

# **Aplikační potenciál materiálů vykazujících fázovou změnu v oblasti stavebnictví**

Bc. Martin Karal

---

Diplomová práce  
2021/2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Karal**  
Osobní číslo: **T20005**  
Studijní program: **N0722A130001 Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **Kombinovaná**  
Téma práce: ***Aplikační potenciál materiálů vykazujících fázovou změnu v oblasti stavebnictví***

## Zásady pro vypracování

Cílem práce bude připravit detailní rešerši představující aktuálně dostupné možnosti v oblasti materiálů vykazujících fázovou změnu v teplotních oblastech relevantních pro jejich využití ve stavebnictví. Cílem praktické části bude připravit a experimentálně ocharakterizovat vhodné materiálové receptury s ohledem na cílovou aplikační oblast.

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

**Seznam doporučené literatury:**

- 1 – Cheremisinoff, N.P., Cheremisinoff, P.N. *Handbook of Applied Polymer Processing Technology*. CRC Press, 1996. ISBN 9780824796792.
- 2 – Rauwendaal, C. *Polymer mixing, a self-study guide*. Hanser, 1998. ISBN 978-1569902233.
- 3 – Tadmor, Z., Gogos, C.G. *Principles of Polymer Processing*. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9780470355923.
- 4 – Manas-Zloczower, I. *Mixing and compounding of polymers: Theory and practice, 2nd edition..* Hanser, 2009. ISBN 978-3-446-43371-7.
- 5 – Hussein J. Akeiber, et al., A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60:1470-1497, 2016

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Jana Navrátilová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2022

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....

podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá detailní rešerší aktuálně dostupných možností materiálů vykazujících fázovou změnu v teplotních oblastech relevantních pro jejich využití ve stavebnictví. Dále také popisuje nejrůznější využití i v jiných odvětvích než je stavebnictví, popisuje jak pozitivní vlastnosti PCM materiálů, tak jejich negativa při praktickém použití.

V praktické části se práce zabývá přípravou a experimentální charakterizací vhodné materiálové receptury s ohledem na cílovou aplikační oblast.

**Klíčová slova:** materiály vykazující fázovou změnu (PCM materiály), vosk (parafín), enkapsulace, polyethylen, stavebnictví, grafit, chlazení, ohřev

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with a detailed search of currently available possibilities of materials showing a phase change in temperature areas relevant for their use in construction. It also describes various uses in sectors other than construction. It describes both the positive properties of PCM materials and their negatives in practical use.

In the practical part, the work deals with the experimental characterization of a suitable material recipe with respect to the target application area.

**Keywords:** phase change materials (PCM materials), wax (paraffin), encapsulation, polyethylene, construction, graphite, cooling, heating

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Tomášovi Sedláčkovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady při vypracování diplomové práce a za získání nových zkušeností do další profesní kariéry. Dále mu děkuji za ochotu, vstřícný přístup a povzbuzení.

V neposlední řadě bych moc rád poděkoval své rodině, všem svým nejbližším a přátelům za podporu mi projevenou po celou dobu mého studia.

