

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

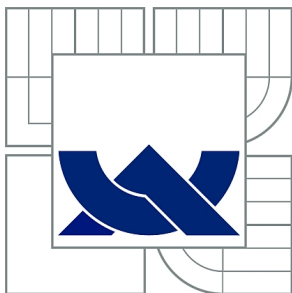
STUDIUM PASIVNÍ STABILIZACE TEPLoty KOMPOZITNÍCH
STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

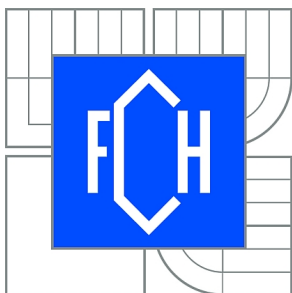
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN ŠEBEK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE
FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM PASIVNÍ STABILIZACE TEPLoty KOMPOZITNÍCH STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

STUDY OF PASSIVE STABILISATION OF BUILDING MATERIALS TEMPERATURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN ŠEBEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH ZMEŠKAL, CSc.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	FCH-DIP0421/2009	Akademický rok: 2009/2010
Ústav:	Ústav fyzikální a spotřební chemie	
Student(ka):	Bc. Jan Šebek	
Studijní program:	Spotřební chemie (N2806)	
Studijní obor:	Spotřební chemie (2806T002)	
Vedoucí práce	prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.	
Konzultanti:		

Název diplomové práce:

Studium pasivní stabilizace teploty kompozitních stavebních materiálů

Zadání diplomové práce:

1. Proveďte rešerši na téma materiály pro akumulaci tepla důsledkem fázové přeměny
2. Proměřte tepelné vlastnosti vybraných kompozitních materiálů pro pasivní stabilizaci teploty
3. Interpretujte naměřené výsledky, srovnajte je s výsledky měření na klasických stavebních materiálech
4. Výsledky zpracujte do diplomové práce

Termín odevzdání diplomové práce: 14.5.2010

Diplomová práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

Bc. Jan Šebek
Student(ka)

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
Vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 1.12.2009

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předmětem této práce bylo studium pasivní stabilizace teploty kompozitních stavebních materiálů. Cílem mojí práce bylo změřit a charakterizovat tepelné vlastnosti kompozitních stavebních materiálů, které se využívají v PCM technologii. Tato je založena na využití skupenského tepla fázové změny látek.

V úvodu bylo třeba definovat fyzikální podstatu fázových změn, uvést nejhojněji využívané chemikálie jako PCM (například parafín, Glauberovu sůl, hexahydrát chloridu vápenatého) a jejich základní fyzikální vlastnosti (zejména tepelné), provést rešerši kompozitních stavebních materiálů s PCM a také uvést metody, kterými jsem zkoumal tepelné vlastnosti materiálů. Dále bylo zapotřebí charakterizovat měřené kompozitní stavební materiály a definovat jejich tepelné parametry, neboť s těmito hodnotami byly porovnávány hodnoty tepelných parametrů měřených vzorků.

V experimentální části mojí práce jsou uvedena měření tepelných analýz, což jsou metody, které zkoumají vlastnosti materiálů v závislosti na teplotě. Z dostupných metod byla použita diferenční skenovací kalorimetrie, transientní pulzní metoda a další metody, které jsou vhodné pro měření a charakterizaci tepelných vlastností materiálů. Nejvíce mě u studovaných materiálů zajímaly fyzikální vlastnosti, kterými byly měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti a teplota fázové změny (bod tání PCM látky). Na konci mojí práce byly zjištěné výsledky shrnuty, porovnány a okomentovány.

ABSTRACT

The topic of presented master's thesis was study of passive stabilization of building materials temperature. The main goal of this thesis was measuring and characterization of the thermal properties of building materials, which are used to PCM technology. PCM technology is based on utilization of latent heat of phase change.

At the beginning of this thesis it was needed to define physical principle of phase change, then the most usable PCM chemicals (e.g. paraffin, Glauber's salt, hexahydrate calcium chloride) and their basic physical properties (especially thermo-physical), background research of building materials with PCM and also the methods of thermo-physical properties measurement. It was also needed to characterize measured building materials and define their thermal parameters; because the values of thermal parameters of measured samples were compared to these values.

In the experimental part of my thesis are measurements of material thermal analysis, which are methods, where the properties of materials are studied as they change with temperature. I had used to differential scanning calorimetry, transient pulse method and other methods, which are usable for thermo-physical properties measuring and characterization. I have been much interested in properties of measured material, which were specific heat capacity, temperature diffusivity, heat conductivity and phase change temperature (the melting point of PCM). At the end of my thesis the findings of all methods were finally summarized, compared and commented.

KLÍČOVÁ SLOVA

Teplo, fázová změna, PCM, stavební materiály, tepelné vlastnosti, pulsní transientní metoda

KEYWORDS

Heat, phase change, PCM, building materials, thermal properties, pulse transient method

ŠEBEK, J. *Studium pasivní stabilizace teploty kompozitních stavebních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010. 56 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc., za podporu, vstřícnost, poskytnuté rady a v neposlední řadě za jeho trpělivé odborné vedení při zpracovávání finální podoby této práce.

Dále bych velmi rád poděkoval panu doc. Ing. Jiřímu Kučeríkovi, Ph.D. a panu Marianu Markovičovi za poskytnuté odborné rady a konzultace při měření vzorků.

Obsah

1.	ÚVOD	7
2.	CÍL PRÁCE.....	8
3.	TEORETICKÁ ČÁST.....	9
3.1	Fázové změny.....	9
3.1.1	Skupenská tepla	9
3.1.2	Využití skupenského tepla fázové změny.....	10
3.2	Látky využívané pro akumulaci tepla důsledkem fázové změny.....	10
3.2.1	Parafíny	12
3.2.2	Glauberova sůl.....	12
3.2.3	Hexahydrát chloridu vápenatého	13
3.3	Kompozitní stavební materiály využívané pro pasivní stabilizaci teploty.....	14
3.3.1	Micronal PCM	15
3.3.2	Omítka Maxit Clima 26	16
3.3.3	Sádkartonové desky Knauf PCM Smartboard	17
3.3.4	Porobetonové tvárnice CelBloc Plus.....	19
3.3.5	Systém Delta Cool.....	20
3.3.6	Systém GlassX.....	23
3.3.7	Další materiály využívané pro pasivní stabilizaci teploty	24
3.4	Metody měření tepelných vlastností PCM vzorků.....	26
3.4.1	Diferenční skenovací kalorimetrie.....	27
3.4.2	Transientní pulsní metoda	27
3.4.3	Další aplikované metody měření tepelných vlastností PCM vzorků.....	29
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	30
4.1	Měřené materiály	30
4.2	Použité měřicí přístroje	31
4.2.1	Diferenční skenovací kalorimetr.....	31
4.2.2	Thermophysical Tester RTB	32
4.2.3	Přístroj Isomet 2104	34
4.3	Experimentální data	36
4.3.1	DSC vzorku Micronalu PCM.....	36
4.3.2	DSC vzorku desky Micronal PCM Smartboard.....	39
4.3.3	Transientní pulsní metoda vzorku desky Micronal PCM Smartboard	42
4.3.4	Pulsní metoda jehlovou sondou vzorku desky Micronal PCM Smartboard	45
4.3.5	Další měření vzorků desky Micronal PCM Smartboard	47
5.	VÝSLEDKY A DISKUSE.....	50
6.	ZÁVĚR.....	53
7.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
8.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	55
9.	SEZNAM PŘÍLOH	56

1. ÚVOD

V současném světě je velmi aktuální problematika úspory energie, kterou lidstvo spotřebovává a v široké škále oborů lidské činnosti je energetickými zdroji plýtváno. Nedílnou součástí energetické otázky je tudíž kromě výroby energie samotná úspora energie a čím dál větší využití obnovitelných zdrojů nebo speciálních vlastností látek, které umožňují akumulovat energii, nejčastěji tepelnou.

Poslední roky vývoje kompozitních stavebních materiálů ukazují, že se do technologií staveb dostává nový trend, který přispívá k rozvoji výstavby nízkoenergetických budov. Stavby se nyní v České republice posuzují podle energetického auditu budovy, ve kterém se nejvíce sledují ukazatele spotřeby tepla a elektrické energie, tudíž celkové energetické náročnosti budovy. K tomu přispívá také použití kompozitních stavebních materiálů, které mají speciální tepelné vlastnosti.

Úkolem této práce je studium látek využívaných pro akumulaci tepla důsledkem fázové změny a stavebních kompozitních materiálů využívaných pro pasivní stabilizaci teploty. V experimentální části se zaměřuji na měření tepelných vlastností studovaných látek a materiálů.

Termofyzikální vlastnosti látek a stavebních kompozitních materiálů jsou důležité také pro vývoj nových látek, materiálů a technologií. Pro měření termofyzikálních vlastností byla vyvinuta celá řada metod. Ve své diplomové práci charakterizuji tepelné vlastnosti vzorků zejména pomocí diferenční skenovací kalorimetrie a transientní pulsní metody.

2. CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo studium pasivní stabilizace teploty kompozitních stavebních materiálů, které obsahují látky využívající pro akumulaci tepla fázový přechod mezi pevným a kapalným skupenstvím. Ke splnění tohoto zadání bylo třeba provést následující kroky:

- Prostudovat materiály a látky pro akumulaci tepla důsledkem fázové změny.
- Změřit tepelné vlastnosti vybraných kompozitních materiálů pro pasivní stabilizaci teploty.
- Porovnat výsledky měření s tepelnými vlastnostmi klasických stavebních materiálů.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Fázové změny

Změnou teploty dochází ke změnám fyzikálních vlastností látek. Mění se například objem, hustota, elektrická vodivost, viskozita, magnetické vlastnosti atd. K velmi podstatným změnám fyzikálních vlastností látek dochází při fázových změnách, při změnách skupenství.

Termodynamická teplotní stupnice je zdola ohraničená teplotou 0 K, tzv. absolutní nulou. V teplotním intervalu od absolutní nuly do bodu tání (respektive tuhnutí) existuje látka v pevné fázi. Mezi bodem tání (respektive tuhnutí) a bodem varu (respektive kondenzace) existuje látka v kapalně fázi. Nad bodem varu má smysl hovořit už jen o plynné fázi. Jde však o plynnou fázi v širším smyslu slova, protože ta je ještě kritickou teplotou rozdělena na fázi parní, existující při teplotě nižší, a na fázi pravého plynu, existující při teplotě vyšší. Obě plynné fáze chemického individua jsou dokonale homogenní. Je také známo, že lze plyn zkapalnit snižováním teploty a zvyšováním tlaku. Kritická teplota bývá obvykle označována jako teplota, nad níž nelze plyn sebevětším tlakem zkapalnit, což znamená, že plyny nad kritickou teplotou jsou ve skutečnosti nezkapalnitelné, zkapalnitelný je pouze plyn v parní fázi [2].

Musíme ještě uvažovat fázovou změnu z pevné látky na plynnou, nachází-li se látka v soustavě konstantního tlaku (izobarický děj), jehož hodnota je nižší než hodnota tlaku trojného bodu. Tento přechod se nazývá sublimace.

Uvedený pohled na fázové změny je zjednodušený, protože se v něm neuvažují podmínky koexistence různých fází těžé chemické látky.

3.1.1 Skupenská tepla

Existují fyzikální děje, při kterých se teplota látky nemění, i když je jí dodáváno nebo odebíráno teplo. Takový děj nejčastěji souvisí se změnou skupenství. Například dodáváme-li tepelnou energii pevné látce, jejíž původní teplota ležela pod bodem tání, látka se napřed ohřívá. Po dosažení teploty tání se růst teploty zastaví a setrvává na konstantní hodnotě tak dlouho, dokud se udrží stav koexistence pevné a kapalně fáze. Jakmile dojde k úplné přeměně pevné látky na kapalinu, začne teplota látky opět stoupat [2].

Jelikož se skupenské teplo dodávané nebo odebírané látce nespotřebovává na zvýšení nebo snížení teploty látky, bývá toto teplo také nazýváno teplem latentním (skrytým).

Pro jednotlivé fázové změny jsou zavedena následující skupenská tepla [2]:

- skupenské teplo tání, což je množství tepla, které je třeba dodat pevné látce při teplotě tání, aby se změnila v kapalnou látku téže teploty.
- skupenské teplo tuhnutí, což je množství tepla, které je třeba odebrat kapalně látce při teplotě tuhnutí, aby se změnila v pevnou látku téže teploty.

- skupenské teplo výparné, což je množství tepla, které je třeba dodat kapalně látce při teplotě varu, aby se změnila v plynou látku (parní fázi) téže teploty.
- skupenské teplo kondenzační, což je množství tepla, které je třeba odebrat plynně látce při kondenzační teplotě, aby se změnila v kapalnou látku téže teploty.

Fyzikální jednotkou všech skupenských tepel je J (Joule) [2], který má fyzikální rozměr $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

3.1.2 *Využití skupenského tepla fázové změny*

V čistých chemických látkách jsou možné tři druhy fázových změn: tání-tuhnutí, výpar-kondenzace a sublimace-desublimace. Ke skladování velkého množství páry by bylo potřeba objemné zařízení odolávající velkým tlakům [1]. Z tohoto důvodu je nejvíce využitelné skupenské teplo fázové změny mezi pevnou látkou a kapalinou.

Materiály, které mění skupenství a tím uvolňují nebo přijímají velké skupenské teplo, se označují zkratkou PCM (z anglického Phase Change Material) a jsou využívány v různých oborech [1]. V dalších částech práce budu pojednávat o využití PCM zejména ve stavebním odvětví konkrétně ve stavebních kompozitních materiálech.

3.2 *Látky využívané pro akumulaci tepla důsledkem fázové změny*

První aplikace PCM jsou velmi starého data a váží se zejména k problematice chlazení. Tyto látky se na začátku 20. století využívaly v ledárnách, pivních sklepech a při přepravě tepelně choulostivých potravin. Konstrukce zásobníků, které využívaly pro náplně některých anorganických solí, se začaly rozvíjet ve 20. a 30. letech 20. století. Jedním z prvních akumulátorů s PCM bylo v roce 1932 patentováno zařízení pro ohřev teplé užitkové vody. Tehdy se jako PCM používaly hydratované anorganické soli a parafin. V roce 1965 byly patentovány ohřívací vložky s hydridem lithia pro horolezce, polární badatele a letce [7].

Velký pokrok v systematickém vyhledávání a zkoumání PCM byl učiněn v programech vesmírného výzkumu na základě zadání Úřadu pro letectví a kosmonautiku ve Spojených státech amerických (NASA). Tento úřad chtěl zajistit v objektech pohybujících se vesmírem a řízených lidskou posádkou trvalou přiměřenou tepelnou pohodu, tedy prostředí s trvalou hodnotou vnitřní teploty [7].

První stavbou, jejíž otopná soustava plně využívala PCM, byl tzv. Dover House, postavený v roce 1948 nedaleko Bostonu v USA. Zásobníky byly realizovány třemi prostory, jejichž stěny působily jako radiátory do sousedních místností. Každá z těchto prostor obsahovala plastové sudy s náplní Glauberovy soli, dosud nejprozkoumanějším materiálem pro zásobníky s PCM [1].

V roce 1971 začal rozsáhlý systematický průzkum látek vhodných pro zásobníky s PCM na Pensylvánské státní univerzitě v USA.

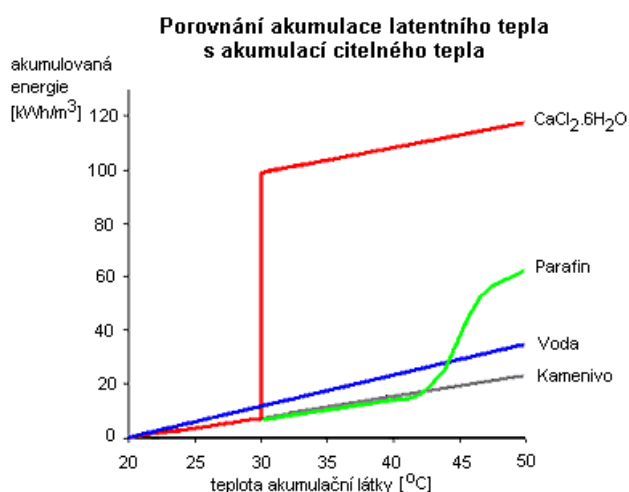
Do současnosti prošlo podrobným průzkumem jen zhruba 200 látek a dalších přibližně 20 000 látek bylo zahrnuto do odborných rešerší a čeká se na prostudování jejich vlastností a vhodného využití pro PCM technologie [1].

Byla stanovena hlavní kritéria pro volbu PCM jak z technických, tak z ekonomických hledisek. Požadavky na PCM jsou:

- vhodná výše teploty fázové změny,
- co nejvyšší hodnota skupenského tepla fázové změny,
- malá objemová změna při fázovém přechodu,
- malý sklon k vzniku přechlazení,
- vhodná krystalizační rychlost,
- dlouhodobá stabilita složení,
- jednoduchá výroba,
- nízká cena.

Nejvyužívanějšími představiteli PCM jsou parafínový vosk, polyethylenglykol, směs polyéterových polymerů, HDPE (vysokohustotní polyethylen), kyselina stearová, kyselina palmitová a její homology, dlouhořetězcové alkylové sloučeniny, hexahydrát chloridu vápenatého, směs hexahydrátů chloridu a bromidu vápenatého, kamenec hlinitoamonný a dekahydrát síranu sodného (Glauberova sůl) [1].

Akumulace skupenského tepla využívá entalpii fázové změny pracovní látky [10]. Výhodou oproti akumulaci citelného tepla je konstantní teplota a často i menší objem. Pracovní teplotu akumulátoru lze určit vhodnou volbou pracovní látky. Jistou nevýhodou je vyšší cena pracovní látky ve srovnání s akumulací citelného tepla. V praxi se ukazuje, že chemicky čisté látky se snadno znečistí, což ovlivní teplotu fázové změny, obvykle dojde k rozšíření rozsahu teplot [7]. Používají se látky, které tají při požadované teplotě. Kromě chemicky čistých látek (například hexahydrát chloridu vápenatého) se používají i směsi (například parafin), u nichž lze v závislosti na složení dosáhnout požadované teploty fázové změny. Chemicky čisté látky tají při konstantní teplotě. Naproti tomu směsi tají v širším rozsahu teplot, jak je patrné z obr. 3.1.



Obr. 3.1 Porovnání akumulace latentního (skupenského) tepla s akumulací citelného tepla

3.2.1 *Parafíny*

Alkany, alifatické uhlovodíky, které mají obecný vzorec C_nH_{2n+2} , kde n je počet atomů uhlíků v uhlovodíku, bývaly souhrnně označovány za parafíny. Alkany, které v molekule obsahují do 5 atomů uhlíku, se při standardních podmínkách vyskytují v plynném skupenství. Alkany, které v molekule obsahují 5 až 15 atomů uhlíku, se při standardních podmínkách vyskytují v kapalném skupenství a alkany, které v molekule obsahují více než 15 atomů uhlíku, se při standardních podmínkách vyskytují v pevném skupenství [6].

Nyní se pojmem *parafíny* nazývají směsi vyšších nasycených alifatických uhlovodíků, avšak běžný a známější je termín parafínový vosk, což je parafín, jehož teplota tání je v rozmezí cca od 45 do 65 °C.

Parafínové vosky bývají nejčastěji bílé krystalické látky (viz obr. 3.2), které se používají například při výrobě svíček, v kosmetickém průmyslu, při impregnaci různých materiálů a v posledních letech se staly významné také díky své relativně vysoké hodnotě měrné tepelné kapacity a měrného skupenského tepla tání. Parafínové vosky se tudíž používají jako materiály vhodné pro akumulaci skupenského tepla fázové změny.

Měrná tepelná kapacita u nich dosahuje hodnot od 2,1 do 2,9 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ a hodnota měrného skupenského tepla bývá kolem 210 kJ.kg⁻¹, což jsou v porovnání s nejčastěji používaným akumulátorem tepelné energie, vodou, velmi dobré tepelné parametry [15]. Pro PCM technologie se hojně používají směsi parafínových vosků s největším zastoupení hexadekanu (C₁₆H₃₄) [1].



Obr. 3.2 Krystaly parafínového vosku

3.2.2 *Glauberova sůl*

Název *Glauberova sůl* je triviální označení pro dekahydrát síranu sodného (Na₂SO₄ · 10 H₂O).

Jak je patrné z obr. 3.3, Glauberova sůl je bílá krystalická látka, kterou Johann Rudolf Glauber, holandský chemik, objevil v roce 1625 při zkoumání rakouských horských vod [1]. Tato sůl v posledních desetiletích našla největší uplatnění právě v PCM technologii díky

svým tepelným vlastnostem. Její teplota tání je 32,4 °C, měrná tepelná kapacita u ní dosahuje hodnoty 2,7 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ a hodnota měrného skupenského tepla je 254 kJ.kg⁻¹ [4] a [5].



Obr. 3.3 Krystaly Glauberovy soli

3.2.3 Hexahydrát chloridu vápenatého

Hexahydrát chloridu vápenatého (CaCl₂ · 6 H₂O) se také používá jako akumulátor skupenského tepla fázové změny [1]. Výzkum a použití této látky je podstatně mladší než u parafínů a Glauberovy soli, ve stavebním odvětví se tato chemikálie objevila jako PCM až v roce 2004 [16].

I v případě hexahydrátu chloridu vápenatého se jedná o bílou krystalickou látku (viz obr. 3.4), která svými tepelnými vlastnostmi splňuje požadavky na PCM. Její teplota tání je 30 °C, její měrná tepelná kapacita je 2,2 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ [4] a hodnota měrného skupenského tepla je 255,6 kJ.kg⁻¹ [5].



Obr. 3.4 Krystaly hexahydrátu chloridu vápenatého

Kromě využití jako akumulátor tepelné energie je tato látka významná také ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu.

3.3 Kompozitní stavební materiály využívané pro pasivní stabilizaci teploty

Materiál složený ze dvou či více složek s rozdílnými vlastnostmi, které dávají výslednému materiálu nové vlastnosti, jež nemá sama o sobě žádná z jeho složek, se nazývá *kompozitní materiál*. Kompozitní materiály se nejhojněji využívají ve stavebnictví a strojírenství. Nejznámějším kompozitním stavebním materiálem je železobeton, kompozit z ocelových drátů a betonu. Dalšími zástupci kompozitních stavebních materiálů jsou pórobeton nebo sádkokarton, které jsou v kombinaci s PCM využívány právě pro pasivní stabilizaci teploty [1].

Dnešním problémem nejen u novostaveb bývá otázka spotřeby tepla a úspory energie, která je potřeba pro zvyšování nebo snižování tepla uvnitř budovy. Na celkovou spotřebu tepelné energie má vliv velké množství parametrů. Hlavním parametrem je poloha budovy, dále její velikost, dispoziční řešení interiéru, počet oken a dveří v obvodové konstrukci, zdroj tepla, technologie vytápění případně chlazení, atd. Použijeme-li klimatizační jednotku nebo otopný systém, můžeme dosáhnout požadovaného tepelného komfortu, avšak nesnížíme tím energetickou náročnost budovy. Stejně tak lze v budově realizovat systém pro rekuperaci tepla (zpětné získávání tepla). Aby bylo běžné větrání otevřenými okny dostačující a hygienické, mělo by být okno otevřené asi hodinu v rámci celého dne. Avšak při takovémto větrání se ztratí až 75 % tepla. Rekuperace tepla je schopna zajistit výměnu vzduchu bez významných energetických ztrát, tudíž řeší otázku mezi potřebou čerstvého větru a ztrátou tepla, o něž přicházíme během intenzivního větrání, přesto je tento systém často kritizován, že například přispívá k výskytu plísní v budově právě z důvodu nedostatečného větrání [3].

