

MĚŘENÍ TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

Gunnar KÜNZEL, Miloslav LINDA

Katedra elektrotechniky a automatizace, Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýčká 129, Praha 6 – Suchbátka, e-mail: kunzel@tf.czu.cz

Abstrakt

V příspěvku je uveden přehled jednotlivých vyráběných druhů izolačních materiálů včetně hodnot koeficientů měrné tepelné vodivosti, doporučené tloušťky izolace při vnějším zateplení a svázané primární energie (PI). V další části jsou definovány tepelné veličiny a parametry při vedení, proudění a při kombinaci sdílení tepla. Jsou také zmíněny vlivy pórovitosti, vlhkosti a teploty na koeficient měrné tepelné vodivosti a měrnou tepelnou kapacitu. Na přístroji ISOMET Heat Transfer Analyser model 2104, byly měřeny u řady izolačních materiálů povrchové teploty a jejich koeficienty tepelné vodivosti, objemové kapacity, teplotní vodivosti. Naměřené hodnoty jsou porovnány s tabulkovými hodnotami.

Úvod

Izolace patří k základním stavebním materiálům. Musíme se chránit proti vodě a vlhkosti (hydroizolace), proti chemickým látkám (izolace proti radonu), proti hluku a otřesům (zvuková izolace) a proti chladu a teplu (tepelná izolace).

Tepelné izolace vznikly z důvodu udržet v budovách co nejefektivněji potřebnou tepelnou pohodu, jejich koeficient měrné tepelné vodivosti je malý – $\lambda < 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Výhody kvalitního zateplení: snížení tepelných ztrát; snížení rizika plísňe zvýšením vnitřní povrchové teploty; menší namáhání nosné konstrukce atmosférickými vlivy; odstranění typických tepelných mostů – sekaní cihel, dozívání jiným zdivem, přechod zdiva na základ; nižší kondenzace vody v konstrukci; snižuje přehřívání budovy v letním období; redukce tloušťky nosného systému (zejména u zděných staveb).[1] Cílem příspěvku je měření povrchové teploty vybraných vzorků izolačních materiálů a tepelných parametrů měrné tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a koeficientu teplotní vodivosti.

Materiál a metody

Výrobky tepelných izolací mohou být ve formě desky, rohože nebo volné (sypané). Trh stavebních tepelných izolací můžeme rozdělit podle druhu materiálů: [2]

- vláknité materiály: skleněná, keramická, syntetická (textilní) vlákna;
- plastové: PS, PUR, PVC, PE, fenolické a rezolové pryskyřice, kaučuk, pěnové sklo;
- materiály na bázi dřeva: korek, piliny, rákosové rohože, kokosová vlákna, dřevovláknité;
- materiály na bázi papíru: drcený starý papír, voštinové desky, vlnité desky z asfaltového papíru;
- minerální materiály: čedičová vlákna, expandovaný perlit, expandovaná břidlice, struska, křemelina, keramzit, popílek;
- zvláštní tepelné izolace: sláma, konopí, na bázi ovčí vlny případně bavlny.

Tab. 1: Základní vlastnosti jednotlivých druhů izolací [3]

typ izolace	Koeficient měrné tepelné vodivosti λ_D [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	doporučená tloušťka izolace* [mm]	svázaná primární energie ** (PEI) [MJ.kg ⁻¹]
cihla děrovaná	0,09	750	2,49
expandovaný polystyren EPS	0,031 - 0,040	300	98,5
extrudovaný polystyren XPS	0,029 – 0,038	280	104
pěnový polyuretan PUR	0,024 – 0,028	220	49,8
minerální vlna	0,030 – 0,042	300	23,3
pěnové sklo	0,040 – 0,050	300	15,7
pěnové sklo, štěrk	0,075 – 0,090	600	6,7
vakuová izolace	0,008	60	62,1
celulóza	0,037 - 0,042	320	7
dřevité desky	0,038 - 0,046	330	13,7
desky na bázi konopí	0,04	320	31,1
sláma	cca 0,050 - 0,060	400	3,2

*Tloušťka izolace při vnějším zateplení masivní stavby na úroveň běžnou u pasivních domů při $U = 0,12 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Nosnou vrstvou tvoří vápenopískové cihly tloušťky 175 mm (neuvažován vliv omítek). Pro zjednodušení a přehlednost je tato skladba uvažována i u materiálů, které se častěji používají u dřevostaveb.