*„Kdo sám v sebe doufá, ten nejlepší podporu nalezne.“*

Karel Havlíček Borovský

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## OBSAH

ÚVOD.....	10
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>1 MATERIÁLY S FÁZOVÝM PŘECHODEM.....</b>	<b>12</b>
1.1 CHARAKTERISTIKA PCM MATERIÁLŮ.....	12
1.2 VLASTNOSTI PCM MATERIÁLŮ A POŽADAVKY NA NĚ KLADENÉ .....	14
1.3 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ PCM MATERIÁLŮ .....	15
1.3.1 Organické PCM materiály .....	16
1.3.2 Anorganické PCM materiály .....	17
1.3.3 Eutektické PCM materiály .....	17
1.4 NEJVYUŽÍVANĚJŠÍ PCM MATERIÁLY.....	17
1.4.1 Parafíny .....	17
1.4.2 Bezparafínové sloučeniny .....	18
1.4.3 Glauberova sůl (dekahydrát síranu sodného).....	18
1.4.4 Kovy a slitiny kovů.....	19
1.4.5 Hexahydrát chloridu vápenatého .....	19
1.4.6 Mastné kyseliny .....	19
1.5 PROBLÉMY A ZÁPORNÉ VLASTNOSTI PCM MATERIÁLŮ .....	20
1.5.1 Podchlazení látek .....	20
1.5.2 Fázová separace látek .....	20
1.5.3 Mechanická stabilita a teplotní vodivost.....	21
1.6 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ A APLIKACE PCM MATERIÁLŮ.....	21
1.6.1 Lékařské aplikace.....	22
1.6.2 Logistika a aplikace chladicích řetězců .....	22
1.6.3 Aplikace zaměřené na lidské tělo .....	23
1.6.4 Další aplikace .....	24
<b>2 METODY VÝROBY, ZAČLENĚNÍ PCM DO STRUKTURY MATERIÁLŮ.....</b>	<b>25</b>
2.1 MIKROENKAPSULOVANÝ PCM (MICROPCM) .....	25
2.2 MAKROENKAPSULOVANÝ PCM (MACROPCM) .....	26
2.3 TVAROVÁ STABILIZACE PCM (SSPCM).....	26
<b>3 APLIKAČNÍ POTENCIÁL PCM VE STAVEBNICTVÍ.....</b>	<b>28</b>
3.1 APLIKACE PRO AKUMULACI TEPLA V BUDOVÁCH.....	29
3.1.1 PCM v technologiích pro podlahové vytápění.....	29
3.1.2 Aplikace ve stěnách budov .....	30
3.1.3 Aplikace PCM v okenním systému .....	31
3.1.4 Chladicí stropy .....	31

3.1.5	Aplikace pro střechu.....	31
3.1.6	Aplikace v sádkartonových deskách .....	32
3.2	SOLÁRNÍ SYSTÉMY A TEPELNÉ ZÁSOBNÍKY .....	33
3.3	DALŠÍ POUŽITELNÉ APLIKACE VE STAVEBNICTVÍ.....	34
3.4	PCM STAVEBNÍ PRODUKTY VYSKYTUJÍCÍ SE NA TRHU .....	35
3.4.1	Micronal PCM .....	35
3.4.2	Pórobetonové tvárnice CelBloc Plus.....	35
3.4.3	Systém Glass X .....	36
3.4.4	Systém Delta Cool.....	36
3.5	SHRNUTÍ A DALŠÍ VÝVOJ PCM.....	36
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>POUŽITÉ VSTUPNÍ MATERIÁLY, PŘÍSTROJE, METODY MĚŘENÍ .....</b>	<b>39</b>
4.1	POUŽITÉ VSTUPNÍ MATERIÁLY .....	39
4.1.1	Polyethylen (PE).....	39
4.1.2	Vosk (parafín).....	40
4.1.3	Grafit.....	41
4.1.4	nZ-BOCH 01 (ZnO-BOCH_01).....	41
4.2	PRACOVNÍ POSTUP .....	42
4.3	METODY MĚŘENÍ.....	44
4.3.1	Použité přístroje .....	44
4.3.2	Tepelná stabilita (leaching).....	44
4.3.3	TGA – termogravimetrická analýza .....	44
4.3.4	SEM – skenovací elektronová mikroskopie .....	44
4.3.5	Reologické vlastnosti – rotační reometr (deska-deska) .....	45
4.3.6	TCi – tepelná vodivost.....	45
4.3.7	DSC – diferenciální skenovací kalorimetrie.....	45
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>46</b>
5.1	TEPELNÁ STABILITA (LEACHING) .....	46
5.2	TGA – TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA .....	51
5.3	SEM – SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	54
5.4	VISKOELASTICKÉ VLASTNOSTI .....	60
5.5	TEPELNÁ VODIVOST .....	65
5.6	DSC – DIFERENCIÁLNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE .....	67
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>78</b>



SEZNAM TABULEK .....	80
----------------------	----

## ÚVOD

PCM materiály nejsou žádnou novinkou. Jejich existence je známá už od počátku 20. století. Avšak jejich komerční využití v různých průmyslových odvětvích nebo v oblasti běžného použití dlouho nebylo možné. Ke změně došlo až s vývojem a zavedením nových technologií a materiálů do praxe. Díky technologickému pokroku se začalo přemýšlet o praktickém využití pro nejrůznější aplikace a tím se PCM dostalo mnohem více pozornosti. Tyto materiály se staly předmětem mnoha studií. Dnes už lze říci, že pro mnohé aplikace jsou tyto materiály zcela běžné a staly se tak standardem. Poptávka po PCM materiálech stále roste a v budoucnu je pravděpodobně budeme využívat stále častěji.