V České republice se zhruba třetina veškeré energie spotřebovává ve formě nízkopotenciálního tepla k pokrytí tepelných ztrát budov (vytápění a větrání) a na ohřev TUV. Srovnatelná situace je i v jiných státech s obdobným klimatem. Vedle přednostního snižování tepelné propustnosti stavebních konstrukcí je akumulace tepla jednou z cest snižování energetické náročnosti budov. Akumulace tepla umožňuje přenést energii v čase z období relativního přebytku do období relativního nedostatku (tzn. den-noc respektive léto-zima). Akumulaci tepla lze využít i k chlazení staveb, v tomto případě se používá termín akumulace chladu.

Nejčastěji používané principy pro akumulaci tepla jsou:

- změna skupenství akumulační látky,
- prostý ohřev akumulační látky,
- desorpce vlhkosti z porézních látek v rozsahu hygroskopické sorpční vlhkosti,
- dehydratace krystalických chemicky čistých látek, které ve své struktuře obsahují krystalovou vodu.

K akumulaci energie můžeme využít libovolný vratný nebo cyklický proces, při němž vzrůstá vnitřní energie systému.

Materiály, které se použijí ve vodorovných i svislých konstrukcích, také významným způsobem ovlivňují spotřebu tepla. Zaměříme-li se na používané stavební materiály, zjistíme,

že i v tomto směru existuje několik možností, jak snížit energetickou náročnost budovy. Abychom dosáhli co nejlepší respektive nejnižší hodnoty součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí, můžeme při výstavbě využít tepelně akumulaci vlastnosti materiálů s příměsí PCM a do svislých respektive vodorovných konstrukcí je aplikovat.

Při změně z pevného do kapalného skupenství, kdy se teplota nemění, pohltí PCM až 200krát více tepla než stejná hmota betonu při ohřátí o 1 °C a při tuhnutí totéž teplo vydá [1]. Teplotu v interiéru lze tak s PCM stabilizovat k určité hodnotě.

Ve stavebnictví se nejvíce využívají PCM technologie při zvyšování tepelně akumulaci vlastností sádkartonových desek a tvárnic z pórobetonu nebo při aplikaci samotných PCM neprodyšně uzavřených v obalech různých velikostí, tvarů a materiálů.

Za poslední desetiletí dosáhla PCM technologie velkého rozvoje, který nadále dynamicky pokračuje.

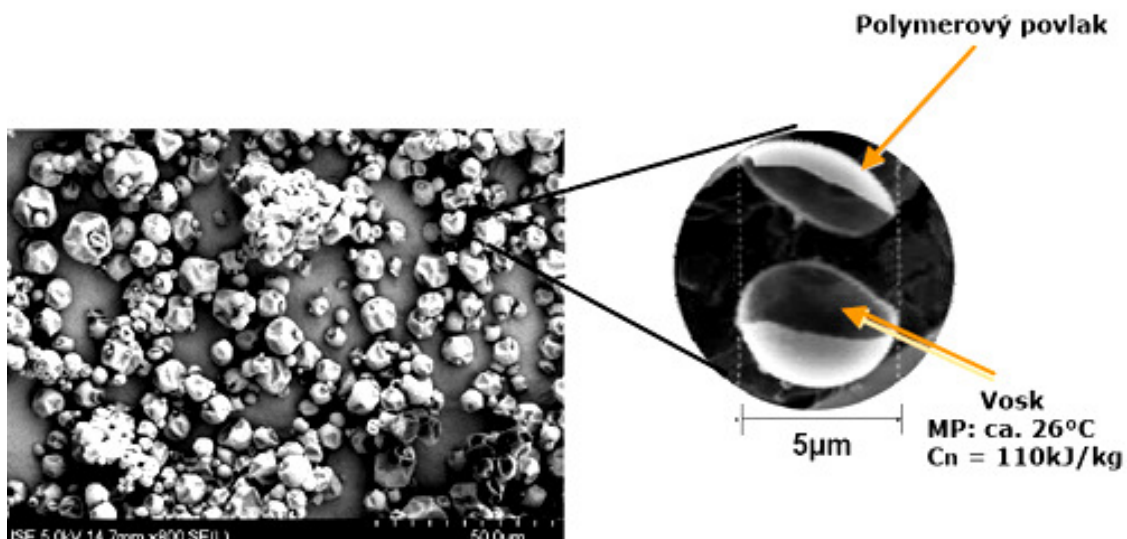
3.3.1 *Micronal PCM*

Již skoro deset let se na světovém trhu vyskytuje produkt Micronal PCM, což je parafínový vosk zapouzdřený do mikrokapslí. Vyrábí ho společnost BASF SE sídlící v německém Ludwigshafenu, která na uvedený produkt a technologický postup vlastní patent a ochrannou známku Micronal® PCM.

O vývoji Micronalu PCM společnost BASF SE uvažovala již ke konci 20. století. Na přelomu 20. a 21. století se vývojoví inženýři společnosti zabývali otázkou využití PCM do kompozitního stavebního materiálu, avšak stále jim aplikaci znemožňovala kapalné fáze PCM. Kapalná fáze difundující kompozitem je pro mechanické a konstrukční vlastnosti materiálu nežádoucí, tudíž PCM musí být zapouzdřené, aby se zabránilo difúzi kapaliny póry a kapilárami kompozitu. Tehdy bylo diskutováno, jak velké množství PCM je potřeba zapouzdřit. V případě mechanické úpravy tvaru kompozitu (řezání, vrtání) by vytečení kapalné fáze PCM způsobilo znehodnocení materiálu.

Vývojový tým společnosti BASF SE se začal zabývat otázkou využití nanotechnologických postupů při výrobě produktu Micronal PCM a takto nakonec Micronal PCM vznikl a byl uveden na světový trh.

Do pouzdra o rozměrech od 2 do 20 mikrometrů z pevného polymeru se zatavují směsi parafínového vosku s převažujícím množstvím hexadekanu (viz obr. 3.5). Podle složení směsi parafínových vosků se Micronal PCM dodává ve třech různých pracovních teplotách, teplotách fázové změny směsi, a to 21, 23 a 26 °C. Micronal PCM má hodnotu měrného skupenského tepla tání 110 kJ.kg⁻¹ [15].



Obr. 3.5 Mikrofotografie a detail mikrokapsle Micronalu PCM

Takto připravený výchozí materiál se může využít ve formě kapalné, tzn. disperze mikrokapslí Micronalu PCM ve vodě s obsahem cca 40% mikrokapslí, nebo ve formě práškové, tzn. s obsahem 100% mikrokapslí (viz obr. 3.6). S oběma formami pak lze pracovat při formulaci například interiérové omítky s tepelně akumulacími vlastnostmi, kdy se obsah Micronalu PCM pohybuje mezi 10 až 40%. Jiným příkladem použití je aplikace práškového Micronalu PCM do sádkartonových desek nebo tvárnic z pórobetonu.



Obr. 3.6 Kapalná (vlevo) a prášková (vpravo) forma Micronalu PCM

3.3.2 Omítka Maxit Clima 26

Záhy po vývoji produktu Micronal PCM společnost Maxit Deutschland se sídlem v německém Breisachu uvedla na trh produkt s označením Maxit Clima 26. Jedná se o sádkovou omítku s příměsí kapalné disperze mikrokapslí Micronal PCM.

Při použití omítky Maxit Clima 26 v interiéru budovy získáme materiál, který je v okolí teploty tání plniva mikrokapslí Micronal PCM schopen do sebe akumulovat velké množství tepelné energie a tím pasivně stabilizovat teplotu. 15 mm silná vrstva omítky je schopna do sebe akumulovat 4,5krát více tepla než standardní vnitřní omítka a v porovnání s jinými kompozitními stavebními materiály nabízí 30 mm (15 mm z každé strany vnitřní příčky) omítky Maxit Clima 26 stejné tepelné akumulační vlastnosti jako 8 cm betonu [15]. Měrné skupenské teplo omítky Maxit Clima 26 dosahuje hodnoty cca 100 kJ.kg^{-1} [1].

Aplikace omítky Maxit Clima 26 na různých površích vnitřních příček se neliší od aplikace standardních vnitřních omítek.

Hlavní referenční stavbou, ve které byla použita omítka Maxit Clima 26, je kancelářská budova Badenova v německém Offenburgu (viz obr. 3.7). Energetická bilance budovy byla navržena architekty studia Lehmann z Offenburgu a experty na solární technologie ze společnosti Stahl+Weiss z Freiburgu. Po několika letech provozu kancelářské budovy Badenova se potvrdilo, že jsou provozní náklady budovy výrazně nižší než u budov s konvenčním klimatizačním systémem [15].



Obr. 3.7 Kancelářská budova Badenova v Offenburgu

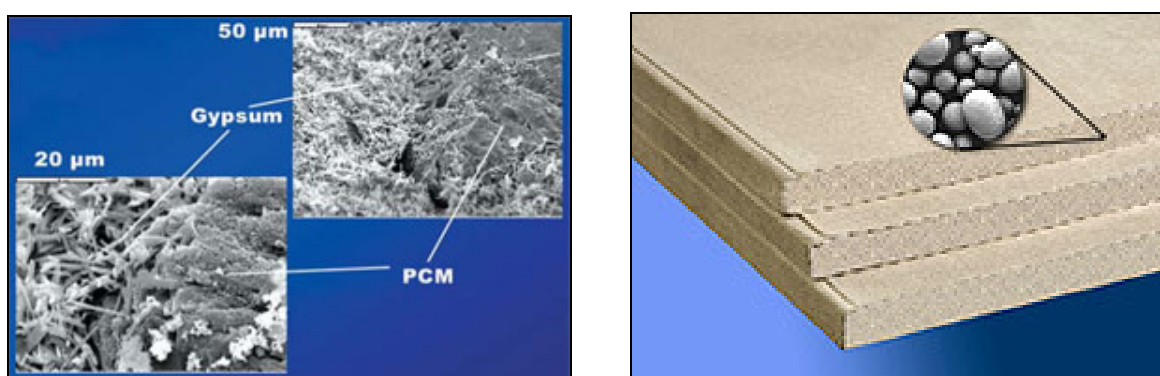
3.3.3 Sádrokartonové desky Knauf PCM Smartboard

Jestliže je do porézní struktury stavební desky impregnována látka, která taje při optimální pokojové teplotě tak, že k této fázové změně je třeba velkého množství tepla, potom získává deska novou akumulační schopnost. Teplo, které deska pohltí od okolního ohřátého vzduchu, se v desce nejprve spotřebuje ke změně skupenství impregnační látky a teprve potom k jejímu ohřátí. Akumulační schopnost desek je vysoká proto, že skupenská tepla, tedy tepla fázových změn, přidaných látek bývají o více než dva řády větší než je číselná hodnota specifické tepelné kapacity pevných stavebních materiálů [1].

Je zřejmé, že látkou s fázovým přechodem při optimální pokojové teplotě lze impregnovat jakoukoliv stavební desku, ovšem význam mají pouze desky dostatečně porézní, což je například případ sádrokartonu, který bývá až ze dvou třetin vyplněn póry a kapilárami.

Nejstarší postup byl, že se impregnační PCM roztavila a do taveniny se cca na 10 minut ponořila deska. Tímto způsobem se docílilo maximálně 30 % hmotnostního podílu složky PCM v desce. Jiný starší postup byl, že se přimíchaly granule PCM do mokré sádrové suspenze, která se pak nechala ztuhnout. Oběma uvedenými technikami však nelze docílit dobrého výsledku zejména kvůli problémům s malou tepelnou vodivostí a komplikovaným přenosem tepla [8].

Po uvedení Micronalu PCM na trh přišla společnost Knauf Insulation sídlící v německém Iphofenu s novým způsobem aplikace PCM do sádrokartonových desek. Mikro kapsle Micronal PCM se před mokrým procesem při výrobě desky dobře promísí se sádrovým prachem [1] a [15]. Takto, v podstatě náhodným uspořádáním mikrokapslí Micronal PCM, se docílí až 46 % hmotnostního podílu složky PCM v desce (viz obr. 3.8).



Obr. 3.8 Mikrofotografie (vlevo) a fotografie (vpravo) sádrokartonové desky Knauf PCM Smartboard s detailem struktury

Podle technické dokumentace výrobce má sádrokartonová deska Knauf PCM Smartboard tyto vlastnosti:

- rozměry: 2000 mm × 1250 mm × 15 mm
- hmotnost: 11,5 kg.m⁻²
- pracovní teplota (teplota fázové změny PCM): 23 nebo 26 °C
- množství Micronalu PCM: cca 3 kg.m⁻²
- entalpie fázové změny: 330 kJ.m⁻²
- měrná tepelná kapacita: 1,20 kJ.kg⁻¹.K⁻¹
- součinitel tepelné vodivosti: 0,134 W.m⁻¹.K⁻¹

Výrobce také uvádí, že 1,5 cm silná deska Knauf PCM Smartboard má stejné tepelné akumulční vlastnosti jako 9 cm silná betonová zeď nebo 12 cm silná cihlová zeď [1].

Do roku 2007 byl obchodní název desky Micronal PCM Smartboard, poté se změnil obchodní název desky na Knauf PCM Smartboard.

Hlavní referenční stavbou, ve které byly použity sádrokartonové desky Knauf PCM Smartboard, je budova gymnázia v německém městě Lauffen am Neckar (viz obr. 3.9). Na jaře roku 2005 došlo k rozšíření komplexu budov gymnázia a v nové části bylo aplikováno 500 m² desek Knauf PCM Smartboard. I zde se potvrdilo, že jsou provozní náklady budovy

výrazně nižší než u budov s klimatizačním systémem a navíc se v průběhu letních měsíců drží teplota interiéru v optimálních hodnotách od 23 do 26 °C [15].



Obr. 3.9 Budova gymnázia v Lauffen am Neckar

3.3.4 Porobetonové tvárnice CelBloc Plus

Porobeton je nejvýznamnějším druhem přímo odlehčeného betonu, silikátového kompozitu, pro který jsou charakteristické makropóry vytvořené přímo v jemnozrnné maltě. Vzhled výrobků je v podstatě dvojitý: převážně bílý, je-li plnivem jemný křemičitý písek, nebo v menší míře šedý, pokud je plnivem elektrárenský popílek [3]. Při výrobě porobetonu se v současnosti postupuje tak, že křemičité látky se velmi jemně za sucha i za mokra melou, mísí a homogenizují s páleným vápnem nebo i s cementem, případně s dalšími přísadami. Potom se surovinová směs ve speciálních míchačkách promíchá s vodou, plynotvornou látkou a obvykle i s kalem na tekutou kaši. Ta se vylije do forem, kde se směs nakypří, nejčastěji přidáním hliníkové suspenze, a potom zatuhne. Toto tuhnutí se nazývá zrání porobetonu [1].

Porobeton je stejně jako sádkokarton kompozitní stavební materiál vhodný k využití pro pasivní stabilizaci teploty, proto se vývojoví inženýři společnosti H+H, předního evropského výrobce porobetonových tvárnic, po uvedení Micronalu PCM na trh spojili s produktovými specialisty společnosti BASF SE. Společnými silami došlo k nepatrné úpravě technologického procesu výroby porobetonových tvárnic a přimíchání příměsi Micronalu PCM. V roce 2007 byl společností H+H Celcon, dceřinou společností H+H Deutschland, uveden na trh výrobek s označením CelBloc Plus. Jedná se o porobetonovou tvárnici variabilních rozměrů s příměsí Micronal PCM (viz obr. 3.10).

Porobetonové tvárnice CelBloc Plus se vyrábí ve dvou typech: CelBloc Aussen Plus (obvodové konstrukce staveb) a CelBloc Innen Plus (vnitřní příčky staveb).



Obr. 3.10 Porobetonové tvárnice CelBloc Plus

Tvárnice CelBloc Aussen Plus se dodávají v rozměrech:

- 600 mm × 365 mm × 380 mm
- 600 mm × 300 mm × 315 mm
- 600 mm × 240 mm × 255 mm

Podle technické dokumentace výrobce mají tvárnice CelBloc Aussen Plus součinitel tepelné vodivosti $0,10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [17].

Tvárnice CelBloc Innen Plus se dodávají s tloušťkou 240, 175 nebo 115 mm a mají součinitel tepelné vodivosti $0,14 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [17].

Umístění a použití tvárnic CelBloc Plus ve stavebních konstrukcích nevyžaduje žádné speciální technologické postupy. Zachází se s nimi stejně jako s obyčejnými porobetonovými tvárnicemi.

3.3.5 *Systém Delta Cool*

Kromě výše uvedeného využití je znám, a v posledních letech velmi rozšířen, způsob, kdy je PCM neprodyšně uzavřeno v obalech různých velikostí a tvarů. Většinou to jsou ploché sáčky, které bývají sdružovány do větších montážních rohoží či panelů. Mohou to být ale také kusové prvky, například kapsle, polštářky, váčky, koule nebo destičky. Rohožemi či kusovým materiálem se vyplní dutiny ve stropěch, případně stěnách a podlahách tak, aby jimi mohl cirkulovat vzduch z interiéru a zásobovat tak interiér teplem nebo chladem od PCM [1].

Ve srovnání se sádkartonovými deskami nebo tvárnicemi z porobetonu je tento způsob využití PCM univerzálnější, intenzivnější, lze nasadit prakticky libovolné množství PCM, a při dobrém návrhu budovy je účinnější, jelikož je transport chladu respektive tepla od PCM podpořen prouděním vzduchu. Nevýhodou je komplikovanější návrh stavebního řešení budovy a vyšší pracnost. Výsledky, které to může přinést, mohou být nečekaně dobré. Vlastnosti PCM pak záleží na výběru vhodného PCM, na kvalifikovaném stanovení jeho celkové hmotnosti respektive plošné hmotnosti v konstrukcích, kam jej uvažujeme umístit, aby docílený efekt teplotní stability byl optimální a v souladu s plány a přáními investora.

Jako ukázkou průmyslově vyráběného PCM určeného pro stavebnictví jsem si zvolil systém Delta Cool 24 vyráběný společností Dörken se sídlem v německém Herdecke. Společnost Dörken se rozhodla jít v oblasti PCM technologií vlastní cestou nezávislou na produktu Micronal PCM a v roce 2004 na světový trh uvedla systém Delta Cool 24 (dále jen DC24).

Teplotně stálé polštáře DC24 využívají vysoké tepelné kapacity dané sdílením skupenského tepla PCM, který je zapouzdřen injektováním PCM do pětivrstvé laminované fólie [16]. Firma Dörken také uvádí, že tento systém vyvinula hlavně pro účely pasivního chlazení. Systém účinkuje jako chladič umístěný ve stropu nebo stěnách budovy za účelem zvýšení efektu velké stavební hmoty a pomáhá tak stabilizovat vnitřní teplotu budov. Myslí se všech typů budov, domů, speciálně pak lehkých montovaných rodinných domů a ostatních staveb včetně kontejnerů a obytných buněk, velkých i malých.

Vedle vlastností, které se vztahují k obecným požadavkům na výstavbu, je důležité měrné skupenské teplo tání PCM, případně jeho hustota, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti pod a nad bodem tání.

Porovnáním hodnot měrného skupenského tepla DC24 a měrné tepelné kapacity betonu dojdeme k důležitému zjištění, že 1 m² betonové zdi o tloušťce 300 mm a hmotnosti 660 kg, která je dobře tepelně izolována z venkovní strany a která se vlivem trvalé vysoké venkovní teploty ohřeje z teploty 21 na 25 °C, pohltí celkové teplo 554,4 kJ. Stejné teplo při stejném vzrůstu teploty pohltí díky přechodu z pevné do kapalně fáze pouhých 3,38 kg DC24 o objemu 2,24 litrů. Jinými slovy, necelých 2,5 litru DC24 má v rozmezí teplot 21 až 25 °C podobný akumulační účinek jako hmota betonu o objemu 300 litrů [1] a [16].

Další příklad se týká dřevostaveb, přesněji lehkých staveb z dřevěných nosníků, tepelné izolace a tenkostěnných desek. Jestliže každý čtvereční metr obálkových stěn bude ve smyslu zmíněných úvah obohacen 3,5 kg plnivem DC24, potom v létě přesáhne vnitřní teplota této lehké stavby hodnotu 24 °C později než v případě betonové stavby s vnější tepelnou izolací, která je vzorem vysoké tepelné akumulace.

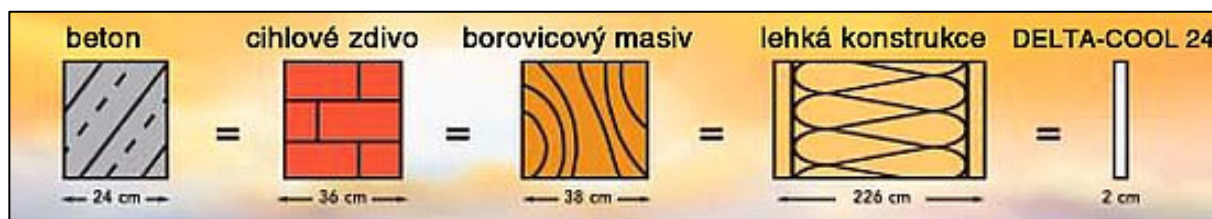
Mimo teplotu tání se DC24 z pohledu tepelně akumulačních vlastností chová podobně jako běžný stavební materiál, tzn. jeho teplota úměrně roste s dodaným teplem. Konstantou úměrnosti je tepelná kapacita pevné (respektive kapalně fáze), která je pro popisovaný PCM v DC24 2,7 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ (respektive 2,2 kJ.kg⁻¹.K⁻¹) [1].

Pro srovnání uvádím tepelnou kapacitu jiných stavebních materiálů [1] a [3]:

- beton dosahuje hodnoty 0,84 kJ.kg⁻¹.K⁻¹
- cihelný blok 0,96 kJ.kg⁻¹.K⁻¹
- polystyren 1,55 kJ.kg⁻¹.K⁻¹
- dřevo 2,51 kJ.kg⁻¹.K⁻¹

Jakmile teplota DC24 vystoupá na 24 °C, je další pohlcené teplo využito k tání PCM v DC24, nikoliv ke zvyšování teploty, a naopak při poklesu na 24 °C způsobí další uvolněné teplo tuhnutí, nikoliv klesání teploty. Teplota taveniny, v níž plavou neroztavené kusy, se drží na stejné hodnotě 24 °C tak dlouho, dokud veškerý PCM buď neroztaje nebo neztuhne. Vratný

přechod PCM v DC24 z pevné fáze na kapalnou a naopak vyžaduje výměnu velkého množství skupenského tepla s okolím, které je dáno hodnotou specifického tepla tání 158 kJ.kg^{-1} . Porovnání tepelně akumulčních schopností DC24 s ostatními materiály je zřejmé z obr. 3.11.