** Pro porovnání ekologické stopy materiálů je v tabulce uvedena i hodnota svázané primární energie (PEI), tzv. „šedá energie“. Jedná se o množství spotřebované primární energie vynaložené k získání suroviny, výrobě a dopravě materiálu v MJ.kg⁻¹.

Tepelné vlastnosti materiálů

Vyjadřují chování materiálů vystavených účinkům tepla nebo mrazu. Tepelné izolanty skoro nepředávají teplo z termodynamické soustavy dále do okolního prostředí. Vodiče tepla předávají snadno teplo okolního prostředí.

V normě ČSN 73 0540-1:2005 (Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie) jsou definovány pojmy, které popisují tepelné veličiny a parametry materiálů. Jejich hodnoty vyjadřují sdílení tepla ve stavebním materiálu, výrobku nebo konstrukci. Tepelná výměna může nastat v závislosti na typu prostředí fyzikálních základech ve třech základních typech pohybu teplené energie nebo jejich kombinací. [4] (Vedení, proudění, sálání a jejich kombinace)

Tepelné veličiny a parametry [4,6,7]

Tepelný tok - P [W] - je množství tepla, které proudí do nebo ze systému (prostoru) za jednotku času. Zahrnuje všechny složky šíření tepla.

Koeficient měrné tepelné vodivosti - λ [W.m⁻¹.K⁻¹] - je základní tepelnou hodnotou, vlastností stavebních materiálů a výrobků. Je závislý zejména na objemové hmotnosti a vlhkosti materiálu (obvykle platí, že s rostoucí vlhkostí a objemovou hmotností roste hodnota koeficientu tepelné vodivosti). Určuje tok tepla, který přeneše vzorek materiálu plochou 1 m² do vzdálenosti 1 m při teplotním rozdílu 1K. Je dán Fourierovým zákonem vedení tepla ve tvaru:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad} \theta \quad (1)$$

kde \vec{q} je vektor hustoty ustáleného tepelného toku sdíleného vedením, proudícího stejnorodým isotropním materiálem [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$];
 $\text{grad} \theta$ gradient teploty [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$],

Měrná tepelná kapacita - c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] - je množství tepelné energie, které je třeba dodat při stálém tlaku vzorku materiál o definované vlhkosti a hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K.

Je definována vztahem:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta \theta} \quad (2)$$

kde Q je tepelná energie (množství přivedeného tepla) [J],
 m hmotnost [kg],
 $\Delta \theta$ změna teploty [K]

Koeficient teplotní vodivosti - a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] - lze definovat jako schopnost stejnorodého materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném vedení tepla. Je dán vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3)$$

kde ρ je objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 λ součinitel měrné tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Tepelná jímavost - b [$\text{W}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-2}$] - je schopnost materiálu o definované vlhkosti přijímat (jímat) teplo. Je definována vztahem:

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho \quad (4)$$

kde ρ je objemová hmotnost ve stavu definované vlhkosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 λ koeficient měrné tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Tepelný odpor vrstvy; tepelný odpor konstrukce - R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] - určuje tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu (stavební konstrukce) dané tloušťky. Je dán vztahem:

$$R = \frac{1}{L} \quad (5)$$

kde L je plošná tepelná propustnost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

Je-li známa hodnota koeficientu měrné tepelné vodivosti vrstvy materiálu a je-li konstantní, povrchy kolmé na směr tepelného toku jsou vzájemně rovnoběžné (planparalelní vrstva) a vrstvou tak proudí rovnoměrný tepelný tok, je tepelný odpor definován vztahem:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

kde d je tloušťka vrstvy; tloušťka vrstvy v konstrukci [m],
 λ koeficient měrné tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

Odpor konstrukce při prostupu tepla - R_T [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$] - mezi prostředími oddělenými od sebe stavební konstrukcí o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, Je definován vztahem:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (7)$$

Kde R_{si} je odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$] (tab. 2);
 R odpor konstrukce [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$];
 R_{se} odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$] (tab. 3).