Jednou z největších oblastí, kde se PCM materiály využívají je stavební průmysl. Používají se především za účelem akumulace tepla a stabilizace vnitřní teploty budovy, vytápění a chlazení. Můžeme jej tedy nalézt přímo ve stavebním materiálu. Typickým příkladem mohou být různé betonové bloky, sádkokartonové desky, omítkové směsi a různé nátěry, kde bývá zpravidla enkapsulovaný. Výhodou takových materiálů je, že automaticky tlumí teplotní výkyvy v budově a děje se tak bez jakékoliv spotřeby energie či dalších přídatných zařízení. Dále lze tyto technologie běžně využít pro podlahové vytápění, solárního ohřev vody apod.

Uplatnění tyto materiály nachází i v jiných odvětvích. Za zmínku určitě stojí lékařské aplikace, jako jsou inkubátory pro kojence, termopříkrývky nebo využití pro přepravu krve a orgánů. V potravinářském průmyslu je využíván v chladicích boxech za účelem stabilizace teploty, dále při přepravě teplotně citlivých potravin, nebo jako běžné chlazení. Obzvlášť dojde-li k výpadkům nebo nedostupnosti elektrické energie.

PCM materiály bohužel nedisponují pouze kladnými vlastnostmi, ale i těmi zápornými, a ne vždy se jejich využití pro danou technologii hodí. Těmito nežádoucími vlastnostmi jsou separace fází, náchylnost k podchlazení, špatná tepelná vodivost nebo vliv klimatických podmínek na akumulaci tepla. Z tohoto důvodu je použití PCM v některých oblastech nevhodné nebo přímo nežádoucí, protože nepřináší žádnou úsporu energií.

V experimentální části se diplomová práce zabývá výrobou a následnou charakterizací PCM materiálů za účelem budoucího využití v praxi pro opláštění budov nebo tepelné izolace. Jako matrice je použit LDPE, který byl smíchán v určitých koncentracích s voskem a následně ještě doplněn o plnivo, které by mělo zlepšit integraci vosku do struktury materiálu. Takto připravené materiály byly analyzovány a podrobeny několika různým charakterizačním metodám. Zkoumána byla teplotní vodivost, struktura materiálu elektronovým mikroskopem, teplotní charakteristiky za pomoci DSC, teplotní stabilita, materiálové složení TGA analýzou a některé další.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MATERIÁLY S FÁZOVÝM PŘECHODEM

Běžně jsou označovány jako PCM materiály (Phase Change Materials) – materiály s látkovou přeměnou. Tyto materiály jsou známé už od 20. a 30. let 20. století a nejsou tedy žádnou převratnou novinkou. Jejich hlavní předností je využití jako prostředek pro ukládání tepelné energie. Při tavení nebo naopak při tuhnutí za určité teploty dokáží absorbovat nebo uvolnit velké množství energie. K uvolnění tepla dochází ve chvíli, kdy materiál mění skupenství z pevného na kapalné nebo naopak. (1)

První praktické využití PCM materiálů se váže k problematice chlazení začátkem 20. století. Byly využívány v ledárnách, pivních sklepech a při přepravě potravin citlivých na teplo. Následně v roce 1932 bylo patentováno zařízení pro ohřev teplé užitkové vody s využitím PCM. Zde bylo použito hydratovaných anorganických solí a parafínu. V roce 1965 na trh přišly ohřívací vložky s hydridem lithia pro horolezce, polární výpravy nebo letce. Důležitou roli hrály PCM materiály i v aplikacích pro letectví a kosmonautiku. (2)

Využitím PCM materiálů v oblasti stavebního průmyslu došlo k velkému pokroku. Roku 1946 nedaleko Bostonu v USA byla postavena budova (Dover House) a v ní byly použity do té doby nevídané technologie obsahující PCM materiály. Byly zde použity plastové sudy, které byly naplněny Glauberovou solí a ty měly za úkol ohřívat vnitřní prostory. Za pomoci důmyslného systému, který využíval sluneční energii, bylo teplo převáděno do zdí, které fungovaly jako radiátory pro vedlejší místnosti. Akumulační potenciál byl v tomto případě až 11 MJ (3kWh). (3)

### 1.1 Charakteristika PCM materiálů

PCM materiály jsou charakteristické téměř konstantní teplotou tání a tuhnutí. Jsou schopné uchovávat a následně uvolňovat značné množství energie při fázovém přechodu. K poklesu teploty tedy dochází až po změně fáze. S tím přímo souvisí využití latentního tepla k vytvoření chladícího efektu. K tomu dochází absorpcí tepla v průběhu tavení PCM. Nebo naopak může docházet k ohřevu, což je způsobeno uvolněním tepla při tuhnutí PCM. (4)