Obr. 3.11 Porovnání tepelně akumulčních vlastností stavebních materiálů a systému Delta Cool

Již při relativně malém množství představuje DC24 vydatný zásobník tepla a zároveň chladu, schopný stabilizovat vnitřní teplotu. Oproti stabilizaci založené na běžné tepelné akumulaci velké hmoty (například betonu), jejíž teplota a potažmo i teplota interiéru závisí na množství v ní akumulovaného tepla, je s pomocí DC24 teplota stabilizována na konstantní jmenovitou úroveň 24°C . To je nová kvalita v oblasti pasivních tepelně technických řešení staveb. Pracovní dobu, po kterou DC24 udržuje vnitřní teplotu na jmenovité úrovni, lze snadno nastavit množstvím DC24 a vhodným systémem samovolného větrání, který odvádí chlad či teplo od DC24 do interiéru. Teplotní stabilizace na úrovni 24°C může trvat i celé léto, pokud jsou nejnižší denní teploty pod touto úrovní a nejvyšší nad ní.

Systém chlazení a teplotní stabilizace DC24 je výrobcem určen zejména pro letní chlazení a stabilizaci vnitřní teploty na úrovni 24°C . Ideální je tento systém pro venkovní podmínky se střední denní teplotou 24°C , kdy noční minima klesají i hluboko pod tuto teplotu a denní maxima stoupají vysoko nad ní. Jak bylo uvedeno, dobrý návrh DC24 překlene i déle trvající tropické teploty.

Podmínkou pro dobrou funkčnost je intenzivní, nejlépe spontánní výměna tepla mezi DC24 a vnitřním prostředím. Chladivé sáčky respektive desky DC24 je vhodné umístit například nad stropní podhled s větracími mezerami.

Od roku 2009 společnost Dörken přešla na jiný způsob zapouzdření DC24 a to do plastových desek, jelikož se u původního zapouzdření stávalo, že se sáčky daly jednoduše mechanicky poškodit. Plastové desky z tvrzeného plastu odolávají podstatně většímu mechanickému namáhání než předchozí zapouzdření DC24, jsou z jedné strany žebrované, aby byla teplosměnná plocha co největší, a do každé desky o rozměrech $60 \times 60 \text{ cm}$ se umísťují 3 kg plniva PCM (viz obr. 3.12). Dříve společnost Dörken používala výhradně Glauberovu sůl jako PCM plnivo do DC24, nyní se častěji setkáváme s hexahydrátem chloridu vápenatého jako PCM plnivem v DC24 [16].



Obr. 3.12 Plastová deska Delta Cool 24

3.3.6 Systém GlassX

Do etapy reálného ověření ve skutečné a velice prestižní stavbě se dostal další typ materiálu s fázovým přechodem, tentokrát od firmy Dörken, s názvem Delta Cool 28. Tento materiál byl použit pro systém transparentní tepelné izolace s vysokým akumulacním účinkem, který vyvinul švýcarský architekt Dietrich Schwarz.

Základem systému, který byl na veletrhu BAU 2007 v německém Mnichově představen pod názvem GlassX, je víceplášťový skleněný panel připomínající okno a také fungující jako okno [9]. Součástí zasklení panelu je 2 až 4,5 cm silná vrstva Delta Cool 28, uzavřená do poměrně velkých komor průhledné desky, která připomíná robustní zvětšeninu komůrkové polykarbonátové desky. Panely jsou montovány jako přesazený fasádní plášť a při pohledu z interiéru slouží jako neotvíravá okna (viz obr. 3.13). Jejich průhlednost je zaručena v obou případech, kdy je Delta Cool 28 buď roztaven nebo ztuhlý [16].



Obr. 3.13 Detail systému GlassX

Toto řešení bylo použito na novostavbě domova důchodců ve Švýcarsku [9], které je vyobrazen na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Budova domova důchodců architekta Dietricha Schwarze

Architekt Dietrich Schwarz dostal od investora zadání, aby stavba byla energeticky úsporná. Architekt nabídl jednak klasické řešení (klasická těžká betonová stěna s tepelnou izolací 20 cm), jednak druhou možnost řešení s panely GlassX. Po propočítání obou projektů zjistil, že použitím 148 m² panelů GlassX při půdorys budovy 180 m² ušetří 10 cm tepelné izolace v ostatních částech budovy a celkové náklady budou stejné. Na základě toho se investor rozhodl pro druhé řešení. Již z prvních měření energetické náročnosti budovy se zjistilo, že budova má ještě lepší vlastnosti, než se čekalo, a že splňuje požadavek na pasivní dům [9].

3.3.7 *Další materiály využívané pro pasivní stabilizaci teploty*

Největším světovým výrobcem PCM je indická společnost PCM Energy, která se zaměřuje především na výrobu chemikálií, jenž se mohou použít jako PCM s variabilní teplotou tání v závislosti na konkrétní aplikaci. PCM Energy vyrábí PCM s teplotou tání od -50 °C do 89 °C. PCM dodává ve formě zapouzdřené i nezapouzdřené. Metody a formy zapouzdření nabízí společnost PCM Energy také velmi variabilní. PCM od společnosti PCM Energy nachází uplatnění kromě stavebnictví například také v telekomunikacích (PCM se využívá jako tepelný akumulátor obalů telekomunikačních vysílačů), dopravě (PCM je plnivem chladících boxů vozidel převážejících tepelně choulostivé potraviny, léčiva nebo chemikálie), automobilovém průmyslu (německý automobilový koncern BMW začal u vozidel značky BMW řady 5 instalovat k motoru tzv. „baterie skupenského tepla“, jejichž plnivem je PCM, které způsobují tepelnou pohodu motoru a tím zvětšují jeho výkon, zmenšují spotřebu pohonných hmot a tudíž redukuje množství emisí vozidla), elektronice, solárních a dalších technologiích. V tabulce 3.1 jsou uvedeny hlavní chemikálie, které společnost PCM Energy vyrábí pro pracovní teploty (teploty tání PCM) v okolí teploty 25 °C [1].

Tab. 3.1 Chemikálie používané pro pasivní stabilizaci teploty v okolí teploty 25 °C

Vzorec	Název	Teplota tání (°C)	Skupenské teplo (kJ.kg ⁻¹)
Anorganické látky – hydráty anorganických solí			
KF.4H ₂ O	Tetrahydrát fluoridu draselného	18,5	231
CaCl ₂ .6H ₂ O	Hexahydrát chloridu vápenatého	29,5	171
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	Dekahydrát síranu sodného	32,4	254
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	Dodekahydrát hydrogenfosforečnanu sodného	35,0	281
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	Hexahydrát dusičnanu zinečnatého	36,4	147
Organické látky			
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COO(CH ₂) ₃ CH ₃	Butylstearát	19	140
CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OH	Dodekan-1-ol	26	200
CH ₃ (CH ₂) ₁₂ OH	Methyldekan-1-ol	38	205
CH ₃ (CH ₂) _n CH ₃	Parafin	20 – 60	200
45% CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH 55% CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	Kyselina dekanová Kyselina dodekanová	21	143
CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOC ₃ H ₇	Propylpalmitát	19	186

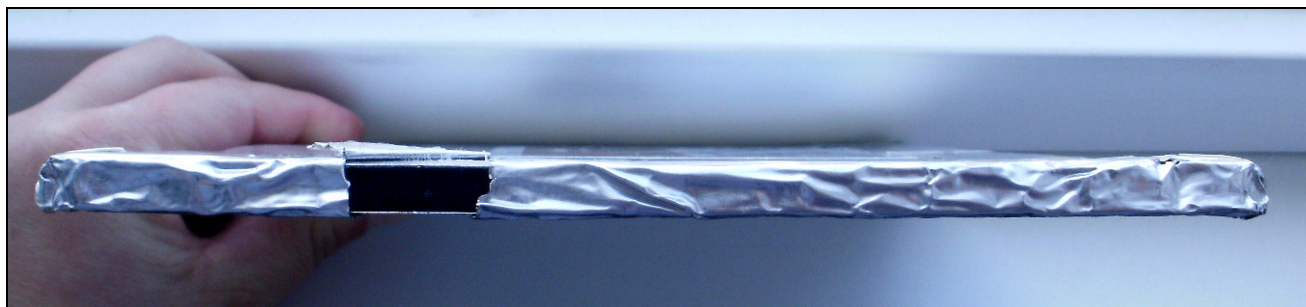
Další novinkou na světovém trhu je výrobek nadnárodního chemického koncernu DuPont s označením Energain. Podle informací od výrobce se jedná o tepelně akumulční materiál, který v lehkých konstrukcích, kterými jsou například střešní vestavby nebo dřevostavby, akumuluje tepelnou energii a tím pomáhá udržovat příjemné klima interiéru v letních měsících bez použití klimatizace.



Obr. 3.15 Vzorek desky DuPont Energain

Deska DuPont Energain (viz obr. 3.15) obsahuje cca 60 hmotnostních procent parafínového vosku, požadovaného PCM, a cca 40 hmotnostních procent polymeru, ve kterém je vosk zataven. Celá deska je po obou stranách zalaminovaná do 130 mikrometrů silné hliníkové

fólie a po stranách je ještě uzavřena 75 mikrometrů silnou hliníkovou páskou [11]. Na obrázku 3.16 je vidět boční pohled na vzorek desky DuPont Energain s částečně odstraněnou hliníkovou fólií, aby byla vidět polymerní struktura desky.



Obr. 3.16 Boční pohled na vzorek desky DuPont Energain

Podle technické dokumentace výrobce má deska DuPont Energain tyto vlastnosti:

- rozměry: 1000 mm × 1198 mm × 5,26 mm
- hmotnost: 4,5 kg.m⁻²
- pracovní teplota (teplota fázové změny PCM): 21,7 °C
- množství PCM: cca 60 %
- entalpie fázové změny: cca 70 kJ.kg⁻¹
- měrná tepelná kapacita: cca 170 kJ.kg⁻¹
- součinitel tepelné vodivosti: od 0,14 do 0,18 W.m⁻¹.K⁻¹

Provádění „termostabilizačních“ nebo „termoakumulačních“ výplní a přízdívek pomocí PCM nepožaduje a zřejmě v dohledné době ani nebude požadovat žádná norma. Záleží proto na technické osvědčenosti a finančních možnostech investora, jestli si toto řešení vybere, a invenci projektanta, jak se se zadáním vypořádá. Měli bychom však mít na paměti, že chlazení interiéru v létě spotřebovává přibližně třikrát větší příkon energie než ohřev interiéru o stejný teplotní rozdíl v zimě. Připočteme-li k tomu v létě daleko vyšší intenzitu větrání jsou příkony do chlazení ještě vyšší. Pasivní stabilizace pomocí PCM ve spojení s „větrací disciplínou“ může řešit většinu nebo dokonce všechny požadavky na chlazení interiéru. Případy, kdy chlazení PCM už nestačí, mohou být mnohem lehčeji než dříve trpěny, nebo překlenuty jednodušším aktivním chlazením s mnohem kratším provozem.

3.4 Metody měření tepelných vlastností PCM vzorků

Ve své diplomové práci se zabývám studiem tepelných vlastností materiálů obsahujících PCM. Metod a měřících zařízení, kterými se dají charakterizovat tepelné vlastnosti materiálů, existuje nepřeberné množství. U vzorků se zaměřuji na experimentální stanovení:

- měrné tepelné kapacity (J.kg⁻¹.K⁻¹),
- součinitele tepelné vodivosti (W.m⁻¹.K⁻¹),
- součinitele teplotní vodivosti (m².s⁻¹),
- teploty fázové změny PCM (°C),
- měrného skupenského tepla fázové změny PCM (kJ.kg⁻¹).

K určení všech vyjmenovaných veličin použijí tři metody měření tepelných vlastností:

- diferenční skenovací kalorimetrii,
- transientní pulsní metodu,
- pulsní metodu jehlovou sondou.

3.4.1 *Diferenční skenovací kalorimetrie*

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je jedna z metod termické analýzy. Její princip je založen na měření změny dodané respektive uvolněné tepelné energie, přestože je teplota měřeného a referenčního vzorku udržována na stejné hodnotě. Pomocí DSC se určuje zejména teplota a měrné skupenské teplo fázové změny.

Při stanovení tepelných vlastností pomocí DSC se vychází ze vztahu

$$\Delta H = KA \quad (1)$$

kde ΔH je skupenské teplo (entalpie) tání čisté látky, K je kalorimetrická konstanta závislá na teplota tání čisté látky a A je plocha pod respektive nad DSC křivkou.

Vlastní měření začíná umístěním velmi malého množství (řádově miligramy) měřeného vzorku na jednu pánvičku diferenčního skenovacího kalorimetru. Na druhou pánvičku je umístěn referenční vzorek o známé tepelné kapacitě mimo teplotní interval měření. Software příslušného diferenčního skenovacího kalorimetru požaduje navolit parametry měření, kterými jsou teplotní režim (chlazení nebo ohřev), teplotní interval, rychlost teplotního režimu (uváděná v $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$) a počet měření respektive cyklů [12]. Kromě teplotních parametrů lze navolit také atmosféru v kalorimetru v průběhu měření (v našem případě množství dusíku v $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$). Naměřené hodnoty jsou zaznamenávány v tabulkové i grafické formě. Obě formy pak podléhají analýze, jejíž závěrem je určení hodnoty teploty a skupenského tepla fázové změny vzorku.

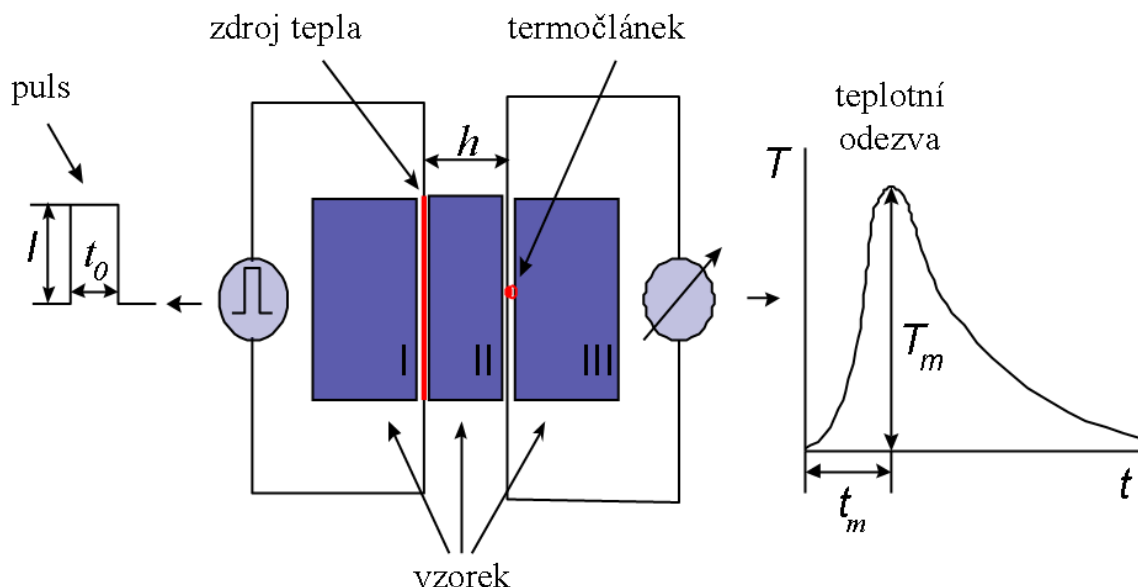
3.4.2 *Transientní pulsní metoda*

Transientní pulsní metoda měření termofyzikálních vlastností vychází z dynamického teplotního pole vzorku, které je charakterizováno časovou a teplotní odezvou na teplotní puls. Z těchto vlastností dynamického teplotního pole lze určit vybrané tepelné veličiny.

Princip měření transientní pulsní metodou nejlépe demonstruje obr. 3.17. Vzorek se skládá ze tří částí. Mezi první a druhou částí vzorku se nachází plošný zdroj tepla, který je obvykle vyroben z kovového materiálu se značným elektrickým odporem. Přechodem proudového pulsu se ve zdroji tepla uvolní tzv. Jouleovo teplo

$$Q = RI^2t_0, \quad (2)$$

kde R je elektrický odpor zdroje tepla, I je elektrický proud a t_0 je šířka pulsu. Mezi druhou a třetí částí vzorku je umístěn termočlánek, který zaznamenává teplotní reakci na tepelný puls. Z této reakce můžeme poté vypočítat teplotní vodivost, měrnou tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost.



Obr. 3.17 Princip měření transientní pulsní metodou

Závislost teploty na čase můžeme vyjádřit funkcí

$$T(t) = \frac{Q}{c\rho\sqrt{\pi at}} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right), \quad (3)$$

kde Q je dodané teplo, h je výška vzorku, a je teplotní vodivost, c je měrná tepelná kapacita a ρ je hustota vzorku.

V návaznosti na získané parametry teplotní odezvy na teplotní puls jsme schopni vypočítat součinitel teplotní vodivosti materiálu podle vztahu

$$a = h^2/2t_m, \quad (4)$$

kde h je výška vzorku a t_m je časová odezva na teplotní puls, měrnou tepelnou kapacitu materiálu podle vztahu

$$c = Q/(2\pi e)^{1/2} h \rho T_m, \quad (5)$$

kde h je výška vzorku, ρ je hustota vzorku a T_m je hodnota teplotní odezvy na teplotní puls. Součinitel tepelné vodivosti určíme podle vztahu

$$\lambda = ac\rho, \quad (6)$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti vzorku, c je měrná tepelná kapacita vzorku a ρ je hustota vzorku.

Teplotní pole vzorku se díky vlivům okolí deformuje, takže v praxi nemůžeme počítat s ideálním modelem měření. Tyto vlivy můžeme určit porovnáním ideálního modelu s reálným systémem. Odchyłky reálného systému od ideálního modelu jsou zejména tyto:

- odvod tepla z povrchu vzorku (ideální model předpokládá neohraničené těleso, reálný systém je však ohraničený a z jeho povrchu je teplo odváděno do okolí)
- reálný zdroj tepla (ideální model počítá s ideálním okamžitým zdrojem tepla, který je plošně neohraničený, má zanedbatelnou tloušťku a jeho termofyzikální vlastnosti jsou stejné jako u vzorku, což u reálného systému nelze splnit)
- reálný vzorek (ideální systém uvažuje neohraničené kontinuální prostředí, avšak v reálném uspořádání existuje hned několik rozhraní a každé rozhraní se vyznačuje tepelným odporem proti šíření tepla)
- elektrické přívody termočlánku
- neustálená teplota vzorku při měření (projevuje se při reakci termočlánku na tepelný puls)

Transientní pulsní metoda se používá zejména při studiu stárnutí materiálů, jejich strukturních změn či fázových přechodů. Měření mohou být prováděna za různých teplot, nejčastěji od 100 do 800 K a ve výjimečných případech i vyšších. Tato metoda je použitelná pro materiály různé homogenity, tzn. i pro porézní materiály. Případné chyby při měření touto metodou závisí především na vzdálenosti mezi zdrojem tepla a termočlánkem.

3.4.3 *Další aplikované metody měření tepelných vlastností PCM vzorků*

Kromě diferenční skenovací kalorimetrie a transientní pulsní metody se nabízí ještě další aplikovatelné metody jako například sledování teplotního pole termokamerou nebo různými sondami.

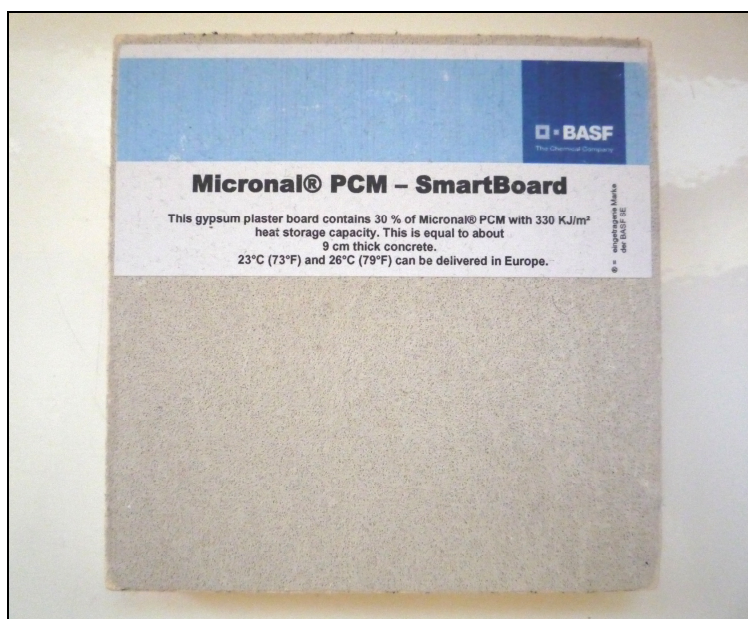
Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a teploty fázové změny jsem si vybral pulsní metodu jehlovou sondou. K tomuto měření jsem použil měřicí přístroj Isomet 2104, jehož princip činnosti popisují v kapitole 4.2.3.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Měřené materiály

První z měřených vzorků byl Micronal PCM v práškové formě. Tento materiál je používán buď samostatně v práškové formě jako akumulátor tepelné energie nebo jako součást kompozitních stavebních materiálů, ve kterých má taktéž akumulační funkci tepelné energie. Více informací včetně vlastností materiálu je uvedeno v kapitole 3.3.1. Pro měření tepelných vlastností pomocí diferenční skenovací kalorimetrie bylo použito množství o hmotnosti několika mikrogramů.

Další dva měřené vzorky byly sádrokartonové destičky Micronal PCM Smartboard (viz obr. 4.1), jejichž použití a vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 3.3.3. Pro měření tepelných vlastností bylo použito různé množství vzorku. Při měření pomocí diferenční skenovací kalorimetrie bylo použito množství o hmotnosti několika mikrogramů odebraných ze středové části vzorku. Při měření pulsní metodou pomocí jehlové sondy byla použita čtvercová destička Micronal PCM Smartboard o délce strany cca 10 cm a výšce 1,5 cm. Pulsní transientní metoda vyžaduje tzv. sendvičové umístění vzorků v přístroji, proto došlo k rozřezání druhé destičky na čtvercové vzorky o délce strany cca 5 cm a výšce 1,5 cm.



Obr. 4.1 Vzorek sádrokartonové destičky Micronal PCM Smartboard

Aby mohla být komplexně prostudována pasivní stabilizace teploty zkoumaného vzorku, byly experimentálně zjištěny také další vlastnosti ovlivňující tepelné vlastnosti kompozitních stavebních materiálů. U sádrokartonové destičky Micronal PCM Smartboard byla naměřena objemová hmotnost, distribuční křivka pórů a hustota matrice.

Všechna jmenovaná měření jsou uvedena v kapitole 4.3 této diplomové práce.

4.2 Použité měřicí přístroje

Experimenty potřebné k určení termofyzikálních vlastností vzorků byly realizovány na přístrojích:

- Diferenční skenovací kalorimetr
- Thermophysical Tester RTB
- Isomet 2104

Dalším vybavením experimentů byly analytické váhy, pyknometr, porozimetr, standardní laboratorní pomůcky a specializované software programy k jednotlivým přístrojům.