Tab. 2: Hodnoty R_{si} pro výpočet R_t [10]

		R_{si} [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
svislá konstrukce		0.25 (pro neprůsvitné konstrukce)
(dle ČSN 730540-2 a SN EN ISO 13788)		0.13 (pro výplně otvorů)
vodorovná konstrukce	tepelný tok nahoru	0.10
	tepelný tok dolů	0.17

Tab. 3: Hodnoty R_{se} pro výpočet R_t [10]

	R_{se} [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]
zimní období	0.04
zimní období (nadmořská výška ≥ 1000 m. n. m.)	0.03
letní období	0.07

Koeficient prostupu tepla - U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] - určuje celkovou výměnu tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími, která jsou vzájemně oddělena stavební konstrukcí o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, zahrnuje vliv všech tepelných mostů. Je definován vztahem:

$$U_T = \frac{1}{R_T} \quad (8)$$

kde R_T je odpor konstrukce při prostupu tepla (z prostředí do prostředí) [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$],

Definované tepelné veličiny závisí na některých faktorech, jako je pórovitost, vlhkost a teplota.

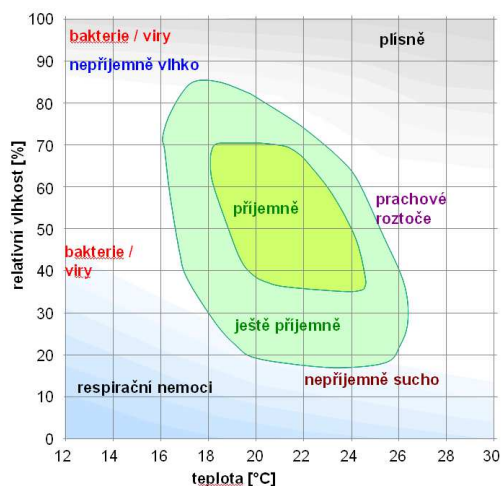
Vliv pórovitosti

Pórovitost znamená množství vzduchu v materiálu. Čím vyšší pórovitost, tím nižší hmotnost i tepelná vodivost, protože λ vzduchu = $0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, ale velikost pórů je omezena (nejlépe 0,1 – 1 mm). Pokud bude tedy nějaký pórovitý tepelně izolační materiál při manipulaci a zavedení do konstrukce pomačkáán, nebo zmačkáán na menší objemovou hmotnost, tak se jeho vlastnosti v tomto ohledu zhorší. Proto je potřeba dodržovat technologické postupy. Závislost změny objemové hmotnosti byly zkoušeny v laboratoři na vlnité čedičové desce. Nejprve byla změřena její tepelná vodivost v nezatíženém stavu, a později, byla zatížena cihlou a změřena znovu. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tab. 4.

Vliv vlhkosti

Vlhkosti je nežádoucí z důvodu ohrožení požadovaných funkcí: zkrácení předpokládané životnosti konstrukce, možný vzniku plísní, degradace materiálu (částečná, nebo úplná ztráta některé tepelně izolační vlastnosti materiálů), objemové změny, které zvyšují hmotnosti konstrukce (možnost přetížení vedoucí k pádu části nebo celé budovy), zvýšení hmotnostní vlhkosti materiálu na úroveň způsobující jeho degradaci. Hygienicky doporučovaná vyšší relativní vlhkost vzduchu v rozsahu 40 až 60 %. Důsledkem je pak zvýšená nemocnost obyvatel (alergie, záněty průdušek, dýchací potíže atd.). Jaké hodnoty jsou pro nás příjemné a jaké jsou příjemné pro bakterie, viry a plísně jsou graficky zobrazeny na obr. 1.