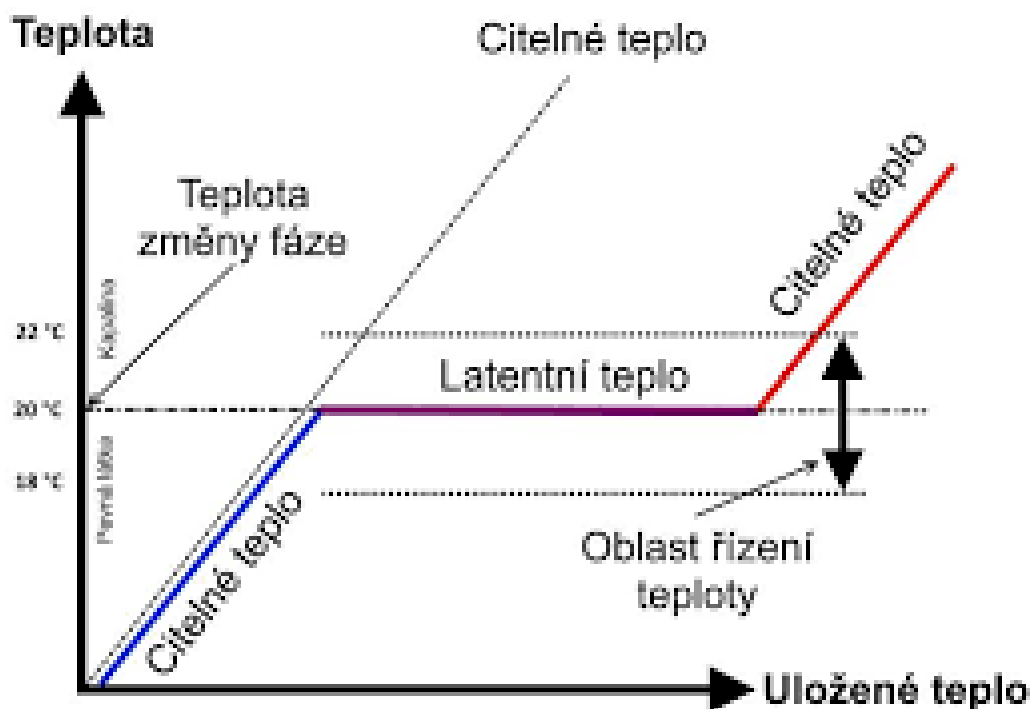
Teplota tání PCM se většinou pohybuje v rozmezí teplot od -10 do 80 °C. Jde o materiály s vysokými skupenskými teplotami tání. V praxi se nejčastěji používá fázový přechod pevná látka – kapalina. (1) V současnosti je využíváno mnoho komerčně dostupných druhů PCM materiálů a jsou dobře známé i jejich teplotní parametry. Jako příklady lze uvést fasádní destičky PCM od firmy DuPont s náplní Energain, sádkartonové destičky od výrobce Rigips nebo dřevěné obklady s pero drážkou. (5)

Avšak podrobným průzkumem prošlo jen přibližně 200 látek a dalších 20 tisíc bylo zahrnuto do odborných rešerší, kde se čeká na prostudování vlastností a určení vhodného využití v praxi. (2)

Materiály s možností akumulace tepla můžeme rozdělit na materiály „teplotně kapacitní (citelné)“ a „latentní“. Uchování energie u teplotně kapacitních (citelných) systémů dochází vlivem změny teploty skladovacího média. Takovým médium bývá zpravidla sladká či slaná voda, dále hornina, půda apod. U těchto médií však nedochází ke změně fáze. Množství energie, které tyto látky dokáží akumulovat, přímo souvisí se změnou teploty, hmotnosti a tepelné kapacity. Přestože tyto systémy nemají vysokou skladovací hustotu energie, jsou momentálně nejpoužívanější pro akumulaci tepelné energie. (6)

U latentních systémů dochází k uložení tepelné energie právě při fázové změně, kdy nedochází ke změně teploty, ale fáze materiálu. Lze tedy říci, že z pohledu objemové expanze jsou tyto systémy kompaktnější, než je tomu u tepelně kapacitních systémů. Objemová změna materiálu zde činí zhruba 10 %. Pokud bychom pracovali s fází plyn – kapalina, tak by docházelo k větším změnám objemu, což činí tento systém hůře využitelný. (6)

Na **Obr. 1** lze vidět princip akumulace tepla ve formě teplotně kapacitního (citelného) a latentního tepla v PCM materiálu.