4.2.1 Diferenční skenovací kalorimetr

Princip diferenční skenovací kalorimetrie je zmíněn v kapitole 3.4.1, kde je také zjednodušeně uveden postup měření na diferenčním skenovací kalorimetru. Termofyzikální vlastnosti vzorků byly provedeny na přístroji DSC Q200 TA Instruments (viz obr. 4.2) vybaveného programem RCS 90. Pánvičky byly otevřené hliníkové a atmosféra nastavena na hodnotě 50 ml plynného dusíku za minutu. Naměřená data a grafy jsou uvedeny v kapitole 4.3.1. a 4.3.2.



Obr. 4.2 Diferenční skenovací kalorimetr

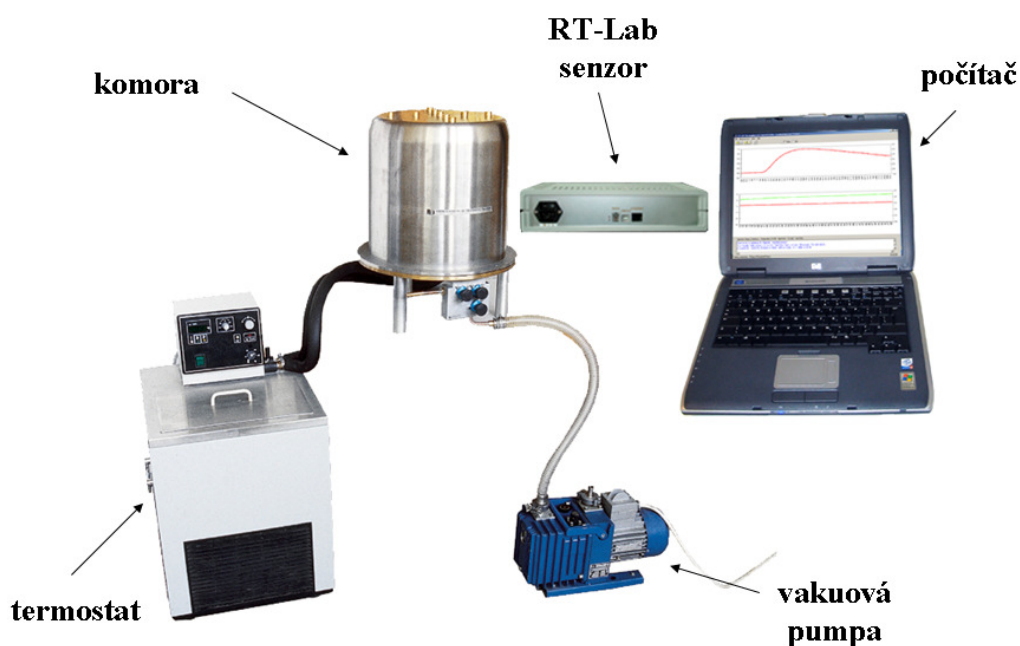
Měření na diferenčním skenovacím kalorimetru jsou nejčastěji stanovovány tyto vlastnosti:

- skupenské teplo tání (J.g^{-1} nebo kJ.kg^{-1})
- teplotní interval fázové změny ($^{\circ}\text{C}$)

U studovaných látek může být dále zjišťována jejich stabilita během opakovaných teplotních cyklů.

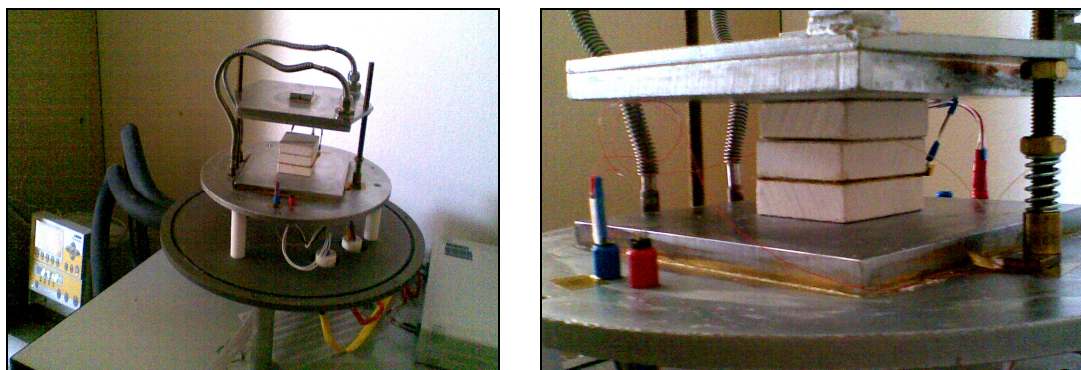
4.2.2 Thermophysical Tester RTB

Tento laboratorní přístroj, jehož schéma je patrné z obr. 4.3, je určen pro měření tepelných parametrů různých materiálů pomocí transientní pulsní metody, jejíž princip je zmíněn v kapitole 3.4.2. Přístroj je konstruován pro rozsah teplot -40 až 200 °C, přičemž se tento rozsah může měnit v závislosti na tlaku v komoře přístroje, který reguluje vakuová pumpa napojena na komoru přístroje. Komora přístroje se skládá z vakuového a izotermického krytu, který chrání vzorek před vlivem teplotního gradientu a zároveň umožňuje měření ve vakuu či v jiné atmosféře. Teplotu vzorku je možné regulovat připojením termostatu ke komoře. Pro měření teploty je přístroj napojen na RT-Lab senzor, který je propojen s počítačem [13].



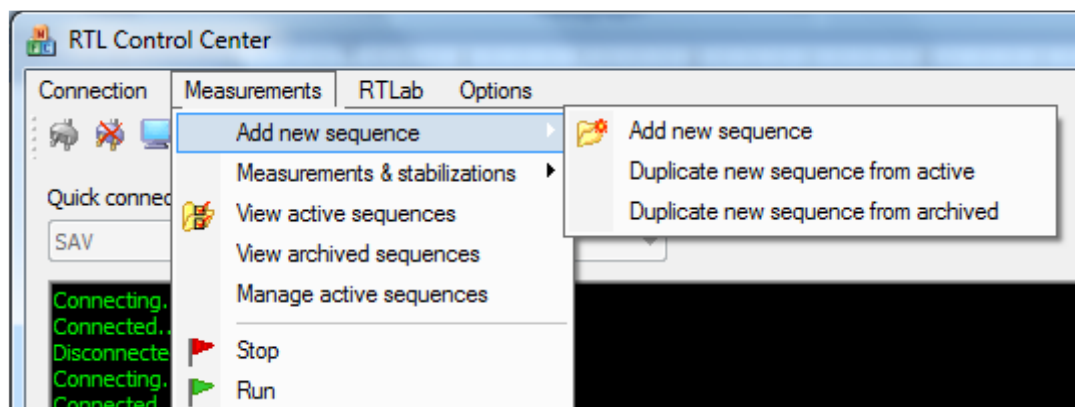
Obr. 4.3 Schéma přístroje Thermophysical Tester RTB

Je nezbytné dodržet správné umístění vzorků v komoře podle schématu uvedeného na obr. 3.17, aby bylo možné měřit transientní pulsní metodou. Umístění zkoumaných vzorků v komoře při měření na uvedeném přístroji je patrné z obr. 4.4.



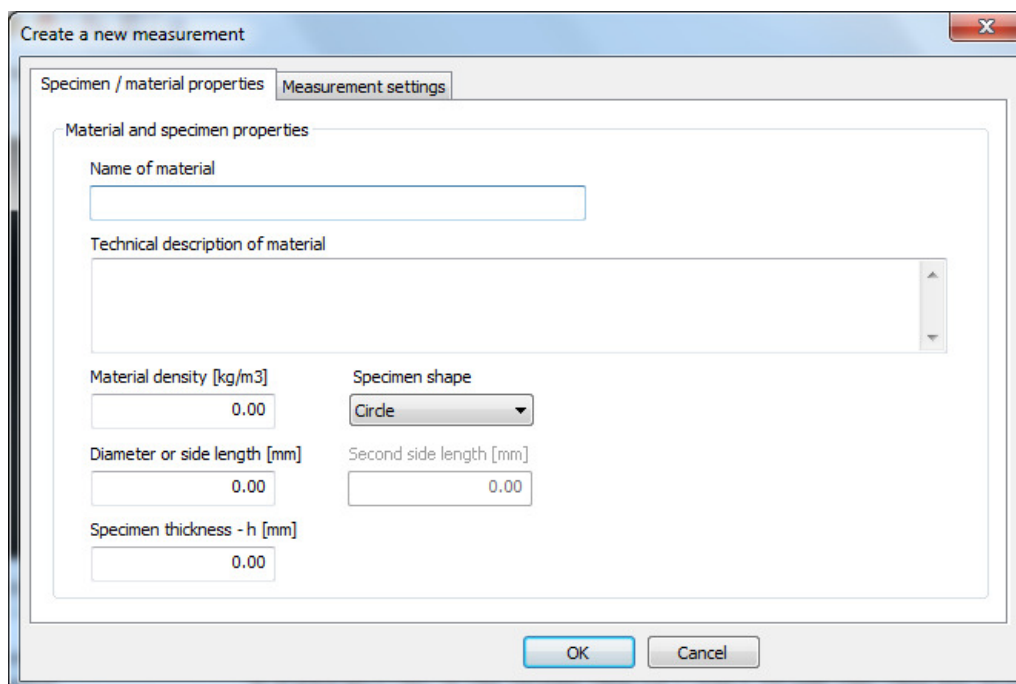
Obr. 4.4 Umístění vzorků v komoře přístroje Thermophysical Tester RTB (vpravo detail)

Po umístění vzorků do komory přístroje je potřeba nastavit parametry měření v programu RTL Control Center, který je operátorským software ovládající celou aparaturu. RTL Control Center je aplikace připomínající jiné aplikace operačního systému Windows, avšak tato umožňuje řízení senzoru RT-Lab. Vlastní měření může být rozděleno ještě na menší úseky, tzv. sekvence. Sekvence můžeme chápat jako cykly, které mohou být nadefinovány stejnými nebo různě variabilními parametry podle potřeby měření. Rozhraní aplikace RTL Control Center s ukázkou zadání sekvence je možné vidět na obr. 4.5.

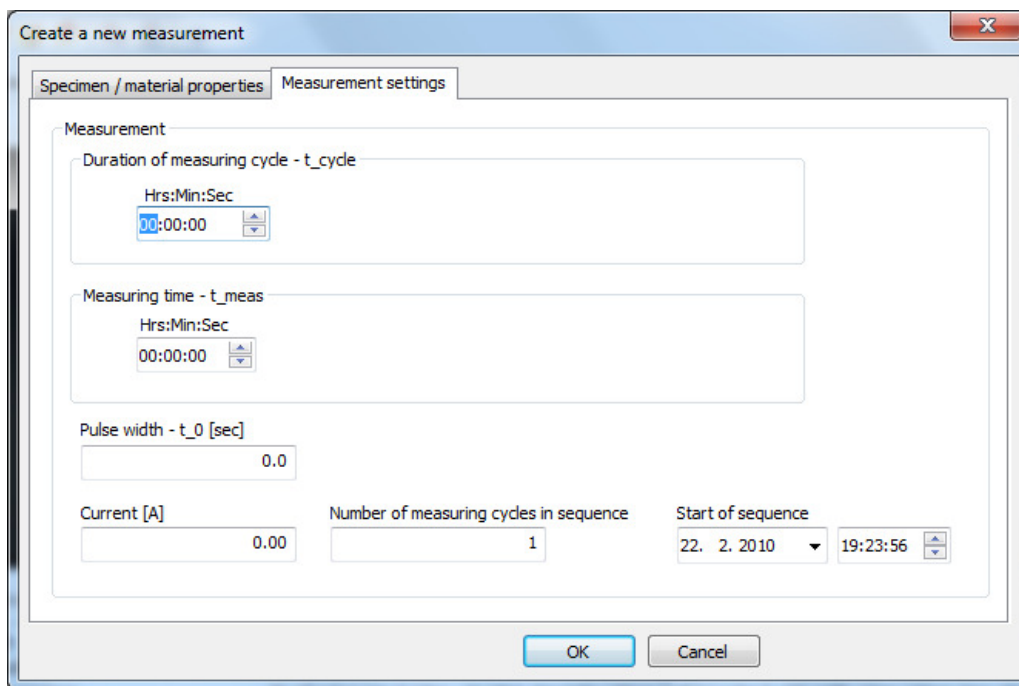


Obr. 4.5 Rozhraní aplikace RTL Control Center s ukázkou zadání nové sekvence

Nastavení, která se pro každé měření respektive sekvenci musí definovat, jsou vlastnosti měřeného materiálu a parametry měření. Pro definování vlastností měřeného materiálu (viz obr. 4.6) je potřeba znát hustotu vzorku a jeho rozměry. Jako parametry měření je potřeba zadat počet cyklů, časovou prodlevu mezi jednotlivými cykly, šířku (v sekundách) a výšku (v ampérech) pulzu a podle potřeby lze libovolně nastavit počátek měření (viz obr. 4.7).



Obr. 4.6 Zadání vlastností měřeného materiálu v aplikaci RTL Control Center



Obr. 4.7 Zadání parametrů měření v aplikaci RTL Control Center

Na základě všech zadaných parametrů je možné zahájit vlastní experiment. Po ukončení měření nebo poslední sekvence se do předem zadaného adresáře uloží veškerá naměřená data, která můžeme nejen pročit a kontrolovat, ale software je schopen transientní pulsní metodu také vyhodnotit.

Pomocí tohoto přístroje lze u měřených materiálů určit:

- pulsní tepelnou energii (J.m^{-2})
- tepelný tok (W.m^{-2})
- součinitel teplotní vodivosti ($\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$)
- měrnou tepelnou kapacitu ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- součinitel tepelné vodivosti ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

4.2.3 Přístroj Isomet 2104

Přístroj Isomet 2104 je přenosný měřicí přístroj (viz obr. 4.8) na přímé měření vybraných termofyzikálních vlastností vzorků pomocí výměnných jehlových nebo plošných sond. Aplikuje dynamickou metodu měření, která umožňuje zkrátit dobu měření na řádově desítky minut. Na čtyřřádkovém displeji je menu systému, které umožňuje uživatelům jednoduché ovládání přístroje a samozřejmě také recalibraci měřících sond pomocí referenčních materiálů.

Isomet 2104 je řízený procesorem, který umožňuje optimalizaci podmínek měřicího procesu, uložení naměřených dat a jejich přenos do počítače pro dodatečné zpracování. Výhodou Isometu 2104 je jeho přenosnost. Přístroj je možné napájet z elektrické sítě i pomocí

nabíjecích baterií, což umožňuje provádět měření také v místech, kde není možné přístroj nabíjet ze sítě.

Měření je založené na analýze teplotní odezvy zkoumaného materiálu na impulzy tepelného toku. Tepelný tok je vyvolaný elektrickým ohřevem odporového tělesa v sondě, který je v přímém tepelném kontaktu s testovaným vzorkem. Výpočet hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné objemové tepelné kapacity je založené na vyhodnocení periodicky se opakujících záznamů teploty jako funkce času respektive teplotní odezvu zkoumaného materiálu.



Obr. 4.8 Přístroj Isomet 2104

Široký rozsah aplikace přístroje Isomet umožňuje měřit různorodé materiály s velmi odlišnými mechanickými vlastnostmi. Je možné jím měřit materiály pevného skupenství v rozsahu od měkké pěny až po tvrdé krystalové struktury, dále tekutiny, suspenze, atd. Aby se dosáhla co největší přesnost měření, vyvinuly se dva typy sond, jehlové a plošné.

Jehlové sondy jsou určeny na měření pevných měkkých materiálů, kde se jehla jednoduše zapíchne do měřeného vzorku a nebo je možné u tvrdších materiálů do vzorku vyvrtat přesnou díru, aby se jehla do ní mohla natěsno zasunout. Přesnost měření se použitím jehlové sondy nesnižuje, avšak nepřesnost při vrtání děr do tvrdých materiálů může významně ovlivnit přesnost výsledku. Vyžaduje se, aby mocnost materiálu obklopujícího jehlovou sondu byla minimálně 10 až 15 mm v závislosti na tepelné vodivosti vzorku. Taktéž je nutné sondu zasunout co nejvíce do vzorku, ideálně až k rukověti sondy. Jehlové sondy se pro měření porézních materiálů kalibrují bez přípravků zvyšujících tepelný kontakt vzorku se sondou. Při měření tvrdých pevných neporézních materiálů s vyvrtanými dírami pro sondy se díry plní silikonovým olejem.

Plošné sondy se používají zejména pro měření pevných tvrdých materiálů. Měřicí plocha povrchu by měla mít průměr alespoň 60 mm. Hrubost respektive nerovnost povrchu měřicí plochy má přímý vliv na přesnost měření a její význam se zvyšuje se zvyšující se tepelnou vodivostí testovaného materiálu. Minimální mocnost měřeného materiálu by měla být v rozsahu 10 až 15 mm v závislosti na tepelné vodivosti vzorku. Plošné sondy by se mohly použít i na měření měkkých materiálů, avšak vlastnosti povrchových vrstev materiálů se

mohou výrazně lišit od vlastností vnitřních struktur stejného materiálu. Plošné sondy se kalibrují bez jakýchkoliv přípravků zvyšujících tepelný kontakt vzorku se sondou.

Pomocí přístroje Isomet 2104 lze u měřených materiálů určit:

- součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- měrnou objemovou tepelnou kapacitu ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)
- součinitel teplotní vodivosti ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
- teplotu ($^{\circ}\text{C}$)

4.3 Experimentální data

Cílem experimentální části mé práce bylo určit tepelné parametry materiálů, které se používají pro akumulaci tepla důsledkem fázové změny. Nejprve byl proměřen známý materiál o definovaných tepelných vlastnostech kvůli ověření správnosti měření. Pro tento účel byl v případě transienční pulsní metody použit porobetonový referenční vzorek, jehož tepelné vlastnosti byly známy a tudíž mohlo dojít ke kalibraci a optimalizaci přístroje. U ostatních metod došlo také ke kalibraci měření referenčními materiály, které jsou součástí vybavení jednotlivých přístrojů.

4.3.1 DSC vzorku Micronalu PCM

Tepelné vlastnosti mikrokapslí Micronal PCM byly stanoveny na DSC Q200 TA Instruments vybaveného programem RCS 90. Na otevřenou hliníkovou pánvičku bylo vloženo malé množství Micronalu PCM o známé hmotnosti (2,3 mg). Pro navažování vzorků byly použity analytické váhy umožňující odečíst hmotnost vzorku na 5 desetinných míst. Po nastavení parametrů měření v programu RCS 90 byly spuštěny 4 experimenty:

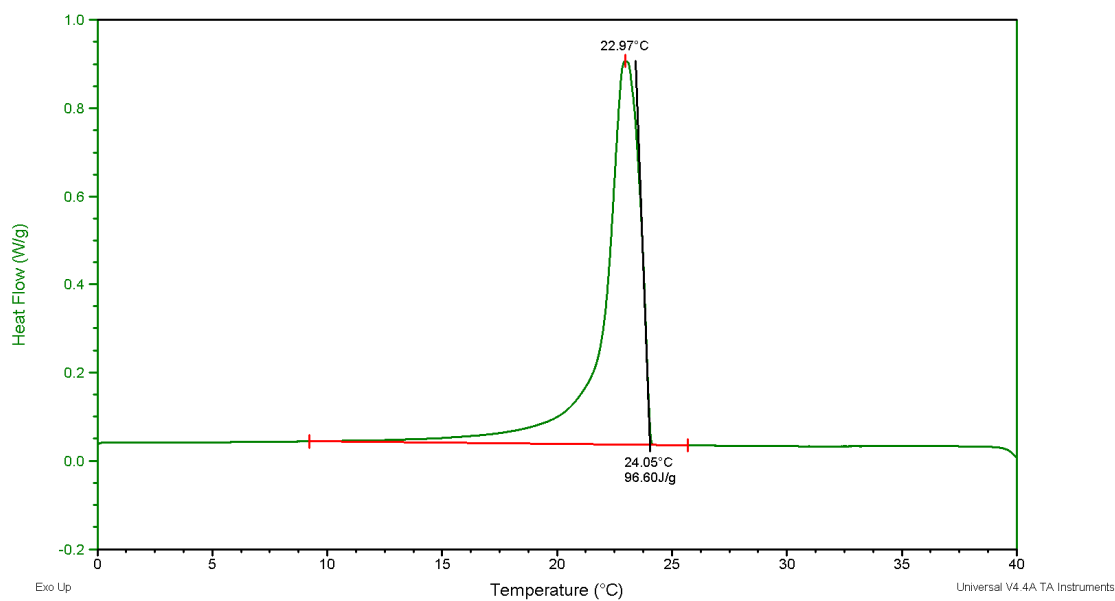
- chlazení z 40°C do 0°C s rychlostí chlazení $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (viz obr. 4.9),
- ohřev z 0°C do 40°C s rychlostí ohřevu $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (viz obr. 4.10),
- chlazení z 40°C do -10°C s rychlostí chlazení $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (viz obr. 4.11),
- ohřev z -10°C do 40°C s rychlostí ohřevu $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (viz obr. 4.12).

Při samotném měření se postupovalo následovně. Nejdříve se proměřila základní line, kdy nosič vzorku pro referenční materiál a vzorek obsahovaly prázdné hliníkové pánvičky. Následně se vzorek o známé hmotnosti zalisoval do hliníkové pánvičky a předložil do měrné cely, přičemž srovnávací cely zůstala prázdná. Měření bylo provedeno v inertní atmosféře dusíku (průtok dusíku $50\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$).