Zejména musí být respektovány podmínky pro uplatnění dřeva a/nebo materiálů na bázi dřeva. Jak bylo v laboratoři zkoušeno několik vzorků dřevin a jeden z nich (smrk) byl nechán ve vlhkém prostředí (ponořen 48 hodin), později byl vložen do pece a proběhlo měření. Po několika měřeních se na boku podél letokruhů objevily trhlinky, které se zvětšovaly kvůli odpařující se vodě obr. 2.



Obr. 1: Diagram vlivu teploty a relativní vlhkosti na komfort a případné rizika zhoršení kvality vnitřního prostředí. [9]



Obr. 2: Změna struktury smrkového vzorku vlivem vlhkosti.

Vlhkost materiálu [7]

Pro většinu materiálu je ve výrobních katalozích definováno několik tepelných parametrů, které jsou platné pro suchý materiál. Při realizaci stavby materiál má nějakou vlhkost, zapříčiněnou třeba sorpcí vlhkosti z okolního prostředí. Touto problematikou se zabývá mnoho zkušeben, v časopise Stavební obzor se objevily články s testy závislosti vlhkosti materiálu na tepelných vlastnostech

Vlhkost vzorku je poměr obsahu volné vlhkosti obsažené v materiálu/výrobku k hmotnosti materiálu/výrobku v suchém stavu. Je definována vztahem:

$$u = 100 \cdot \frac{m - m_0}{m_0} \quad (9)$$

kde u je hmotnostní vlhkost a je definována v procentech [%],
 m hmotnost materiálu ve vlhkém stavu [g];
 m_0 hmotnost materiálu v suchém stavu (zdánlivě suchém stavu)[g];

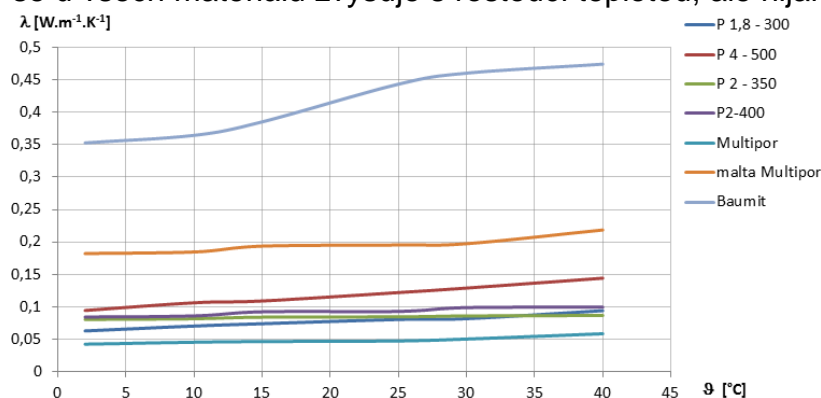
Tab. 4: Koeficient měrné tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita materiálů [7]

Materiál	Koeficient měrné tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]		Měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	
	vysušený	kapilárně nasycený	vysušený	kapilárně nasycený
P 1,8-300	0,075	0,330	$1,08 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^3$
P 4-500	0,084	0,409	$1,16 \cdot 10^3$	$2,75 \cdot 10^3$
P 2-350	0,094	0,385	$1,21 \cdot 10^3$	$2,64 \cdot 10^3$
P 2-400	0,114	0,454	$1,05 \cdot 10^3$	$1,84 \cdot 10^3$
Multipor	0,473	1,450	$1,02 \cdot 10^3$	$1,51 \cdot 10^3$
malta Multipor	0,047	0,166	$2,23 \cdot 10^3$	$3,50 \cdot 10^3$
Baumit	0,179	1,221	$1,07 \cdot 10^3$	$1,47 \cdot 10^3$

Vliv teploty

S vyšší teplotou roste pohyb částic materiálu, tím je urychlen přenos tepla mezi vrstvami.