**Obr. 1:** Teplotně kapacitní (citelné) a latentní teplo během změny fáze v oblasti řízení teploty (7)

## 1.2 Vlastnosti PCM materiálů a požadavky na ně kladené

Při volbě PCM materiálu je vždy nutné brát v úvahu řadu požadavků na daný materiál a to v hierarchickém pořádku (od technických k ekonomickým) a s ohledem na životní prostředí. (8)

Vždy záleží na vhodném výběru PCM a na kvalifikovaném stanovení jeho celkové hmotnosti (plošné hmotnosti v konstrukcích kde jej zamýšlíme umístit). Cílem je dosáhnout co nejlepší teplotní stability v souladu s plány a přáním investora. (3)

### Vlastnosti tepelné:

- vhodná výše teploty fázové přeměny
- co nejvyšší hodnota skupenského (latentního) tepla fázové přeměny (tato vlastnost je pro akumulaci nejcennější)
- dobrý přenos tepla

### Fyzikální vlastnosti:

- nízký tlak nasycených par
- vhodný fázový diagram v okolí teploty přechodu
- velká hustota materiálu
- malá objemová změna při přechodu

### Kinetické vlastnosti:

- vhodná krystalizační rychlost
- nízké tendence k realizacím metastabilních stavů (přechlazení)

### Chemické vlastnosti:

- nesmí být toxické
- nesmí škodit životnímu prostředí
- dlouhodobá stabilita složení a homogenity fází
- kompatibilita s konstrukcí zásobníku
- musí splňovat požární bezpečnost

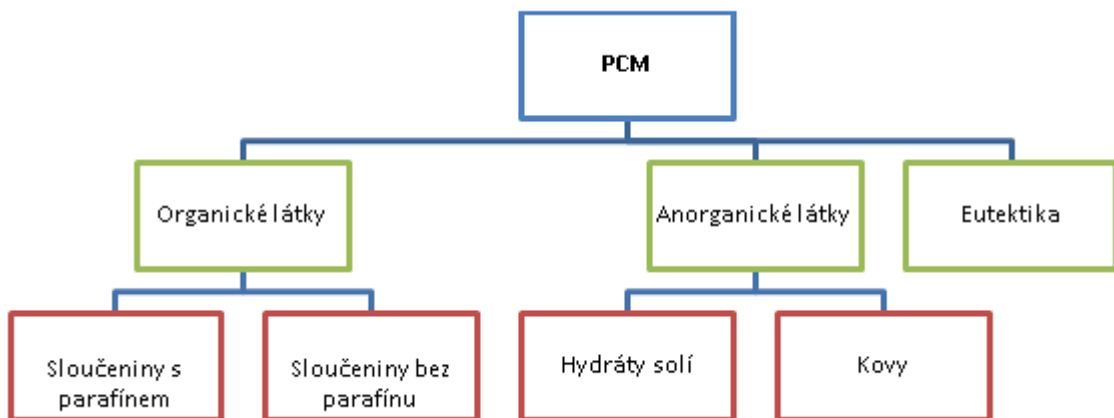
### Ekonomické vlastnosti:

- jednoduchá výroba nebo těžba
- snadná dostupnost
- nízká cena (8)

### 1.3 Základní dělení PCM materiálů

PCM materiály lze rozdělit do tří základních kategorií: organické, anorganické a eutektické. Anorganické látky mají většinou větší entalpii změny skupenství než organické látky. Je však nutné při výběru těchto materiálů brát v úvahu i jiné důležité aspekty, jedním z nich je pracovní rozsah teplot. (7) Mezi organické látky patří například organické uhlovodíky, mastné kyseliny a jejich deriváty. Do skupiny anorganických PCM spadají zejména soli a kovy, dále také třeba solné hydráty. (1) Při volbě a posléze i návrhu zařízení je vždy nutné dobře zvážit přednosti a nedostatky konkrétních PCM materiálů. (9)

Podrobnější rozdělení lze vidět na **Obr. 2** a v **Tab. 1** pak výhody a nevýhody jednotlivých fázových přechodů.