Sample: micronal Olda
Size: 2.3000 mg
Method: Ramp

DSC

Operator: JK
Run Date: 16-Dec-2009 17:02
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116

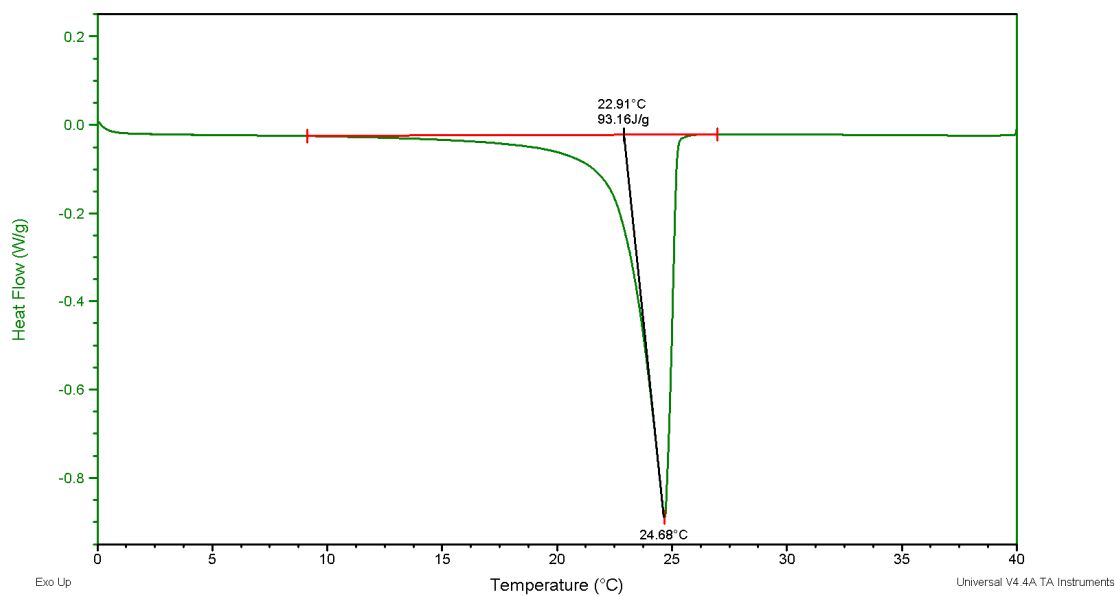


Obr. 4.9 Chlazení z 40°C do 0°C s rychlostí chlazení 1°C/min

Sample: micronal Olda
Size: 2.3000 mg
Method: Ramp

DSC

Operator: JK
Run Date: 16-Dec-2009 17:02
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116

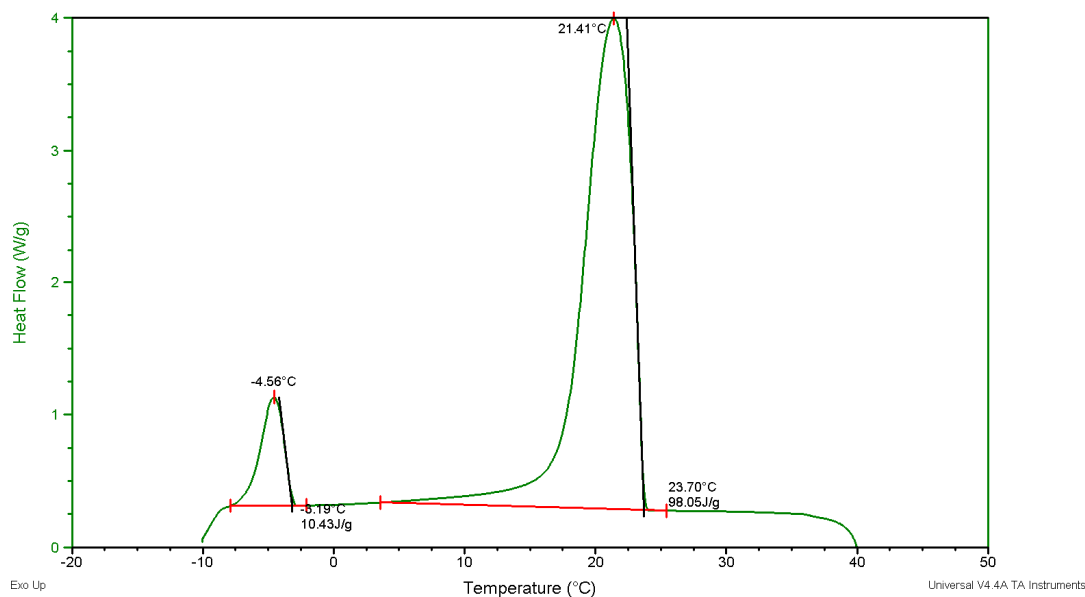


Obr. 4.10 Ohřev z 0°C do 40°C s rychlostí ohřevu 1°C/min

Sample: micronal Oolda
Size: 2.3000 mg
Method: Ramp

DSC

Operator: JK
Run Date: 16-Dec-2009 17:02
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116

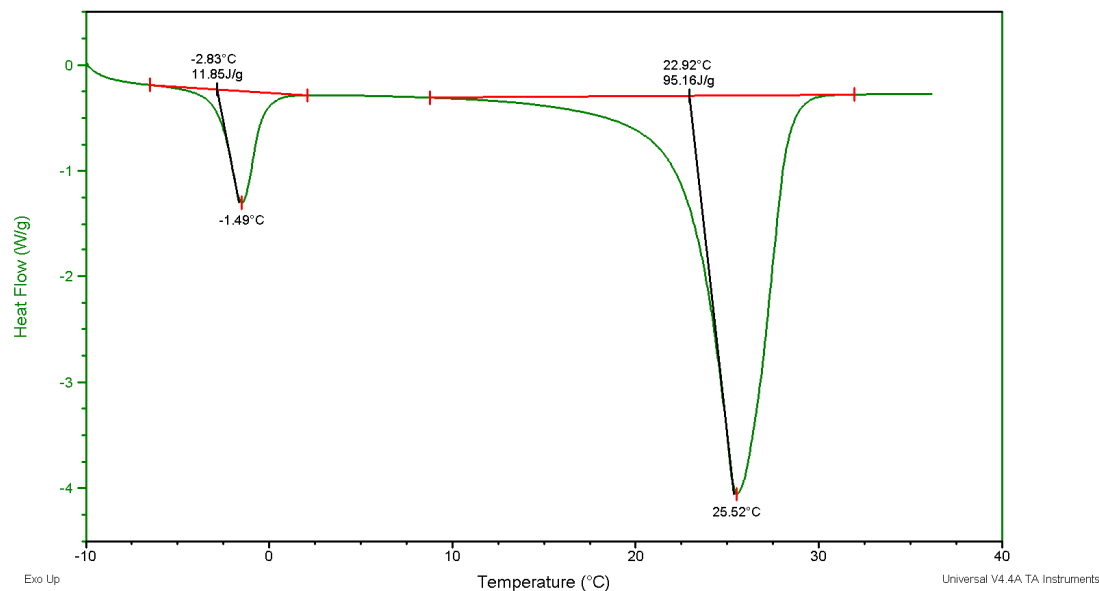


Obr. 4.11 Chlazení z 40°C do -10°C s rychlostí chlazení 10°C/min

Sample: micronal Oolda
Size: 2.3000 mg
Method: Ramp

DSC

Operator: JK
Run Date: 16-Dec-2009 17:02
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116



Obr. 4.12 Ohřev z -10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 10°C/min

Souhrn zjištěných fyzikálních vlastností je uveden v tabulce 4.1 a diskutován v kapitole 5.

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty vzorku Micronalu PCM pomocí DSC

Měření	Interval teploty tání (°C)	Skupenské teplo (kJ.kg ⁻¹)
chlazení z 40°C do 0°C s rychlostí chlazení 1°C/min	22,97 – 24,05	96,60
ohřev z 0°C do 40°C s rychlostí ohřevu 1°C/min	22,91 – 24,68	93,16
chlazení z 40°C do –10°C s rychlostí chlazení 10°C/min	21,41 – 23,7	98,05
ohřev z –10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 10°C/min	22,92 – 25,52	95,16

Na základě měření diferenční skenovací kalorimetrie vzorku Micronalu PCM je zřejmé, že vzorek obsahuje látku (směs parafínových vosků), která nemá ostrý fázový přechod, jak je patrné z grafů. Také se potvrdilo, že se při ohřevu respektive chlazení s rychlým tepelným gradientem projevují nepatrné anomálie vzorku (dochází k posunutí teploty fázové změny a ke zvýšení teploty skupenského tepla tání respektive tuhnutí).

4.3.2 DSC vzorku desky Micronal PCM Smartboard

Tepelné vlastnosti vzorku sádkartonové desky Micronal PCM Smartboard byly stanoveny na DSC Q200 TA Instruments vybaveného programem RCS 90. Na otevřenou hliníkovou pánvičku bylo vloženo malé množství Micronalu PCM o známé hmotnosti (10,81 mg). Pro navažování vzorků byly použity analytické váhy umožňující odečíst hmotnost vzorku na 5 desetinných míst. Po nastavení parametrů měření v programu RCS 90 byly spuštěny 4 experimenty:

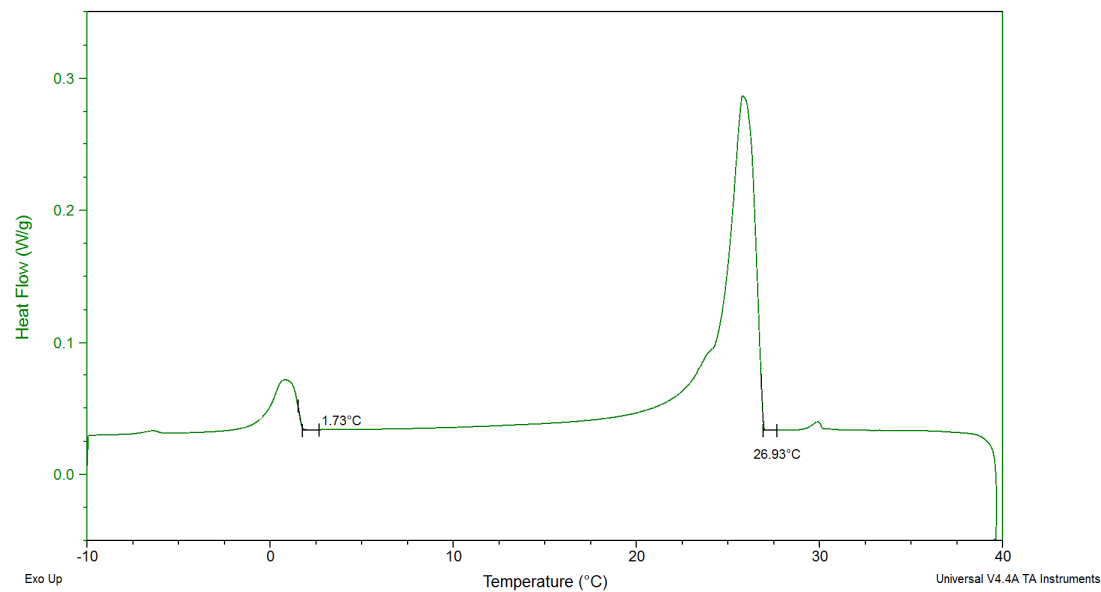
- chlazení z 40°C do –10°C s rychlostí chlazení 1°C/min (viz obr. 4.13),
- ohřev z –10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 1°C/min (viz obr. 4.14)
- chlazení z 40°C do –10°C s rychlostí chlazení 10°C/min (viz obr. 4.15)
- ohřev z –10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 10°C/min (viz obr. 4.16)

Při samotném měření se postupovalo následovně. Nejdříve se proměřila základní line, kdy nosič vzorku pro referenční materiál a vzorek obsahovaly prázdné hliníkové pánvičky. Následně se vzorek o známé hmotnosti zalisoval do hliníkové pánvičky a předložil do měrné cely, přičemž srovnávací cela zůstala prázdná. Měření bylo provedeno v inertní atmosféře dusíku (průtok dusíku 50 ml.min⁻¹).

Sample: olda sadros
Size: 10.8100 mg
Method: olda
Comment: olda sadros

DSC

File: P:\...kucerik\Olda\olda sadros.001
Operator: JK
Run Date: 03-Mar-2010 10:05
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116

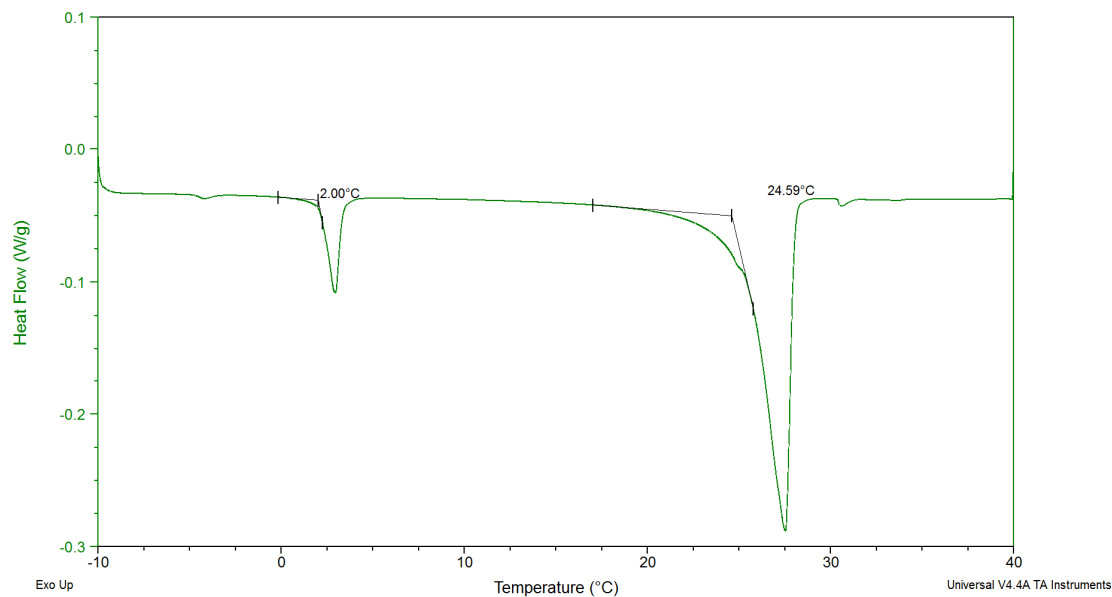


Obr. 4.13 Chlazení z 40°C do -10°C s rychlostí chlazení 1°C/min

Sample: olda sadros
Size: 10.8100 mg
Method: olda
Comment: olda sadros

DSC

File: P:\...kucerik\Olda\olda sadros.001
Operator: JK
Run Date: 03-Mar-2010 10:05
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116

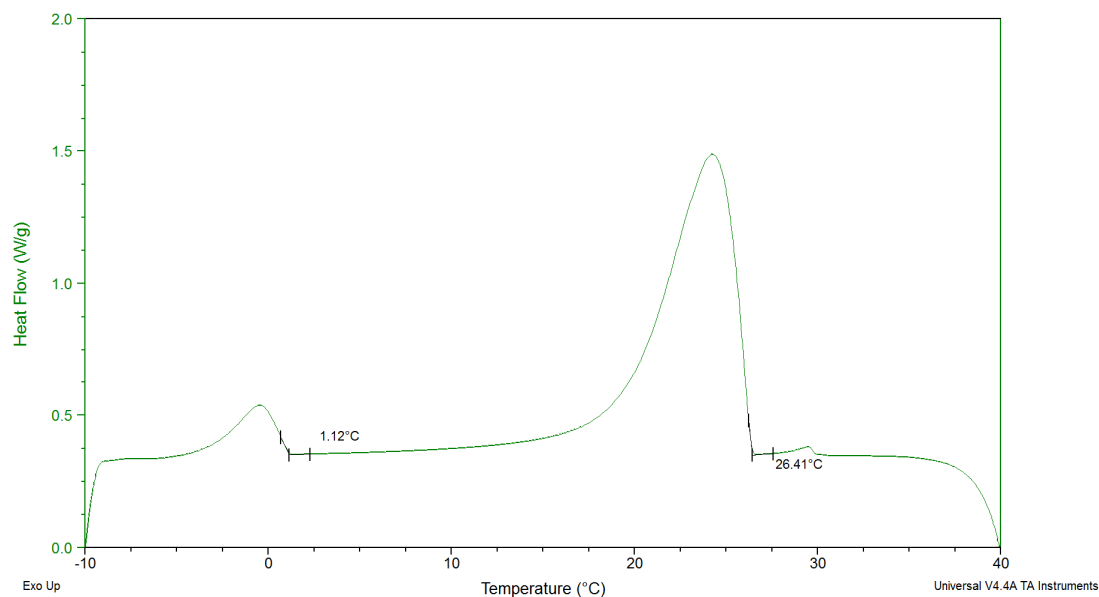


Obr. 4.14 Ohřev z -10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 1°C/min

Sample: olda sadros
Size: 10.8100 mg
Method: olda
Comment: olda sadros

DSC

File: P:\...\kucerik\Olda\olda sadros.001
Operator: JK
Run Date: 03-Mar-2010 10:05
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116

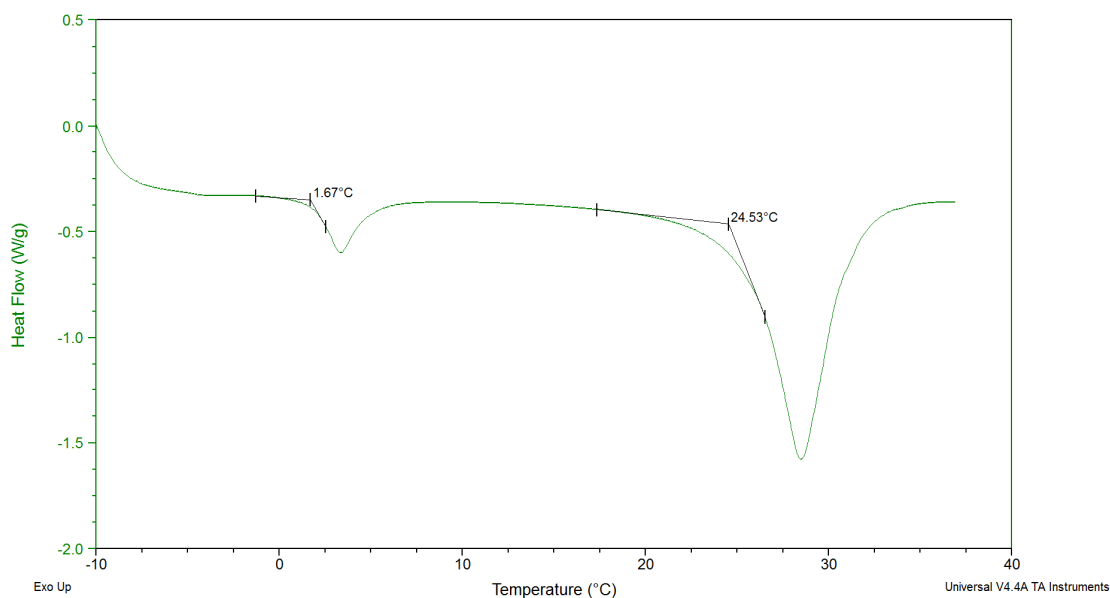


Obr. 4.15 Chlazení z 40°C do -10°C s rychlostí chlazení 10°C/min

Sample: olda sadros
Size: 10.8100 mg
Method: olda
Comment: olda sadros

DSC

File: P:\...\kucerik\Olda\olda sadros.001
Operator: JK
Run Date: 03-Mar-2010 10:05
Instrument: DSC Q200 V24.4 Build 116



Obr. 4.16 Ohřev z -10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 10°C/min

Souhrn zjištěných fyzikálních vlastností je uveden v tabulce 4.2 a diskutován v kapitole 5.

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard pomocí DSC

Měření	Počáteční teplota fázové změny (°C)	Skupenské teplo (kJ.kg ⁻¹)
chlazení z 40°C do -10°C s rychlostí chlazení 1°C/min	26,93	33,25
ohřev z -10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 1°C/min	24,59	33,78
chlazení z 40°C do -10°C s rychlostí chlazení 10°C/min	26,41	33,21
ohřev z -10°C do 40°C s rychlostí ohřevu 10°C/min	24,53	33,89

Na základě měření diferenční skenovací kalorimetrie vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard je zřejmé, že při ohřevu vzorku dochází k prvním projevům fázové změny (tání) PCM již v okolí teploty 24,59 respektive 24,53°C a při chlazení vzorku dochází k prvním projevům fázové změny (tuhnutí) PCM v okolí teploty 26,93 respektive 26,41°C. V návaznosti na neostrý fázový přechod, který nastává v teplotním intervalu od 24,59 do 26,93°C při pomalém ohřevu respektive chlazení (1°C za minutu) nebo v teplotním intervalu od 24,53 do 26,41°C při rychlém ohřevu respektive chlazení (10°C za minutu), se potvrzuje, že PCM ve vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard je směs parafinových vosků. U experimentálně zjištěných hodnot skupenského tepla tání respektive tuhnutí došlo jen k malým odchylkám, jak demonstruje tabulka 4.2.

4.3.3 Transientní pulsní metoda vzorku desky Micronal PCM Smartboard

Tepelné vlastnosti vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard byly stanoveny na přístroji Thermophysical Tester RTB vybaveného programem RTL Control Center. Do komory přístroje byly umístěny 3 totožné vzorky, čtvercové destičky Micronal PCM Smartboard o délce strany 5 cm a výšce 1,5 cm každé destičky. Mezi spodní a prostřední vzorek byl umístěn zdroj tepla a mezi prostřední a vrchní vzorek byl doprostřed destičky umístěn termočlánek tak, aby byl zcela respektován princip měření transientní pulsní metodou a nedošlo k chybám měření. Komora poté byla uzavřena a pomocnými šrouby zajištěna. Byly nastaveny parametry jednotlivých experimentů v programu RTL Control Center a měření bylo spouštěno. Experimenty probíhaly při nastavení teplot 20, 21, 22, 23, 24 a 25 °C na termostatu. Každý experiment obsahoval až 10 sekvencí, aby byly získány nejpřesnější hodnoty měřených tepelných vlastností vzorku. Naměřené hodnoty jednotlivých experimentů jsou uvedeny v tabulce 4.3 a diskutovány v kapitole 5.