Koeficient měrné tepelné vodivosti v závislosti na teplotě je uveden na obr. 3. Je zřejmé, že se u všech materiálů zvyšuje s rostoucí teplotou, ale nijak dramaticky.



Obr. 3: Koeficient tepelné vodivosti v závislosti na teplotě [7]

Výsledky a diskuse

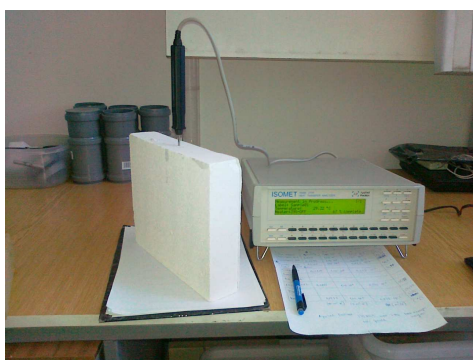
Na technické fakultě byl katedrou mechaniky a strojnictví zakoupen přístroj **ISOMET** Heat transfer analyzer model 2104. Tento přístroj vyhodnocuje tepelné vlastnosti materiálů pomocí dat získaných z injektážních jehel, nebo deskových senzorů [13]

Měření probíhalo na přístroji s měřicími jehlami. Vzorky materiálů musely tedy být spíše měkčího charakteru, nebo bylo možné do vzorku vyvrtat díru o průměru jako průměr jehly, aby bylo možné jehlu do vzorku zasunout v požadované míře. Vzorky materiálů musí splňovat požadavky hlavně na rozměry, které zaručovaly dostatečné obklopení jehly materiálem. Jehla má docela malý průměr a délku 50 mm. Požadavky na materiál byly min. 15 mm kolem jehly ze všech stran a nároky na délku – hloubka vsunutí + 20 mm, takže jsme museli mít vzorky vysoké a široké ideálně přes 40 mm a dlouhé 80 mm.

Na začátku přístroj zjistí teplotu materiálů. Pak začne stanovovat jejich tepelné vlastnosti a po zhruba 15 minutách přístroj zobrazí výsledné hodnoty. Isomet tedy dokáže změřit teplotu, koeficient měrné tepelné vodivosti, objemovou tepelnou kapacitu a koeficient teplotní vodivosti. Výsledky měření jsou zpracovány v tab. 6

Tab. 6: Hodnoty naměřené přístrojem ISOMET

Materiál	Teplota materiálu	Součinitel tepelné vodivosti	Objemová tepelná kapacita	Součinitel teplotní vodivosti
	t [°C]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	C _p [J.m ⁻³ .K ⁻¹]	a [m ² .s ⁻¹]
Pěna měkká	26,79	0,0296	1,40	0,021
Polystyren (růžový)	26,97	0,0290	1,40	0,021
Polystyren (černý)	26,99	0,0273	1,40	0,019
Minerál. vlna nestlačená (58 mm)	26,57	0,0309	1,40	0,022
Minerál. vlna stlačená (3,5 mm)	26,60	0,0317	1,40	0,023
Isover RIO	26,49	0,0317	1,40	0,023
Konopí	26,38	0,0425	1,40	0,030
PUR pěna	26,85	0,0287	1,40	0,021
EKO panel	25,18	0,0855	1,42	0,060
Ytong	25,77	0,1470	1,46	0,101
Korek	26,03	0,0547	1,41	0,039



Obr. 4: Průběh měření na přístroji ISOMET

Tab. 7: Porovnání naměřených měrných tepelných vodivostí s tabulkovými hodnotami [12]