**Obr. 2:** Základní rozdělení PCM (3)

Tab. 1: Výhody a nevýhody jednotlivých fázových přechodů

Přechod skupenství		Objemové změny	Latentní teplo	Další vlastnosti a poznámky
Pevné	Pevné	Malé	Malé	Jedná se o změnu krystalizační struktury. Vhodné např. pro Trombeho stěny. Příklad: Pentaglycerin-bod tání 81 °C, latentní teplo tavení 216 kJ/kg
Pevné	Plynné	Velké	Velké	Kvůli obrovským objemovým změnám nepoužitelné
Kapalné	Plynné	Velké	Velké	Kvůli obrovským objemovým změnám nepoužitelné
Pevné	Kapalné	Malé	Střední	Objemová změna dosahuje maximálně 10 %. PCM nelze využít jako teplotonosnou látku.

### 1.3.1 Organické PCM materiály

Organické PCM materiály se vyznačují nižší hustotou než anorganické PCM. Tedy pokud máme podobné měrné latentní teplo, tak pro dosažení stejného požadavku na množství uložené energie jako u anorganických PCM je třeba větší objem. (9)

Tuto skupinu PCM materiálů lze rozdělit na sloučeniny s parafíny a bez parafínů. Za velkou výhodu lze považovat schopnost vlastní nukleace. Díky tomuto téměř nedochází k problémům s přechlazením. Další kladnou vlastností parafínů je jejich chemická inertnost a cenová dostupnost. Cyklus krystalizace – tání je poměrně dlouhý. (3)

Podíváme-li se na sloučeniny bez parafínů, pak jednoznačně problematickou vlastností je jejich hořlavost, která neumožňuje styk s vyššími teplotami, plamenem a oxidačními činidly. Do této skupiny řadíme estery, vyšší mastné kyseliny, glykoly ad. Z finančního hlediska jsou nevýhodné z důvodu vysoké ceny. Ta se pohybuje dvakrát až třikrát výše, než je tomu u technických parafínů. (3)



### 1.3.2 Anorganické PCM materiály

Jsou použitelné v širokém rozsahu teplot. Ve srovnání s organickými látkami mají větší hustotu, nejsou hořlavé, dále mají vyšší tepelnou vodivost a jsou dostupné za nižší cenu. (10)

Anorganické PCM se těžce zapouzdřují, což je způsobeno rozpustností ve vodě. Velkou výhodou je vyšší entalpie fázové změny, naopak nevýhoda spočívá v náchylnosti ke korozi, podchlazení nebo nedostatečné tepelné stabilitě. (11) Do této skupiny materiálů patří hydráty solí a kovy. (10)

### 1.3.3 Eutektické PCM materiály

Eutektika je směs dvou látek, kdy krystaly obou látek vytvoří tuhou směs. Tyto látky lze kombinovat takto: organicko – organické, anorganicko – anorganické nebo organicko – anorganické. Abychom dosáhli co nejnižší teploty tuhnutí, tak bychom měli směs kombinovat v dobrém poměru obou látek. Jako velmi pozitivní se ukazuje jejich vysoká stabilita. Naopak nevýhodou je korozivní charakter vůči jiným materiálům. (12)

Eutektické složky se neoddělují a tvoří dokonalé směsi krystalů, což je způsobeno zamrznutím. Proto se eutektikum téměř bez segregace vždy roztaví a zamrzne. Podle hmotnostního poměru vody a soli lze eutektické směsi rozdělit do tří skupin na: podeutektickou směs, nadeutektickou směs a čisté eutektikum. (13)

## 1.4 Nejvyužívanější PCM materiály

Mezi nejhojněji používané PCM materiály se jednoznačně řadí parafínový vosk, polyethylenglykol, kyselina stearová a palmitová, hexahydrát chloridu vápenatého, dekahydrát síranu sodného (Glauberova sůl) ad. (2)

### 1.4.1 Parafíny

Jsou to nasycené uhlovodíky, mající lineární uhlíkový řetězec. Čím delší je řetězec, tím více tepla a vyšší teplota je zapotřebí pro změnu skupenství. Tyto látky nejsou rozpustné ve vodě a nejsou ani toxické. Jsou ale velmi hořlavé, a proto je nutné je plnit retardéry hoření. Po roztavení dochází ke zvětšení objemu, to se pohybuje okolo 10 %. (14)