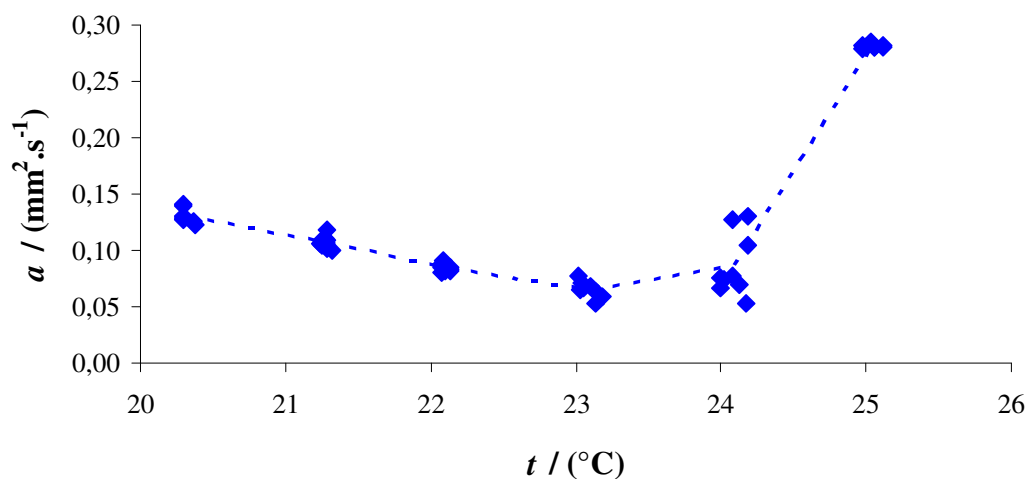
Tab. 4.3 Naměřené hodnoty vzorku pomocí transientní pulsní metody

Měření – Sekvence	Teplota měření (°C)	Součinitel teplotní vodivosti ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
1 – 1	20,38	0,1232	2979	0,3031
1 – 2	20,31	0,1295	2888	0,3089
1 – 3	20,29	0,1288	2873	0,3056
1 – 4	20,30	0,1392	2883	0,3315
1 – 5	20,36	0,1251	2969	0,3068
1 – 6	20,30	0,1278	2862	0,3022
1 – 7	20,29	0,1311	2876	0,3113
1 – 8	20,30	0,1413	2914	0,3400
2 – 1	21,32	0,0993	3824	0,3138
2 – 2	21,27	0,1100	3601	0,3272
2 – 3	21,25	0,1046	3645	0,3148
2 – 4	21,25	0,1071	3677	0,3254
2 – 5	21,29	0,1015	3859	0,3237
2 – 6	21,28	0,1187	3868	0,3794
2 – 7	21,28	0,1086	3748	0,3361
2 – 8	21,25	0,1090	3621	0,3259
2 – 9	21,24	0,1057	3625	0,3165
3 – 1	22,08	0,0857	4600	0,3258
3 – 2	22,10	0,0824	4939	0,3363
3 – 3	22,13	0,0825	5022	0,3423
3 – 4	22,13	0,0852	4919	0,3460
3 – 5	22,09	0,0910	4857	0,3653
3 – 6	22,07	0,0842	4906	0,3414
3 – 7	22,07	0,0885	4754	0,3477
3 – 8	22,07	0,0808	4739	0,3163
3 – 9	22,11	0,0860	4843	0,3441
3 – 10	22,13	0,0838	4794	0,3318
4 – 1	23,03	0,0652	6322	0,3402
4 – 2	23,04	0,0712	6849	0,4025
4 – 3	23,15	0,0615	6397	0,3251
4 – 4	23,18	0,0590	6403	0,3122
4 – 5	23,13	0,0536	6191	0,2739
4 – 6	23,02	0,0776	6497	0,4164
4 – 7	23,05	0,0659	6502	0,3540
4 – 8	23,10	0,0679	6177	0,3465
4 – 9	23,13	0,0641	6406	0,3394
5 – 1	24,17	0,0525	8626	0,3737
5 – 2	24,08	0,0780	8656	0,5575
5 – 3	24,00	0,0763	9176	0,5783

5 – 4	24,00	0,0665	8905	0,4892
5 – 5	24,02	0,0749	9274	0,5740
5 – 6	24,12	0,0697	8555	0,4929
5 – 7	24,19	0,1039	8639	0,7411
5 – 8	24,19	0,1308	7834	0,8461
5 – 9	24,08	0,1276	8478	0,8936
6 – 1	25,12	0,2801	1378	0,3188
6 – 2	25,03	0,2851	1371	0,3228
6 – 3	24,98	0,2819	1375	0,3200
6 – 4	24,97	0,2794	1379	0,3183
6 – 5	25,00	0,2801	1378	0,3188
6 – 6	25,06	0,2806	1384	0,3208
6 – 7	25,12	0,2814	1376	0,3199
6 – 8	25,06	0,2805	1373	0,3182
6 – 9	25,02	0,2836	1381	0,3235

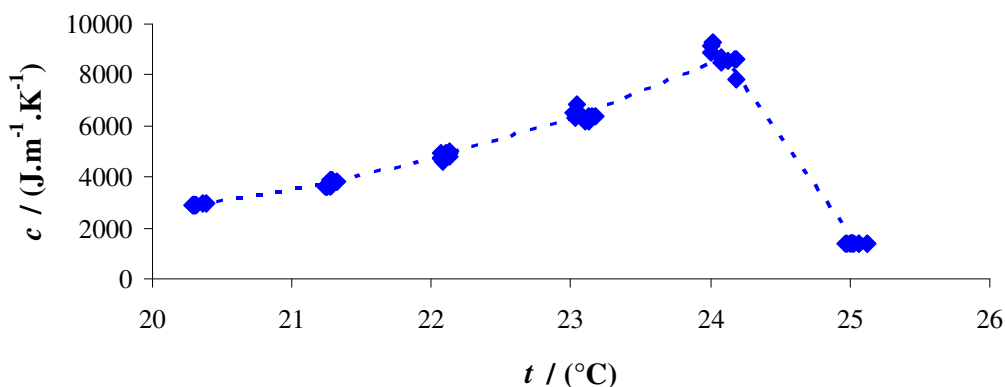
Jak je patrné z tabulky 4.3, tepelné vlastnosti vzorku vykazují závislost na teplotě. Grafickou závislost součinitele teplotní vodivosti vzorku na teplotě popisuje obr. 4.17, závislost měrné tepelné kapacity vzorku popisuje obr. 4.18 a závislost součinitele tepelné vodivosti vzorku popisuje obr. 4.19. Výsledky měření jsou diskutovány v kapitole 5.

Součinitel teplotní vodivosti



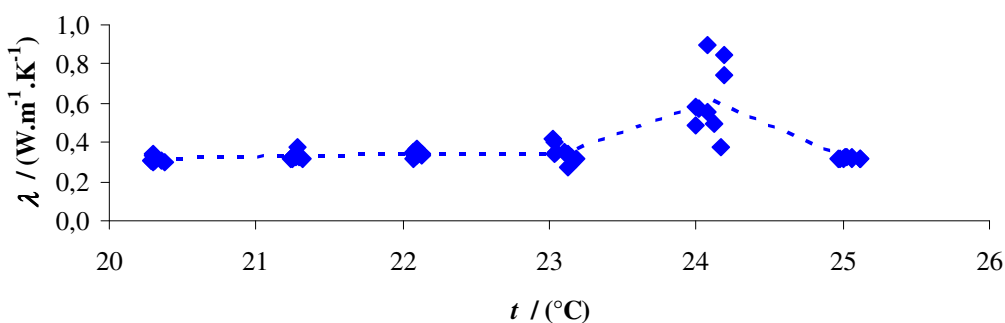
Obr 4.17 Závislost součinitele teplotní vodivosti vzorku na teplotě

Měrná tepelná kapacita



Obr. 4.18 Závislost měrné tepelné kapacity vzorku na teplotě

Součinitel tepelné vodivosti



Obr. 4.19 Závislost součinitele tepelné vodivosti vzorku na teplotě

4.3.4 Pulsní metoda jehlovou sondou vzorku desky Micronal PCM Smartboard

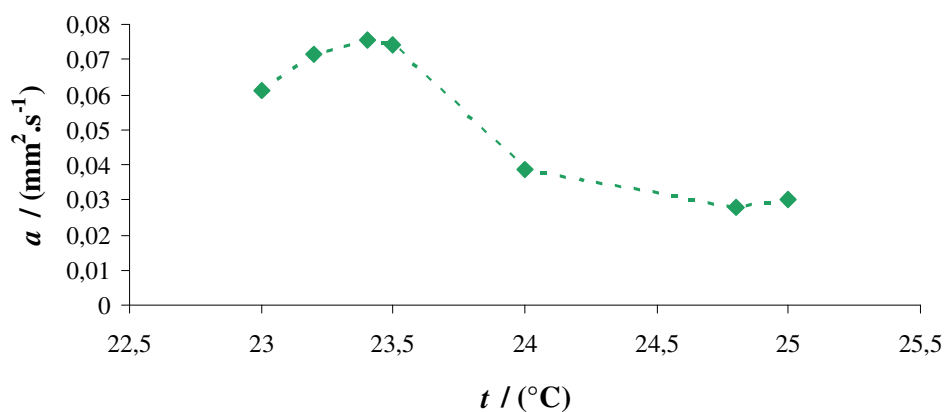
Tepelné vlastnosti vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard byly stanoveny na přístroji Isomet 2104. Do sádrokartonové čtvercové destičky Micronal PCM Smartboard o délce strany cca 10 cm a výšce 1,5 cm byl ze strany menší stěny destičky udělán vrt s průměrem cca 1 mm, tak aby se do něj natěsno dala vsunout jehlová sonda. Sonda byla do vzorku zasunuta až k rukověti a po nastavení parametrů na displeji přístroje byly zahájeny jednotlivé experimenty. Experimenty probíhaly při nastavení různých teplot v okolí předpokládané fázové změny PCM. Všechny experimenty proběhly při relativní vlhkosti 35%. Naměřené hodnoty jednotlivých experimentů jsou uvedeny v tabulce 4.4 a diskutovány v kapitole 5.

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty vzorku pomocí pulsní metody jehlovou sondou

Měření	Teplota měření (°C)	Součinitel teplotní vodivosti ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Měrná tepelná kapacita ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)	Součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
1	23,0	0,0609	1,000	0,610
2	23,2	0,0716	1,010	0,722
3	23,4	0,0755	0,996	0,752
4	23,5	0,0742	1,020	0,754
5	24,0	0,0385	0,985	0,379
6	24,8	0,0278	0,926	0,257
7	25,0	0,0301	0,799	0,241

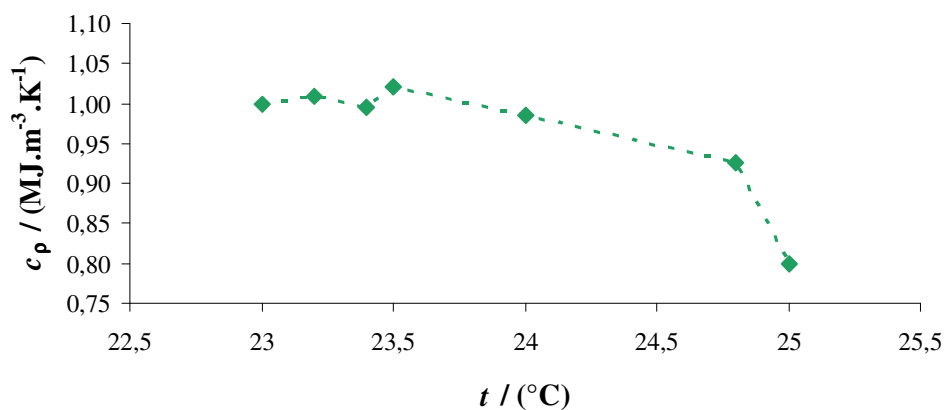
Jak je patrné z tabulky, tepelné vlastnosti vzorku vykazují závislost na teplotě. Grafickou závislost součinitele teplotní vodivosti na teplotě popisuje obr. 4.20, závislost měrné objemové tepelné kapacity obr. 4.21 a závislost součinitele tepelné vodivosti obr. 4.22.

Součinitel teplotní vodivosti



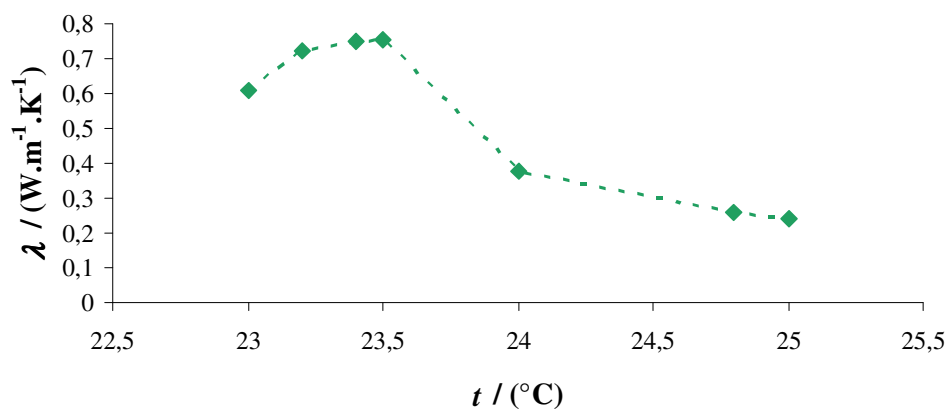
Obr. 4.20 Závislost součinitele teplotní vodivosti vzorku na teplotě

Měrná objemová tepelná kapacita



Obr. 4.21 Závislost měrné objemové tepelné kapacity vzorku na teplotě

Součinitel tepelné vodivosti



Obr. 4.22 Závislost součinitele tepelné vodivosti vzorku na teplotě

4.3.5 Další měření vzorků desky Micronal PCM Smartboard

Pro studium pasivní stabilizace teploty zkoumaného vzorku byly experimentálně zjištěny také další vlastnosti ovlivňující tepelné vlastnosti kompozitních stavebních materiálů. U sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard byla naměřena objemová hmotnost, distribuční křivka pórů a hustota matrice.

Měření objemové hmotnosti bylo provedeno na sádrokartonové destičce Micronal PCM Smartboard o rozměrech 100,97 mm × 100,50 mm × 14,87 mm. Tato destička vážila 125,3 g. Objemová hustota sádrokartonové desky byla vypočítána na hodnotu 830,39 kg.m⁻³.

Distribuční křivka pórů byla stanovena pomocí rtuťové porozimetrie (MIP) na přístrojích Pascal 140 a 440 (viz obr. 4.23).



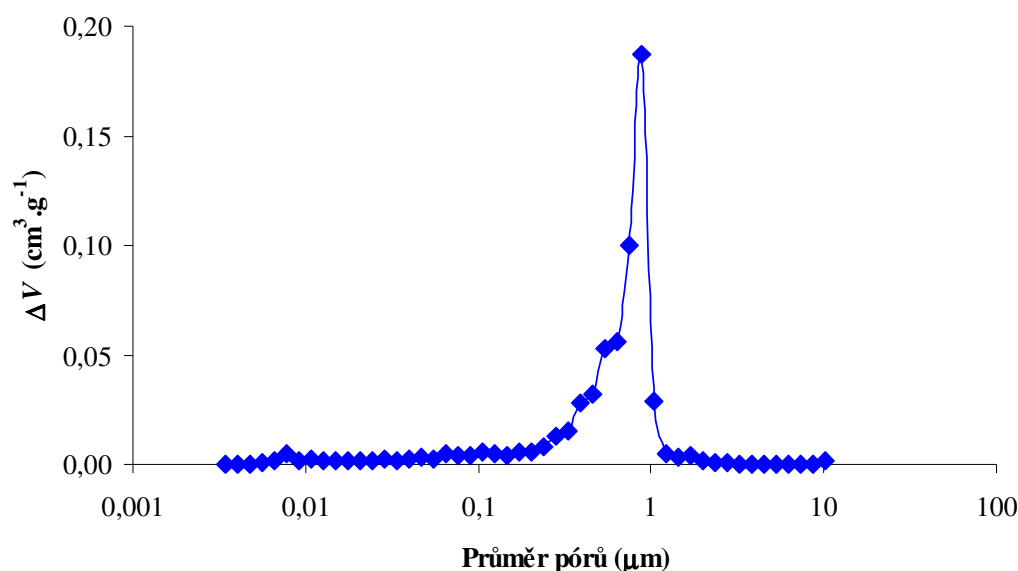
Obr. 4.23 Přístroje Pascal 140 (vlevo) a Pascal 440 (vpravo)

Metoda MIP je založena na existenci vysokého povrchového napětí rtuti, která většinu porézních látek nesmáčí, tzn. úhel smáčení je vyšší než 90° . V důsledku toho tlak potřebný pro vtlačení rtuti do pórů závisí na jejich poloměru a to tak, že čím je pór užší, tím je potřebný tlak vyšší. Jádrem rtuťových porozimetrů je dilatometr, obsahující vzorek zkoumané porézní látky, který se za vakua naplní rtutí. Dilatometr se umístí do autoklávu, který je zcela zaplněn olejem nebo alkoholem. V autoklávu se postupně zvyšuje tlak, což způsobuje pronikání rtuti do pórů. Objem rtuti vtačené do pórů při určitém tlaku se určuje z poklesu menisku rtuti v kalibrované kapiláře dilatometru. Tlak se postupně zvyšuje a pokles menisku se registruje. Z těchto údajů lze sestavit závislost objemu pórů s poloměry většími než odpovídá okamžitému tlaku. Tato závislost bývá označována jako kumulativní distribuce pórů, nebo jako integrální distribuce. Záporně vzatá derivace této závislosti je frekvenční křivkou rozdělení objemu pórů podle poloměru, nebo-li distribuční křivkou pórů.

Distribuční křivka pórů názorně ukazuje, které póry přispívají k celkovému objemu pórů nejvíce. Měření vzorku znázorněné na obr. 4.24 odpovídá tzv. monodisperzní porézní struktuře (jediné maximum na distribuční křivce pórů).

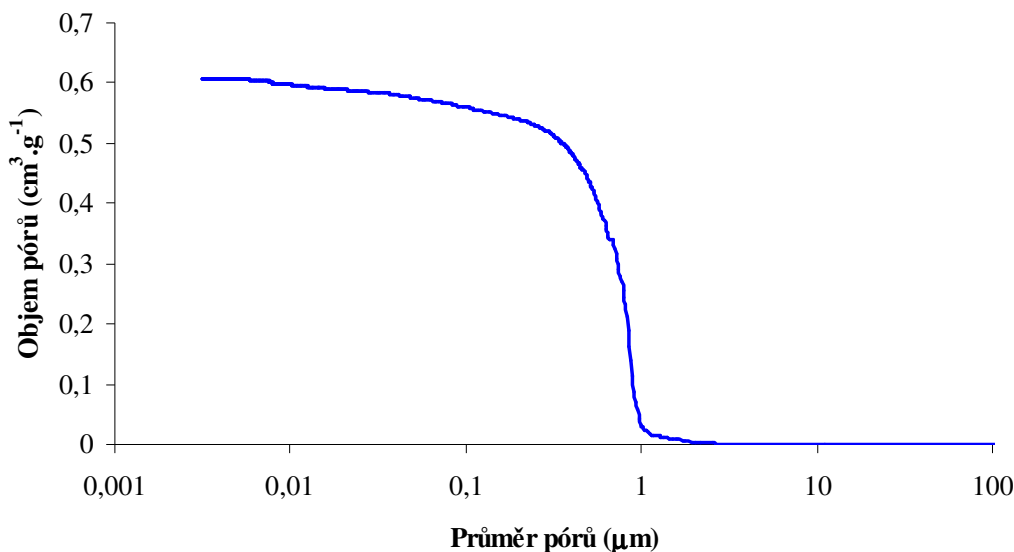
Při vyhodnocení měření byl uvažován kontaktní úhel rtuti a vzorku 130° , povrchové napětí rtuti 480 mN.m^{-1} a hustota rtuti $13,534 \text{ g.cm}^{-3}$. Vzorky byly nejprve vysušeny a podrceny. Měření bylo prováděno na úlomcích o celkové hmotnosti vzorku cca 1 gram. Metoda MIP v použitém experimentálním uspořádání detekuje póry o průměru 3 nm až $100 \text{ }\mu\text{m}$. Zjištěná distribuční křivka pórů je uvedena na obr. 4.24. Závislost objemu pórů na průměru póru je patrná na obr. 4.25.

Distribuční křivka pórů



Obr. 4.24 Distribuční křivka pórů vzorku

Objem pórů v závislosti na průměru pórů



Obr. 4.25 Závislosti objemu pórů na průměru pórů vzorku

Kromě pórovitosti byla u vzorku desky Micronal PCM Smartboard ještě určena hustota matrice. Pro toto měření byl použit vzorek destičky o rozměrech 50 mm × 50 mm × 15 mm a heliový pyknometr Pycnomatic ATC. Metoda měření hustoty matrice pomocí heliového pyknometru je založena na pronikání atomů hélia, které můžeme považovat za inertní částice velmi malých rozměrů, do pórů pevného materiálu. Přesnost této metody je velmi velká, pro heliový pyknometr se uvádí odchylka $\pm 0.01\%$ z naměřených hodnot. Hustota matrice vzorku (včetně síťoviny na jeho povrchu) naměřena heliovým pyknometrem je $3\,690,060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Ač distribuční křivka pórů a hustota matrice nepatří mezi termofyzikální veličiny, přesto tepelné vlastnosti materiálů významně ovlivňují. Díky vysoké pórovitosti dochází k vyššímu prostupu tepla materiálem, čímž se může teplo velmi dobře dostat k mikrokapslím s PCM, které se nachází v pórech nebo jejich blízkosti. Stejně tak, když probíhá fázová změna z kapalného na pevné skupenství, je potřeba, aby uvolňované skupenské teplo dobře difundovalo do okolí. Vzorek sádrokartonové desky Knauf PCM Smartboard má hodnotu hustoty matrice cca $3\,690 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, což je v porovnání se standardními kompozitními stavebními materiály vysoká hodnota. Beton a cihly mají hustotu matrice v okolí hodnoty $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

5. VÝSLEDKY A DISKUSE

Z provedených měření byly zjištěny následující veličiny a jejich hodnoty:

Skupenské teplo tání

- u vzorku Micronal PCM byla pomocí DSC naměřena hodnota v intervalu od 93,16 do 98,05 kJ.kg⁻¹,
- u vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard byla pomocí DSC naměřena hodnota v intervalu od 33,21 do 33,89 kJ.kg⁻¹.

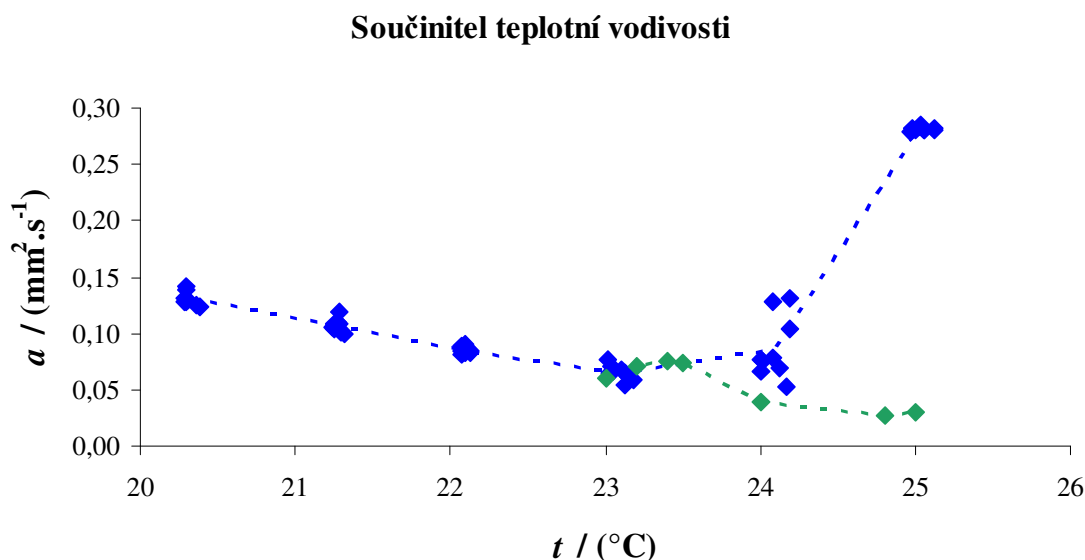
V obou případech se zjištěné hodnoty s nepatrnou odchylkou shodují s údaji od výrobce [15].

Teplota fázové změny

- u vzorku Micronal PCM byla pomocí DSC zjištěna hodnota teploty fázové změny PCM v intervalu od 21,41 do 25,52 °C v závislosti na rychlosti ohřevu respektive chlazení,
- u vzorku sádrokartonové desky Micronal PCM Smartboard byla pomocí DSC zjištěna hodnota teploty fázové změny PCM v intervalu od 24,53 do 26,93 °C v závislosti na rychlosti ohřevu respektive chlazení.

V obou případech identifikované intervaly teploty fázové změny PCM odpovídají údajům od výrobce [15]. Pomocí pulsních metod (jehlovou sondou a transientní pulsní metodou) nebyla určena hodnota teploty fázové změny PCM v sádrokartonové desce Micronal PCM Smartboard, ale z obr. 5.1 až 5.3 je zřejmé, že se v okolí teploty 24 °C projevují důsledky změny fáze PCM.