Materiál	Koeficient měrné tepelné vodivosti	Tabulkové hodnoty koeficientu měrné tepelné vodivosti
	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Pěna měkká	0,0296	0,03
Polystyren (růžový)	0,0290	0,031 - 0,040
Polystyren (černý)	0,0273	0,031 - 0,041
Minerál. vlna nestlačená (58 mm)	0,0309	0,030 – 0,042
Minerál. vlna stlačená (35 mm)	0,0317	---
Isover RIO	0,0317	0,04
Konopí	0,0425	0,04
PUR pěna	0,0287	0,024 – 0,028
EKO panel	0,0855	cca 0,050 - 0,060
Ytong	0,1470	0,14
Korek	0,0547	0,035-0,041

Závěr

U vybraných vzorků stavebních materiálů (viz. tab. 6) byly změřeny tepelné parametry – kromě povrchové teploty vzorku také měrná tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a koeficient teplotní vodivosti.

Výsledky měření ISOMETem jsou vcelku průkazné, není vidět žádný razantní rozdíl v porovnání s tabulkovou, nebo výrobcem udávanou hodnotou měrné tepelné vodivosti. Data z mnoha provedených měření byla statisticky zpracována.

Předpokládá se porovnání též s výsledky jiných dostupných měřících přístrojů např. TCmeter.

Poděkování

Poznatky prezentované v tomto článku byly získány při řešení grantu CIGA ČZU v Praze č. 20113006; 31200/1313/3131 „Elektrotepelná diagnostika izolačních materiálů“.

LITERATURA

- [1] Tepelné izolace 1.Dům v kožichu,“ Centrum pasivního domu, [Online]. Available: <http://www.pasivnidomy.cz/tepelna-ochrana/tepelne-izolace.html>.
- [2] R. tzb-info.cz, „Stavební tepelné izolace - přehled trhu,“ 2007, [Online]. Available: <http://www.tzb-info.cz/3991-stavebni-tepelne-izolace-prehled-trhu>
- [3] „Tepelné izolace 5.Základní vlastnosti jednotlivých druhů izolací,“ Centrum pasivního domu , [Online]. Available: <http://www.pasivnidomy.cz/tepelna-ochrana/tepelne-izolace.html?chapter=zakladni-vlastnosti-jednotlivych-druhu-izolaci>
- [4] HOLÁSEK, H., ÚZ č. 796 stavební zákon a vyhlášky podle stavu k 7. 6. 2010, Ostrava: Nakladatelství Sagit, a.s.
- [5] ČSN EN 73 0540-1:Terminologie.
- [6] KÜNZEL, G. st. *Matematické modely sdílení tepla v konstrukcích elektroniky*. Praha: Academia nakladatelství Československé akademie věd., 1990.
- [7] FUKÁTKO, T. - FUKÁTKO, J. *Teplo a chlazení v elektronice II*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 120s. ISBN 80-7300-199-3.
- [8] VÝBORNÝ, J. a kol., *Tepelné a vlhkostní transportní charakteristiky nových pórobetonových výrobků*, Stavební obzor č. 1, sv. 2011, 2011.
- [9] PAVLÍK, Z. a kol., Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost vápenných kompozitů, Stavební obzor č. 3, sv. 2009, 2009.
- [10] „Kvalita vnitřního prostředí 2.Hodnocení kvality vnitřního prostředí,“ Centrum pasivního domu, [Online]. Available: <http://www.pasivnidomy.cz/pasivnidom/vnitri-prostredi-domu/kvalita-vnitriho-prostredi.html?chapter=hodnoceni-kvality-vnitriho-prostredi>
- [11] „VÝPOČET SOUČinitele PROSTUPU TEPLA - NÁPOVĚDA,“ [Online]. Available: http://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000068_help.html
- [12] FEYNMAN, R. – LEIGHTON, R. – SANDS, M. Přednášky z fyziky s řešenými příklady 3/3. Druhý dotisk 1. vydání. Fragment: Havlíčkův Brod, 2002. ISBN 80-7200-421-2.
- [13] DVOŘÁK, J. Stavební materiály a jejich tepelně izolační vlastnosti, Bakalářská práce, Technická fakulta ČZU v Praze, str. 54, 2011.