímavosti materiálu b na součiniteli tepelné jímavosti λ – univerzální omítková směs

7 Závěr

Na základě všech naměřených dat na vzorcích z omítkových směsí, které byly obohaceny o příměs jemně mletého grafitu, bylo uděláno vyhodnocení. Příměs grafitu měla zajistit nárůst tepelné vodivosti materiálu a docílit tak efektivnější akumulaci tepla ve vzorcích.

Vmísením tepelně vodivého grafitu bylo zapříčiněno zvýšení součinitele tepelné vodivosti λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), tedy zvýšení tepelné vodivosti celé směsi. Tepelná vodivost byla příměsí 5 hmotnostních % grafitu zvýšena o 15-20 % u omítkové směsi a o 40 % u sádrové omítky. Na součiniteli tepelné vodivosti λ závisí akumulace tepla, která je charakterizována tepelnou jímavostí b ($\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$. Tepelná jímavost byla 40% zvýšením tepelné vodivosti sádrové omítky zvýšena o 18 %, při zvýšení tepelné vodivosti o 15 % u omítkové směsi se tepelná jímavost zvýšila o 8 %. Zvýšení tepelné vodivosti má vliv na zvýšení akumulace tepla, kde nárůst tepelné jímavosti b v závislosti na tepelné vodivosti má lineární průběh.

8 Seznam použitých zdrojů

[1] KÖSTER, Helmut. *Dynamika denního osvětlení: principy návrhů, realizace*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 319 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3049-3.

[2] HAZUCHA, Juraj. Zasklení. In: *pasivnidomy.cz* [online]. 2013 [cit. 6.1.2015]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/okna-a-dvere/t4028?s=102>

[3] HEJHÁLEK, Jiří. NEOPOR – Teplená izolace nové generace. www.stavebnictvi3000.cz. [online časopis]. © 2014–2016 VEGA, s.r.o., [cit. 18. 12. 2015]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/neopor-nova-generace-tepelne-izolace/>

[4] Autor neznámý. Výhody. Novatop-systém. www.novatop-system.cz. [online]. 2013 © AGROP NOVA a.s, [cit. 28. 10. 2015]. Dostupné z: <http://www.novatop-system.cz/co-je-novatop/vyhody/>

[5] SUMIN, Kim a DRZAL T., Lawrence. High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. [online]. ELSEVIER B.V., January 2009 [cit. 28. 10. 2015]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024808002857>

[6] Autor neznámý. Katalog stavebních materiálů. www.tzb.info.cz [online]. © Copyright Topinfo s.r.o. 2001-2015, [cit. 15. 11. 2015]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_katalog.html

[7] Autor: neznámý. www.fichema.cz [online]. FICHEMA s.r.o., [cit. 27. 11. 2015]. Dostupné z: http://www.fichema.cz/grafit-jemn-mlet-0025-mm/766-grafit-jemn-mlet-0025-mm-800-g-8592861141043.html?search_query=grafit&results=15

[8] HIRŠ, Jiří a GEBAUER, Günter, TZB – Vzduchotechnika, Tepelné bilance pro vzduchotechniku, [online]. © Ing. Günter Gebauer, CSc., Brno, 2005, [cit. 27. 11. 2015]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BT02-TZB%20III/M05-Tepelne%20bilance%20pro%20vzduchotechniku.pdf>

[9] ŠUBRT Roman. Jak zabránit letnímu přehřívání domu. www.nazeleno.cz [online-časopis]. © 2015 Nazeleno.cz, [cit. 27. 11. 2015]. ISSN 1803-4160. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/bydleni/vetrani-1/jak-zabranit-letnimu-prehrivani-domu.aspx>

[10] VAVERKA, Jiří. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 648 s. ISBN 80-214-2910-0.

[11] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013, 254 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.

[12] MATUŠKA, Tomáš. Trendy v solární tepelné technice (V) – Zásobníky tepla. www.tzb.info.cz [online-časopis]. © Copyright Topinfo s.r.o. 2001-2015, [cit. 27. 11. 2015]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2799-trendy-v-solarni-tepelne-technice-v-zasobniky-tepla>

[13] Autor neznámý. Nerudní a stavební suroviny. www.geologie.vsb.cz [online]. [cit. 28. 10. 2015]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudni_stavebni_suroviny.html#GRAFIT

9 Seznam použitých zkratek a symbolů

PCMs	Phase Change Materials (materiály se změnou skupenství)
TI	tepelná izolace
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage (akumulace tepla formou latentní energie)
xGnP	exfoliated Graphite nanoPlatelets (expandované grafitové nanodestičky)
PES	polystyren
U	součinitel protupu tepla v letním období ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
R_{si}	odpor při přestupu tepla na vnitřním povrchu ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
c	je měrná tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
E	energie (J)
m	hmotnost látky (kg)
$\Delta\Theta$	přírůstek teploty (K)
q	hustota tepelného toku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
ΔT	rozdíl teplot mezi povrchem stěny a okolním prostředím (K)
λ	je součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
grad Θ	gradient teploty ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$)
b	je tepelná jímavost ($\text{W}^2\cdot\text{s})/(\text{m}^4\cdot\text{K}^2)$)
ρ	objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
K_j	je součinitel určující zvýšení (snížení) tepelné jímavosti povrchu vrstvy oproti tepelné jímavosti materiálu vrstvy, pro nejnižší vrstvu se uvažuje hodnota $K_j = 0$
$B_{\text{mat},1}$	tepelná jímavost materiálu <i>j</i> -té vrstvy
ψ	fázový posun teplotních kmitů (hod)
ν	teplotní útlum konstrukce (-)
u_j	tepelná pohltivost vnějšího povrchu konstrukce <i>j</i> -té vrstvy konstrukce
R_{se}	odpor při přestupu tepla na vnějším povrchu konstrukce v letním období ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
d	tloušťka vrstvy (m)
m_v	je hmotnost vlhkého vzorku (g)
m_s	hmotnost vysušeného vzorku (g)
w	hmotnostní vlhkost (%)

10 Seznam příloh

Příloha č. 1 – CD s naměřenými hodnotami