Součinitel teplotní vodivosti

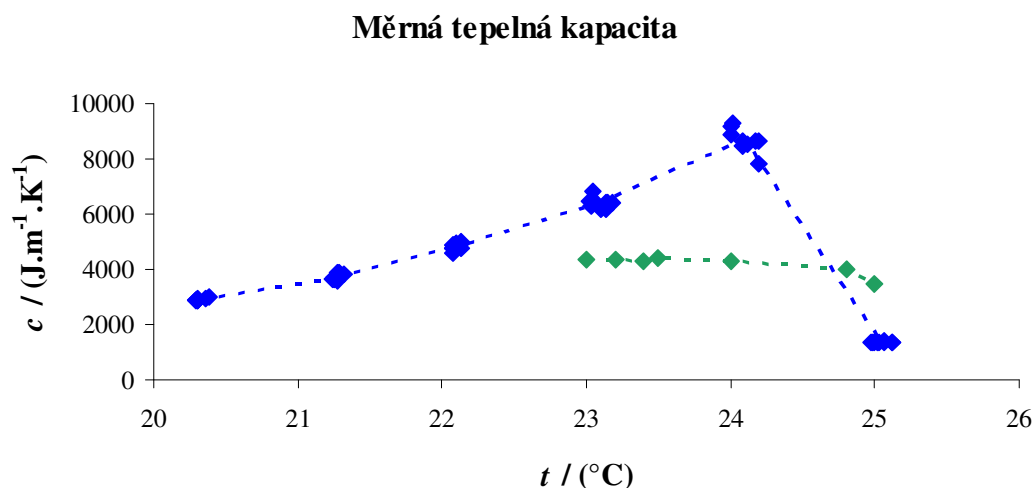


Obr. 5.1 Závislost součinitele teplotní vodivosti desky Micronal PCM Smartboard na teplotě

Na obr. 5.1 jsou modrou barvou znázorněny hodnoty zjištěné pomocí transientní pulsní metody a zelenou barvou hodnoty zjištěné pomocí pulsní metody jehlovou sondou. Měření

jehlovou sondou se ukázalo jako naprosto nevhodné pro určení hodnoty součinitele teplotní vodivosti, jelikož rozměry vzorku ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1,5\text{ cm}$) byly natolik malé, že negativně ovlivňovaly výměnu tepla s okolím. Vzorek, u kterého byla hodnota součinitele teplotní vodivosti zjišťována transientní pulsní metodou, byl izotermicky izolován od okolí, tudíž jsou naměřená data touto metodou více relevantní a validní. Jak je z obr. 5.1 zřejmé, v okolí teploty fázové změny PCM je hodnota součinitele teplotní vodivosti nejmenší a dosahuje průměrné hodnoty $0,07\text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. V okolí teploty $24\text{ }^\circ\text{C}$ se projevují největší anomálie a naměřené hodnoty jsou rozprostřeny v širším intervalu než u měření při ostatních teplotách. Tyto anomálie a rozptyl naměřených hodnot jsou způsobeny množstvím PCM, které již prošlo fázovou změnou. Čím větší množství PCM roztaje, tím vyšších hodnot součinitel teplotní vodivosti při dané teplotě fázové změny PCM nabývá. Z grafické závislosti vyplývá, že v porovnání s kompozitními stavebními materiály bez PCM zkoumané materiály s PCM nabízí výborné hodnoty součinitele teplotní vodivosti právě v okolí teploty tání PCM, což často bývá požadovaná hodnota standardní teploty interiéru budovy [17].

Měrná tepelná kapacita

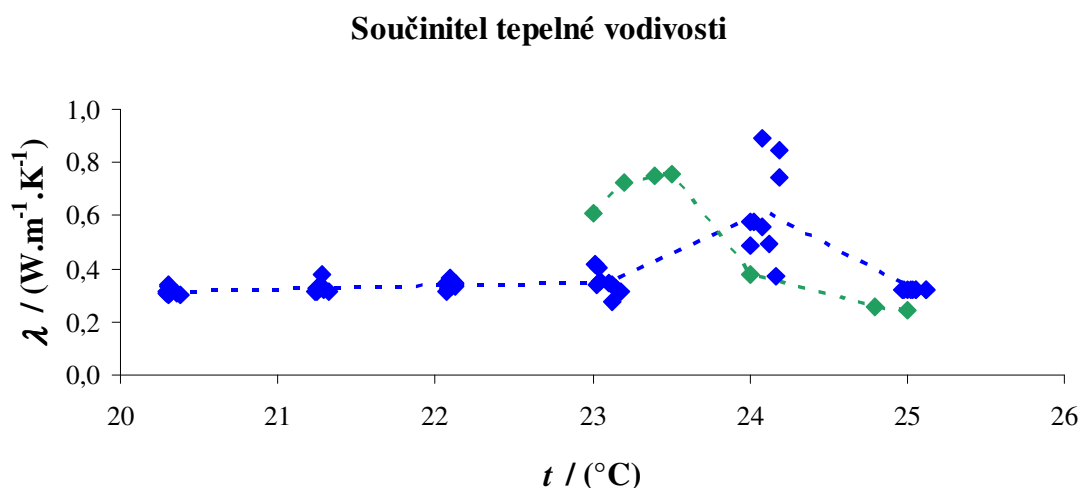


Obr. 5.2 Závislost měrné tepelné kapacity desky Micronal PCM Smartboard na teplotě

Na obr. 5.2 jsou modrou barvou znázorněny hodnoty zjištěné pomocí transientní pulsní metody a zelenou barvou hodnoty zjištěné pomocí pulsní metody jehlovou sondou. Přístroj Isomet 2104, který měří tepelné vlastnosti pulsní metodou jehlovou sondou, detekuje tzv. měrnou objemovou tepelnou kapacitu ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$), proto bylo nezbytné všechny naměřené hodnoty převést na měrnou tepelnou kapacitu ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Měření jehlovou sondou se ukázalo stejně jako v případě měření hodnoty součinitele teplotní vodivosti jako naprosto nevhodné pro určení hodnoty měrné tepelné kapacity, jelikož rozměry vzorku ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1,5\text{ cm}$) byly natolik malé, že negativně ovlivňovaly výměnu tepla s okolím a tudíž výrazně zkreslily výsledky měření. Vzorek, u kterého byla hodnota měrné tepelné kapacity zjišťována transientní pulsní metodou, byl izotermicky izolován od okolí, tudíž jsou naměřená data touto metodou více relevantní a validní. Jak je z obr. 5.2 zřejmé, v okolí teploty fázové změny PCM je hodnota měrné tepelné kapacity největší a dosahuje průměrné hodnoty $8683\text{ J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. V okolí teploty $24\text{ }^\circ\text{C}$ se projevují nepatrné anomálie a naměřené hodnoty jsou rozprostřeny v širším intervalu než u měření při ostatních teplotách. Tyto anomálie a rozptyl naměřených

hodnot jsou způsobeny množstvím PCM, které již prošlo fázovou změnou. Čím větší množství PCM roztaje, tím nižších hodnot měrná tepelná kapacita při dané teplotě fázové změny PCM nabývá. Z grafické závislosti vyplývá, že v porovnání s kompozitními stavebními materiály bez PCM zkoumané materiály s PCM nabízí velmi vysokou měrnou tepelnou kapacitu právě v okolí teploty tání PCM [17].

Součinitel tepelné vodivosti



Obr. 5.3 Závislost součinitele tepelné vodivosti desky Micronal PCM Smartboard na teplotě

Na obr. 5.3 jsou modrou barvou znázorněny hodnoty zjištěné pomocí transientní pulsní metody a zelenou barvou hodnoty zjištěné pomocí pulsní metody jehlovou sondou. Měření jehlovou sondou se ukázalo stejně jako v předchozích případech měření hodnoty součinitele teplotní vodivosti a měrné tepelné kapacity jako naprosto nevhodné pro určení hodnoty součinitele tepelné vodivosti, jelikož rozměry vzorku (10 cm × 10 cm × 1,5 cm) byly natolik malé, že negativně ovlivňovaly výměnu tepla s okolím a tudíž výrazně zkreslily výsledky měření. Vzorek, u kterého byla hodnota měrné tepelné kapacity zjišťována transientní pulsní metodou, byl izotermicky izolován od okolí, tudíž jsou naměřená data touto metodou více relevantní a validní. Jak je z obr. 5.3 zřejmé, v okolí teploty fázové změny PCM je hodnota součinitele tepelné vodivosti největší a dosahuje průměrné hodnoty 0,62 W.m⁻¹.K⁻¹. V okolí teploty 24 °C se projevují výrazné anomálie a naměřené hodnoty jsou rozprostřeny v širším intervalu než u měření při ostatních teplotách. Tyto anomálie a rozptyl naměřených hodnot jsou způsobeny množstvím PCM, které již prošlo fázovou změnou. Kromě okolí teploty tání PCM dosahuje součinitel tepelné vodivosti konstantních hodnot (průměrně 0,33 W.m⁻¹.K⁻¹) a po fázové změně PCM má deska tendenci opět se na konstantní hodnotu součinitele tepelné vodivosti vrátit. Z předchozího vyplývá, že roztaje-li větší množství PCM, součinitel tepelné vodivosti nabývá nižších hodnot při dané teplotě fázové změny PCM.

6. ZÁVĚR

V práci byly studovány a charakterizovány základní tepelné vlastnosti materiálů s PCM a sice měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a součinitel teplotní vodivosti. Dále byla zjišťováno skupenské teplo a teplota fázové změny PCM a její vliv na tepelné vlastnosti měřených vzorků.

V teoretické části byly vyjmenovány a popsány všechny v současnosti dostupné kompozitní stavební materiály používané pro pasivní stabilizaci teploty důsledkem fázové změny. Kromě kompozitních stavebních materiálů s PCM byly také uvedeny další aplikace PCM při výstavbě novostaveb s požadavkem minimalizovat energetickou náročnost budovy.

K měření tepelných vlastností studovaných materiálů byla vybrána diferenční skenovací kalorimetrie, transientní pulsní metoda a pulsní metoda jehlovou sondou. Na základě měření bylo zjištěno, že původní předpoklad týkající se schopnosti materiálu akumulovat skupenské teplo tání, byl potvrzen. Z výsledků měření vyplynulo, že se stavební kompozitní materiály s PCM chovají v okolí teploty tání PCM zcela odlišně proti stavebním kompozitním materiálům bez PCM. Studium pasivní stabilizace teploty kompozitních stavebních materiálů bylo potvrzeno, že jsou tepelné vlastnosti zkoumaných materiálů výrazně pozitivně ovlivněny přítomností PCM.

Co se týká přesnosti měření zvolených metod charakterizace tepelných vlastností vzorků, byla pulsní metoda jehlovou sondou identifikována jako nejméně přesná z důvodu malých rozměrů (10 cm × 10 cm × 1,5 cm) měřeného vzorku a nepřesným rozměrům vrtu, do kterého se zasouvala jehlová sonda. Naměřené hodnoty také byly ovlivněny tím, že nebylo možné zajistit konstantní teplotu okolí v průběhu experimentu. Měření tepelných vlastností transientní pulsní metodou bylo podstatně přesnější, avšak v průběhu jednotlivých měření se projevila nestabilita termostatu, která způsobovala nečekané kolísání teploty, které výrazným způsobem ovlivnilo naměřené hodnoty. Měření s největšími teplotními výkyvy nebyly do práce zahrnuty, přesto se nepodařilo předejít nepatrným odchylkám, které se u naměřených hodnot projeví.

Cíl práce, který jsem si vytyčil v jejím úvodu, považuji za splněný. Dospěl jsem k závěru, že PCM, díky nimž se dá využít respektive akumulovat skupenské teplo fázové změny látky, jsou materiály budoucnosti. Zatím neexistuje legislativní ustanovení, které by zvýhodňovalo použití těchto „spořičů“ respektive „akumulátorů“ energie, a bohužel není vytvořena žádná jednotná koncepce většího využití PCM v praxi, avšak toto je jen otázkou času, kdy bude světová environmentální a energetická politika podporovat také PCM a jejich cílené zavádění do celé škály oborů lidské činnosti včetně stavebního odvětví.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Šebek, J.: *Využití latentního tepla fázové změny ke skladování tepla nebo chladu*. Pardubice, 29 s., Bakalářská práce na Chemicko-technologické fakultě Univerzity Pardubice na Katedře chemického inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Doleček, CSc.
- [2] Pírk, S., Tulka, J.: *Termika*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. 45 s. ISBN 80-7194-429-7.
- [3] Vaverka, J. a kolektiv: *Stavební tepelná technika a energetika budov*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2006. 648 s. ISBN 80-214-2910-0.
- [4] Julák, A., Štulík, K., Vohlídal, J.: *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1999. 652 s. ISBN 80-7169-855-5.
- [5] Březina, F., Mollin, J., Pastorek, R., Šindelář, Z.: *Chemické tabulky anorganických sloučenin*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986. 344 s.
- [6] Greenwood, N. N., Earnshaw, A.: *Chemistry of the Elements*. 1. vyd. Oxford: Pergamon Press, 1984. 1635 s. ISBN 80-85427-38-9.
- [7] Hejhálek, J.: Stálá teplota v létě pomocí technologie PCM. *Stavebnictví a interiér*, 2006, č. 9, s. 50-52.
- [8] Hejhálek, J.: PCM technologie a sádrové desky s vysokou tepelnou akumulací. *Stavebnictví a interiér*, 2005, č. 2, s. 46-47.
- [9] Hejhálek, J.: Veletrh BAU 2007 nasměroval další vývoj ve stavebnictví. *Stavebnictví a interiér*, 2007, č. 2, s. 55-59.
- [10] Ostrý, M.: Akumulace tepla pro snížení spotřeby energie v nízkoenergetických budovách. *Mezinárodní konference CESB 2007 konaná na ČVUT v Praze* [online]. 2007 [cit. 1. 3. 2010]. Dostupné na www: <<http://stavba.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4643>>.
- [11] Kucharek, J. C.: *Phase-change materials: Phase to stun*, 2007 [cit. 16. 3. 2010]. Dostupné z: <<http://www.building.co.uk/story.asp?storycode=3085044>>.
- [12] Uživatelský manuál k přístroji DSC Q200 TA Instruments, TA Instruments, 2006
- [13] Uživatelský manuál k přístroji Thermophysical Tester RTB, SAV Bratislava, 2009
- [14] Uživatelský manuál k přístroji Isomet 2104, Applied Precision, 2007
- [15] Interní materiály společnosti BASF SE se sídlem v Ludwigshafen, SRN, 2009
- [16] Interní materiály společnosti Dörken GmbH & Co. se sídlem v Herdecke, SRN, 2009
- [17] Interní materiály společnosti Velutherm s.r.o. se sídlem v Brně, ČR, 2010

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	součinitel teplotní vodivosti ($\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$ nebo $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
c	měrná tepelná kapacita ($\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
DC24	systém Delta Cool 24
DSC	diferenční skenovací kalorimetrie
h	výška vzorku (m)
ΔH	entalpie tání nebo měrné skupenské teplo tání ($\text{kJ}.\text{kg}^{-1}$)
I	elektrický proud (A)
λ	součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
MIP	rtuťová porozimetrie (z angl. Mercury Intrusion Porosimetry)
PCM	materiál nebo látka měnící své skupenství (z angl. Phase Change Material)
Q	teplo (J)
R	plynová konstanta ($8,314 \text{ J}.\text{K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$) nebo elektrický odpor (Ω)
ρ	hustota ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}.\text{cm}^{-3}$)
t	čas (s) nebo Celsiova teplota ($^{\circ}\text{C}$)
T	termodynamická teplota (K)

9. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Technický popis produktu Micronal PCM
Příloha 2	Technický popis produktu Micronal PCM Smartboard

A broader base for your success

Polymer Dispersions for:

Construction

Architectural Coatings

Adhesives

Fiber Bonding

 **BASF**
The Chemical Company

Micronal[®] PCM

Intelligent Temperature
Management for Buildings

www.micronal.de

Micronal® PCM

Intelligent Temperature Management for Buildings

The Challenge:

The indoor temperature is significantly influenced by the thermal behaviour of a building. In buildings, which because of their construction method lack the required thermal storage mass, inner loads and sun radiation lead to great fluctuations in temperature, losses of comfort and increased need for air conditioning inside buildings.

Nowadays, construction of offices and housing is increasingly carried out using modern lightweight building methods of wood and steel designs with highly insulating wall construction materials and large glass surfaces. The high degree of prefabrication and the avoidance of long drying times lead to quick progress in construction and thus an especially high level of efficiency. In striving to optimise the mass and dematerialisation of the building components, in addition to various practical and economic advantages, one problem, namely a loss of thermal mass and the negative impacts on the indoor climate arises.



Micronal® PCM – Future built in

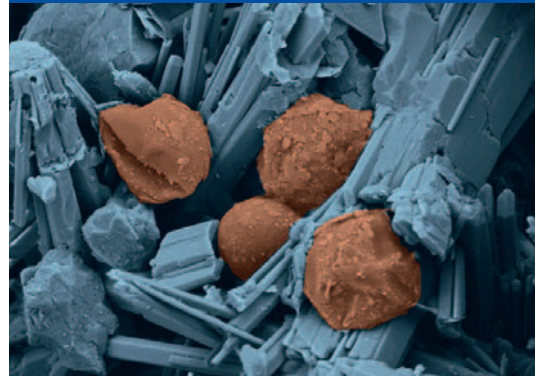
Compliance with the relevant construction guidelines governing climate policy, along with international efforts in building certification in terms of indoor climate, comfort, health, use of resources and energy efficiency, make clear the high demands on architecture, building planning and construction. The consequence – the necessity of developing new, innovative and sustainable approaches for the construction industry, in order to deal with these challenges and to fulfil the exacting demands. With Micronal® PCM BASF has developed an innovative latent heat storage material, which makes the construction industry sustainable in the area of air conditioning in buildings. Micronal® PCM is an innovative, long-term and sustainable solution for a pleasant, healthy indoor climate and more energy efficient air conditioning; for modern architecture with high demands – today and in the future.

The Solution:

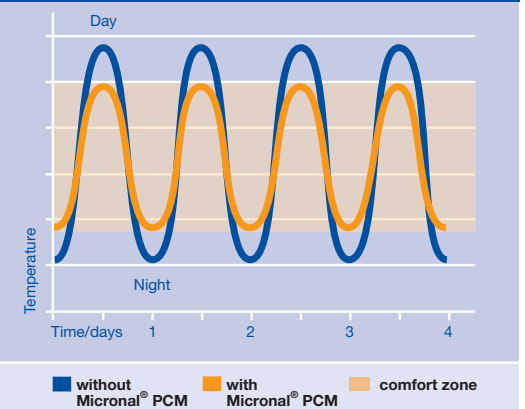
Micronal PCM®, BASF's formaldehyde-free microencapsulated latent heat storer makes it possible to combine the advantages of modern architecture and the efficiency of lightweight construction with the use and compensating effect of thermal storage capacity for a pleasant indoor climate.

Micronal PCM® (Phase Change Material) presents a durable and efficient possibility for isothermal storage of the peak loads, which usually occur during the day, in a defined temperature range, and releasing these again with a time delay (e.g.: in the evening time or at night). Integrated into various kinds of building materials and building systems, Micronal® PCM contributes to an improved indoor climate, more comfortable living conditions and better energy efficiency, using intelligent temperature management.

PCM cleverly packed



Temperature management in the defined comfort zone



Advantages of Micronal® PCM at a Glance

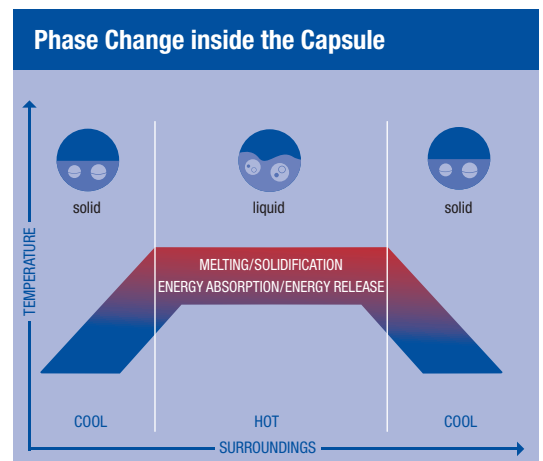
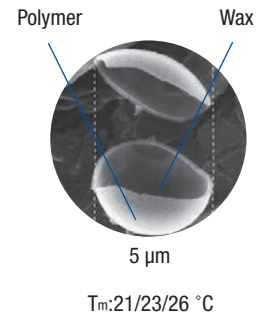
- Optimum indoor climate und consistent temperatures throughout the year
- Working and living in a comfortable and healthy temperature zone, that is between 21°C and 26°C
- A bonus for health: quiet air conditioning without the occurrence of draughts and transference of noise
- Greater energy efficiency through better energy management. Avoidance of excessive energy consumption and better use of sustainable sources of heat and cold
- Your contribution to CO₂ reduction and protection of the environment and climate
- Highly flexible configuration and the simplest processing with respect to conventional building materials – with a new distinctive functionality!
- Cost efficiency. No operating and maintenance costs, independent function
- More thermal mass in the same space, i.e. more useful surface for a given area

Micronal® PCM – High Tech in Microcapsules

Micronal® PCM is a phase change material, which completes a phase change from solid to liquid within the indoor temperature and human comfort range, i.e. at 21°C, 23°C or 26°C and in doing so can store a large quantity of heat. This principle of latent heat storage is comparable to an ice cube, which during its melting process keeps a drink at a constant temperature of 0°C. Micronal® PCM uses this simple physical effect to achieve the objective of stabilising indoor temperature.

Micronal® contains in the core of the microcapsule (size around 5 µm) a latent heat storage material made from a special wax mixture. When there is a rise in temperature above a defined temperature threshold (21°C, 23°C or 26°C), this absorbs the excessive heat energy and stores it in phase change. When the temperature falls below the temperature threshold, the capsule releases this stored heat energy again.¹

Whilst the latent heat is generally stored autonomously above a defined temperature from heat inputs occurring during the day, discharge of the storage material can occur via natural ventilation, mechanical ventilation or also via sustainable or conventional cooling concepts.



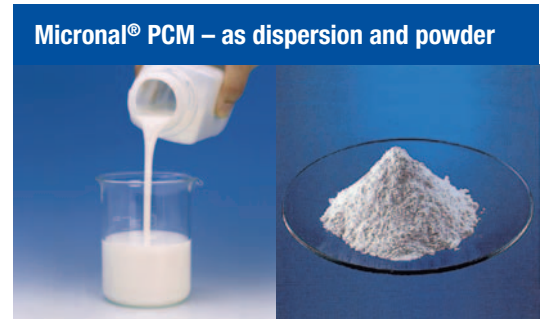
The Advantages of Microencapsulation

- Sealed packaging, the product always stays dry
- The phase change is not visible externally, the change in volume in the melting process occurs in each capsule. PCM building materials therefore remain stable in terms of size.
- Tiny volumes and tiny space requirements with high heat storage capacity.
- "Just in Time". Rapid heat exchange through high surface / volume ratio. 1g Micronal® PCM = 30m² surface
- Can be directly integrated into the building material, i.e. can be used without additional work processes or higher complexity on the construction site
- Mechanically, practically indestructible, high cycle resistance and functions over decades
- Formaldehyde-free

¹ With this process, the aggregate state of the storage material changes: the temperature of the system therefore remains almost constant, as long as the whole concealed = latent heat is absorbed or released.

The Micronal® PCM Product Portfolio

Micronal® PCM can be incorporated into building materials in different forms. For all applications in which a liquid form can be used, BASF offers Micronal® PCM dispersions, in which the microcapsules are dispersed in water. For building applications which require a powder form (such as dry blends like plaster or cement mortar for example), BASF offers a portfolio of redispersible powders.



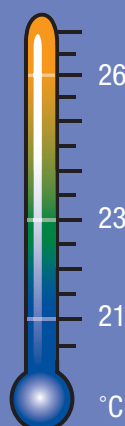
Product designation	Product type	Melting point approx.	Application	Integration range	Overall storage capacity approx.	Latent heat capacity approx.	Solid content	Density	Apparent density	Viscosity
DS 5000	Dispersion	26°C	Summertime excessive heating protection	10–30°C	59 kJ/kg	45 kJ/kg	Approx 42%	Approx 0,98		Approx 200–600 mPas
DS 5007	Dispersion	23°C	Stabilisation of the indoor temperature in the comfort zone Passive and active application	10–30°C	55 kJ/kg	41 kJ/kg	Approx 42%	Approx 0,98		Approx 200–600 mPas
DS 5030	Dispersion	21°C	Surface cooling systems	10–30°C	51 kJ/kg	37 kJ/kg	Approx 42%	Approx 0,98		Approx 200–600 mPas
DS 5001	Pulver	26°C	Summertime excessive heating protection	10–30°C	145 kJ/kg	110 kJ/kg	In powder form		Approx 250–350 kg/m³	
DS 5008	Pulver	23°C	Stabilisation of the indoor temperature in the comfort zone Passive and active application	10–30°C	135 kJ/kg	100 kJ/kg	In powder form		Approx 250–350 kg/m³	
DS 5029	Pulver	21°C	Surface cooling systems	10–30°C	125 kJ/kg	90 kJ/kg	In powder form		Approx 250–350 kg/m³	

Best results can be achieved with Micronal® PCM latent heat storers with regard to passive overheating protection, stabilisation of indoor temperatures and efficient use of surface cooling systems, as a component part of a functional building concept.

The Right Choice of Melting Point

Did you know:

30 kg of Micronal® PCM gives around 1 kWh of storage performance. This corresponds to the quantity of heat from a 1,000 W hairdryer running for 1 hour.

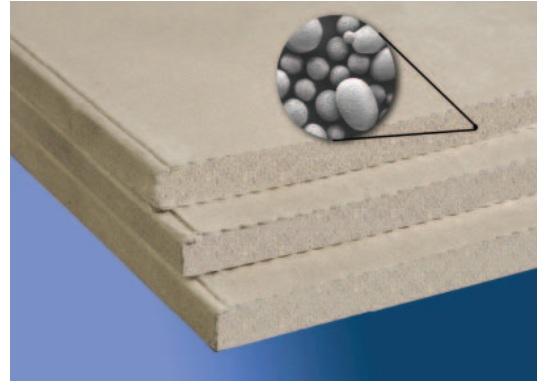


- 26°C for summertime excessive heating protection (e.g.: in lofts or for passive application in warm regions)
- 23°C for stabilisation of the indoor temperature in the comfort zone, thus frequent use of the PCM effect. Most important product for cases of active and passive applications.
- 21°C for use in surface cooling systems

Construction Applications and Systems with Micronal® PCM

Knauf Gips KG's PCM SmartBoard®

In the form of the gypsum wallboard, Knauf PCM SmartBoard®, Micronal® PCM can be quickly and simply integrated into innovative building concepts in dry construction. Every square meter of this building material contains three kilograms of the Micronal® PCM latent heat storer. The heat capacity of a wall construction, twice equipped with 15mm PCM SmartBoard®, is thus comparable to a 14 cm thick concrete wall or a 36,5 cm thick brick wall.



Ilkazzell Isoliertechnik GmbH's Ilkatherm® System

Derived from sandwich technology (metal surface, PUR rigid foam core, metal surface), highly efficient radiant ceiling panels with Micronal® PCM were developed, which can be linked to existing cooling water circuits via a simple Plug and Play process. Water cooling is achieved through capillary tube mats, which are located on the reverse of the PCM layer facing into the room. This system solution makes renewable cooling and buffering of peak loads possible.



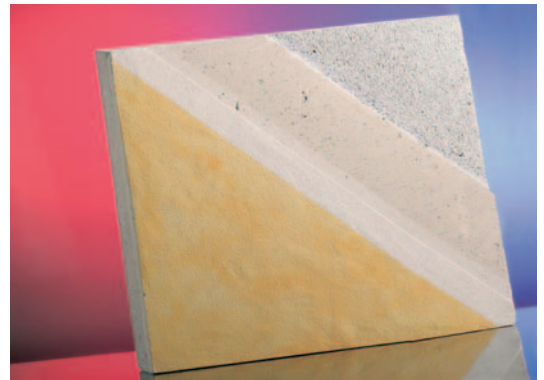
© Ilkazzell Isoliertechnik GmbH

Passive or Active Application

With Micronal® PCM, modified building materials can be used in “passive application”, i.e. without simultaneous use of mechanical cooling, but also as a component of an “activated” system in building concepts. An activated system describes the combination of various components, which enable recooling or active charging or discharging of the storage material. The heat transfer medium for this can for example be air or water.

Maxit clima® machine-applied plaster from maxit Deutschland GmbH

Maxit clima is a PCM machine-applied plaster for making single-layer interior plaster with a temperature regulating effect. Through varying the thickness of the layer, the quantity of Micronal® PCM latent heat storer can be controlled according to requirements. Maxit clima® is available fully formulated (for direct processing on the construction site) as a dry mortar.



H+H Deutschland GmbH's CelBloc Plus®

The green aerated concrete CelBloc Plus offers the capability for latent heat storage in addition to good heat, fire and sound insulation characteristics and positive environmentally compatible characteristics for adjusting air humidity.

The migration of the heat front through the outer wall is slowed down by the active PCM component. The result is a highly insulating stone that shows smaller temperature fluctuations on the inner wall surface for the same U-value. This leads to more constant indoor temperatures.



© H+H Deutschland GmbH

Further product developments on request.

Tips for Planners



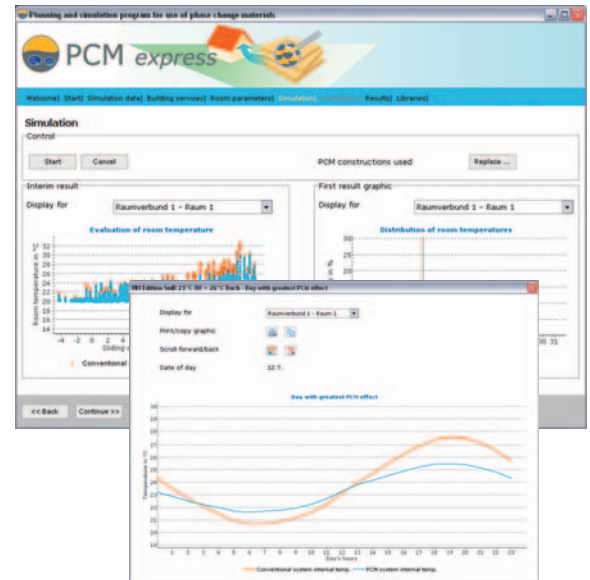
Micronal® PCM has demonstrated its performance in accordance with the criteria of the RAL quality control association, Gütegemeinschaft PCM e.V, in comprehensive test series. Micronal® PCM has passed all tests, both as a raw material and also in PCM SmartBoard® dry wall-boards, and has had the RAL quality mark since 22 August 2008. Thus invitations to tender according to RAL-GZ 896 for building products based on Micronal® PCM correspond to good professional practice and the recognised technological rules.

Details can be found at www.pcm-ral.de

Micronal® PCM – High Performance in Intelligent Building Concepts

The PCMexpress Simulation Software

The PCMexpress program was developed within the framework of a research project in co-operation with the Fraunhofer Institute for Solar Energy Technology (ISE) in Freiburg, the Valentin Energiesoftware Company and other industrial partners. PCMexpress is a planning and simulation program for buildings with phase change materials (PCM). It is designed to support architects and planners in the evaluation of the effect of PCM in concrete buildings, by enabling secure decision making for the sizing of the overall system. As a concluding presentation, amongst other things, project reports were offered to customers and planners, as well as meaningful graphs for comparing the systems.



© Dr. Valentin EnergieSoftware GmbH

Reference Items with Micronal® PCM

In the past few years Micronal® PCM has been sampled and tested several times in real reference items. Three examples follow from the areas of commercial construction, school construction and housing construction.

PCM evaluation made easy

More about the free simulation software PCMexpress along with the download link can be found at www.micronal.de

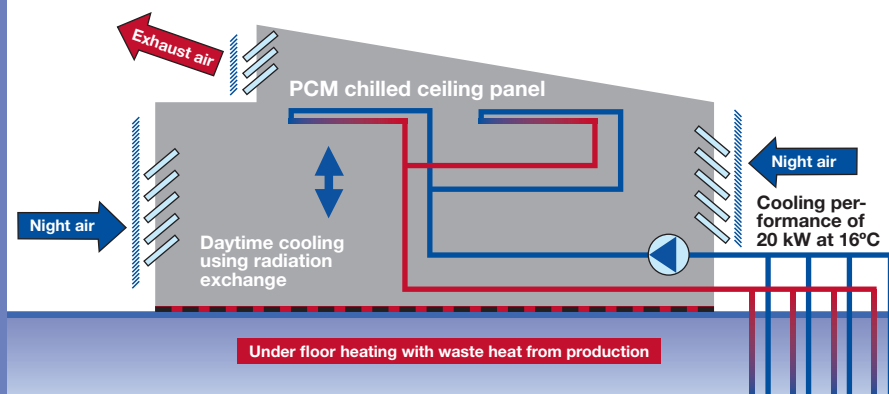
Reference Item 1: Commercial Construction

Objective: Optimised energy concept with excellent indoor climate conditions for staff

- Construction item: Office construction for Engelhardt & Bauer in Karlsruhe
- Application: active cooling ceiling elements with renewable cooling sources (geothermal probes)
- Product: Ilkazell's Ilkatherm chilled ceiling panel
- Concept and monitoring: Fraunhofer Institute for Solar Energy Technology (ISE) in Freiburg
- Result: Geothermal probes as renewable cool sources constantly provide cold energy for the Ilkatherm cooling ceiling. In addition, automatic window opening controls night ventilation to discharge the building at night. Micronal® PCM acts as a temporary storer for the peak loads occurring during the usage time in the day and thus homogenises the "just-in-time" cooling requirement.

Reference Item: Engelhardt & Bauer

- Small geothermal probes are the cooling sources
- Energy efficient solution based on sustainable cooling concept
- No heat exchange between the cooling source and the chilled ceiling panel
- Minimal technical effort expended, small operating and investment costs



Reference Item 2: Housing Construction

Objective: Most constant indoor temperature possible at 23°C, autarkic supply via photovoltaics

- Construction item: German contribution to the Solar Decathlon Competition of the DOE in Washington D.C. 2008
- Concept: Professor Hegger, Darmstadt Technical University
- Application: passive temperature management at 23°C on walls and active cooling ceilings
- Products: Knauf PCM SmartBoard® and Ilkatherm cooling ceiling panels
- Construction methods: wood-framed lightweight construction, partly with vacuum insulation, interior fittings dry construction
- Implementation: student work group with Professor Hegger, Darmstadt Technical University
- Website: www.solardecathlon.de

Reference Item: Solar Decathlon House



Reference Item 3: School Construction

Objective: Good thermal comfort in container lightweight construction without active cooling.

- Construction item: new school building for the state of Luxembourg, town of Diekirch
- Concept: Public Buildings Administration, new buildings division, Luxembourg
- Application: purely passive temperature management at 23°C on walls and ceilings
- Product: Knauf PCM SmartBoard®
- Construction methods: structural work steel container construction, interior work dry construction and PCM grid ceilings
- Implementation: ALHO Systembau GmbH, Morsbach
- Monitoring: Fraunhofer Institute for Solar Energy Technology (ISE) in Freiburg

Reference Item: School Building Diekirch

Further reference items are to be found at www.micronal.de

Micronal® PCM was developed with helpful support from the BMWi (Federal Ministry of Economics and Technology) under funding references: 0329840 and 0327370





BASF SE

Business Management Micronal[®] PCM
Marketing Polymer Dispersions for Construction
67056 Ludwigshafen, Germany

www.micronal.de
E-mail: micronal@basf.com

For further information please contact us on our
toll-free numbers and you will automatically be
transferred to your regional contact person:

Phone: 00 800 - 227 66 257 or 00 800 - ACRONALS
Phone: 00 800 - 227 66 259 or 00 800 - ACRONALX



BASF
The Chemical Company

Intelligent Temperature Management in an Extremely Lightweight Approach.

MICRONAL® PCM

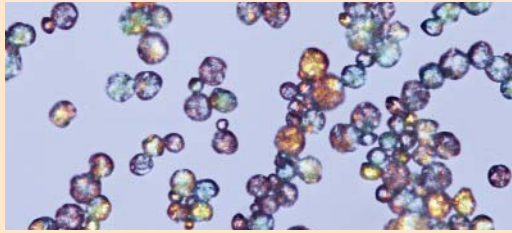
SMARTBOARD™

While today's architecture is characterized by lightweight construction and by increasingly energy-optimized engineering as well, one is not required to do without whatever comfort may seem desirable: Building materials modified with Micronal® phase change materials (PCM) ensure that ideal room air conditions are achieved through active temperature balancing, with no extra space or effort needed. It is specifically through Micronal® PCM SmartBoard™ that phase change material can now be incorporated into innovative building concepts, readily and with effortless ease. Thus, intelligent temperature management becomes childishly simple for new building construction and refurbishment.

 **BASF**

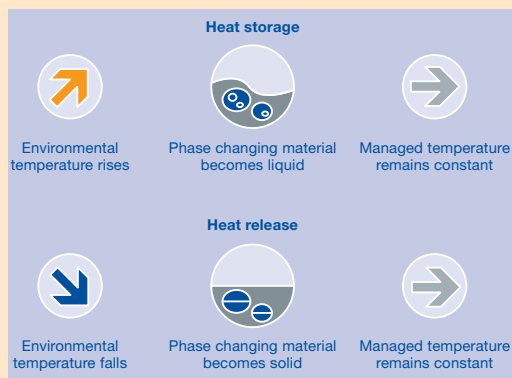
The Chemical Company

Micronal[®] PCM SmartBoard[™]

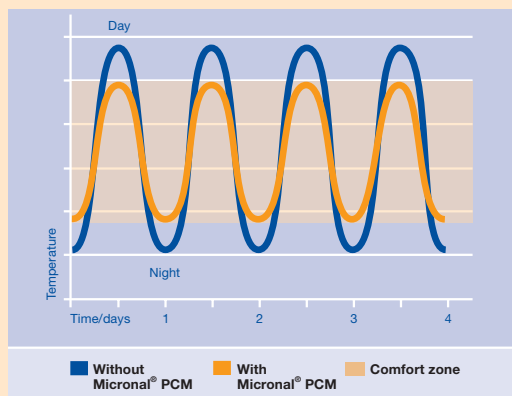


Sized 2–20 µm, the microcapsules – given their high storage capacity – perform amazingly.

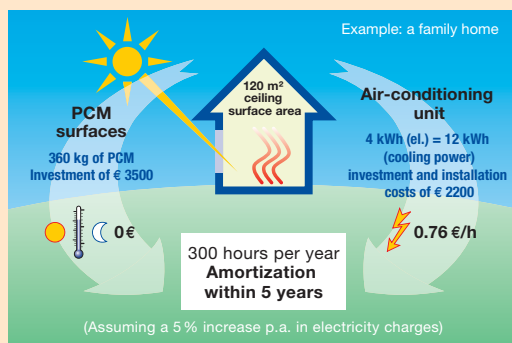
How phase changing materials work



Optimized room temperature



Active climate control: Phase changing materials reduce temperature peaks.



Phase change materials reduce or eliminate the energy consumption of conventional air-conditioning solutions.

Micronal[®] PCM – Active Temperature Management in Buildings

A building material modified with Micronal[®] phase change materials is capable of running an active temperature management. Typically, it keeps the air temperature in office spaces and living rooms almost constant at the melting-point level throughout the period of phase change. Nature, through its day to night temperature differential, ensures a cycle sequence of 'melt and solidify', or 'store and emit', as applicable. Day-time peak temperatures are lessened, with low night-time temperatures used to dissipate heat from the building, at no charge.

Micronal[®] phase change materials are advantageous in that, while being low-weight items, they require little space in giving materials a high thermal-storage capacity. Thus, ordinary construction materials become functional components in the building. Moreover, they can be put into any shape, so bulky storage components are not needed any more, and the materials offer a great potential for decentralized large-area use throughout the building.

Phase Change Materials: High-Tech in Microcapsules

How it works:

Microscopically small polymer spheres contain in their core a storage medium of waxes. On heating and cooling, the wax in the reservoir capsules melts and solidifies, respectively. When the temperature rises, the phase changing materials absorb heat. When the temperature falls, they emit heat. During the phase change, the temperature remains constant. This stored heat which is 'concealed' in the phase change is known as latent heat. It is a reversible process which occurs within the melting range of the wax.

Once the room temperature rises to above melting temperature the microcapsules begin their 'work'. Surplus heat is dissipated into the wall to be stored there. As a consequence, temperature peaks are cut off, thus ensuring a more uniform room temperature. So, there is an incredibly broad range of potential applications, specifically for thermal comfort during the summer season.



Temperature Management at Its Best: Micronal® PCM SmartBoard™

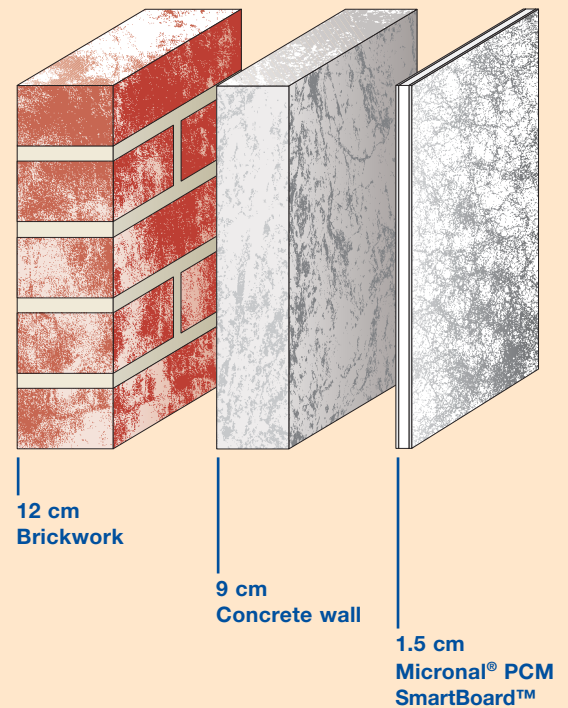
The Micronal® PCM SmartBoard™ represents the best-of-class solution in lightweight construction. Any square meter of this innovative building material includes three kilograms of latent heat storage material in the form of micro-capsules. These, for the first time, enable a wallboard to provide – in an active approach – a pleasant room air. In this way, indoor temperatures are optimized, in both new and refurbished buildings.

The heat-storage capacity of a 1.5 cm Micronal® PCM SmartBoard™ is comparable to that of a 9 cm concrete wall or a 12 cm brick wall: Intelligent temperature management in an extremely lightweight approach, in the truest sense of the word.

Customer's benefits at a glance:

- Extended architectural freedom without compromising
- Easy to use, with no difference from a conventional building board or structural panel
- No extra space needed for the phase change material
- Reliable encapsulation technology optimized for incorporation into buildings
- As-new function for decades, with no added cost
- Reduces or completely restrains energy consumption of a conventional air-conditioning solution
- Enhances the building's value
- Expertise issued by the globally leading chemical company

Heat Storage Capacity Comparison



A Micronal® PCM SmartBoard™ only 1.5 cm thick features a thermal storage capacity identical to that of 9 cm concrete or 12 cm brickwork! Thus, it is the ideal building material for both refurbishment and modern lightweight construction.

Haus der Gegenwart: Generating Ideas for the Future



Exacting demands on comfort and innovative building materials.
www.haus-der-gegenwart.de

In January 2005, the Haus der Gegenwart (Contemporary House) was opened in Munich in a ceremony. It was built in line with the concept of one of the award-winning models of the architecture contest started in 2001 by SZ Magazine of the German newspaper 'Süddeutsche Zeitung'. Built in classical lightweight construction, the detached residential house incorporates innovative housing features, with a total of 600 m² of Micronal® PCM SmartBoard™ 23 used. Thus, 1,800 kg of pure phase change material warrant temperature management of the promising building which, perfectly tied into its environment, develops an allegorical symbiosis between an artificial environment and architecture.

Technical Data

Description	Micronal® PCM SmartBoard™
Thickness	15 mm
Length	2,000 mm
Width	1,250 mm
Structure	Glassfiber nonwoven-covered gypsum wallboard with phase change material in the gypsum core
Edge design	Full squared

Criterion	Specifications
Weight per unit area	11.5 kg +/- 0.5 kg/m ²
Free moisture	≤ 2.0 %
Thickness tolerance ¹	+/- 0.5 mm
Length tolerance	+/- 8 mm
Width tolerance ¹	+ 0 mm, -5 mm
Ultimate load, transverse/parallel ¹	≥ 400 N/≥ 300 N
Deflection, transverse/parallel ¹	≤ 2.5 mm/≤ 2.8 mm
Furring	Profile spacing 41.5 cm
Screw spacing, ceiling/wall	17 cm/25 cm
Screw type	TN 3.5
Building material class ²	Euroclass E to DIN EN 13501-1, equivalent to B2 to DIN 4102 Part 2
Building inspectorate certificate	Behavior in fire: Test certificate for Euroclass E; General building inspectorate test certificate P MPA E-05 507 for Class B1 building materials

¹ Testing to the requirements laid down in DIN 18180

² Class B1 building material requirements are met through double-covering with a commercial 12.5 mm gypsum plaster board. Users are urged to comply with relevant statutory requirements relating to fire protection in buildings.

Class B1 building materials:

Flame-retardant building materials for special structures

Class B2 building materials:

Normally flammable building materials for buildings of ordinary type and for standard use

Parameter/Criterion	Micronal® PCM SmartBoard™ 23	Micronal® PCM SmartBoard™ 26	Standard gypsum plaster board (for comparison)
'Switching' temperature	23 °C	26 °C	–
Latent heat capacity ΔH in 'switching' area	approx. 330 kJ/m ²	approx. 330 kJ/m ²	0 kJ/m ²
Specific heat capacity	approx. 1.20 kJ/kgK	approx. 1.20 kJ/kgK	approx. 0.85 kJ/kgK
Thermal conductivity λ ³	approx. 0.18 W/(mk)	approx. 0.18 W/(mk)	approx. 0.19 W/(mk)

³ Similar to DIN EN 12664/App. Lola 5

Technical Contact:

BASF Aktiengesellschaft
Regional Business Unit Adhesive
and Construction Industry Europe
Marketing Construction Chemicals
67056 Ludwigshafen, Germany

www.micronal.de
E-mail: construction-chemicals@basf.com

Phone: (49) 621-60-4 99 69 or -9 97 29
Fax: (49) 621-60-4 03 25

Sales Contact:

BTC
Speciality Chemical Distribution GmbH
Maarweg 163/165
50825 Cologne, Germany

www.btc-de.com
E-mail: info@btc-de.com

Phone: (49) 221-95 46 41 49
Fax: (49) 221-95 46 42 34

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed (03/2006).