Parafínové vosky bývají nejčastěji bílé krystalické látky, jejich teplota tání bývá v rozmezí od 45 °C do 65°C. Používají se na výrobu svíček, při impregnaci různých materiálů nebo v kosmetickém průmyslu. Dále jsou významné svojí vysokou hodnotou měrné tepelné kapacity a měrného skupenského tepla fázové přeměny. Hodnota tepelné kapacity bývá v rozmezí 2,1 – 2,9 kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a hodnota měrného skupenského tepla se pohybuje okolo 210 kJ.kg<sup>-1</sup>. Pokud bychom jej porovnali s vodou, což je nejčastěji používaný akumulátor tepelné energie, tak zjistíme, že to

jsou velmi slibné tepelné parametry. V technologiích PCM se používají směsi parafínových vosků. Nejvíce používaným je hexadekan ( $C_{16}H_{34}$ ). (2)

Jedním z možných využití parafínových vosků je lyžařský vosk **Obr. 3**.



**Obr. 3:** Jedno z možných využití parafínových vosků (15)

#### 1.4.2 Bezparafínové sloučeniny

Je skupinou obsahující největší množství PCM. Bezparafínové PCM se mezi sebou velmi liší svými vlastnostmi na rozdíl od parafínů. Dochází k tomu po změně skupenství. (10)

#### 1.4.3 Glauberova sůl (dekahydrát síranu sodného)

Glauberova sůl je bílá krystalická látka **Obr. 4**, která byla objevena v roce 1625, avšak největší uplatnění našla až v posledních desetiletích v PCM technologii. Bohužel představuje jednu z neškodlivějších solí z hlediska ochrany staveb. Pokud rostou její krystaly v pórech např. betonu, pak tlak může dosáhnout takových hodnot, že způsobí praskání. (16)

Teplota tání je  $32,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , měrná tepelná kapacita dosahuje hodnoty  $2,7\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnota měrného skupenského tepla je  $254\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . (17)



Obr. 4: Glauberova sůl (18)

#### 1.4.4 Kovy a slitiny kovů

U anorganických solí a solných kompozitů bylo zjištěno, že z různých důvodů nemohou být využity v některých aplikacích. Jsou jimi například nízká tepelná vodivost, vysoká korozivost a velké změny objemu během tavení. Proto se do kompozitů přidávají kovové materiály. Díky vyšší tepelné vodivosti jsou výhodnější. Avšak jejich použití může přinášet mnoho netechnických problémů. U některých chemických prvků a jejich slitin se ukázalo, že teplota tání se po 1000 tepelných cyklech snížila o 3,06 – 5,3 K a objem dokonce o 10,98 %. (19)

#### 1.4.5 Hexahydrát chloridu vápenatého

Hexahydrát chloridu vápenatého ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ), jeho výzkum a použití je podstatně mladší než u parafínů nebo Glauberovi soli. Ve stavebnictví se tato látka začala využívat jako PCM až v roce 2004. (2)

Opět jde o krystalickou bílou látku, jejíž tepelné vlastnosti jsou vhodné pro použití v PCM aplikacích. Teplota tání je 30 °C, tepelná měrná kapacita 2,2  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a hodnota měrného skupenského tepla je 255,6  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . (20)

#### 1.4.6 Mastné kyseliny

Jsou to karboxylové kyseliny s dlouhým uhlíkovým řetězcem, kde se počet atomů uhlíku pohybuje od 10 do 30. Tyto látky se vyskytují běžně v přírodě. V aplikacích PCM jsou netoxické, chemicky i tepelně stabilní a jejich korozivní aktivita je nízká. (21)

Mastné kyseliny jsou nasycené nebo nenasycené, s jednou nebo více dvojnými vazbami. Dvojně vazby mají vliv na teplotu tání, která je nižší než v případě nasycených mastných kyselin. (21)

Mastné kyseliny jsou obnovitelné a biologicky odbouratelné. Teploty tání se pohybují v rozsahu od 30 do 60 °C a jejich latentní teplo od 153 do 182 kJ/kg. Mastné kyseliny patří mezi suroviny, které se svými vlastnostmi vyrovnají parafínovým voskům při použití v PCM. Jsou schopné tisíce tavných a mrazících cyklů bez tepelné degradace. Jsou běžně dostupné, protože se využívají hned v několika průmyslových odvětvích jako je například zpracování plastu, kosmetiky, textílií a další. Pro technologie PCM se hojně používají kyseliny kaprinová, laurová, palmitová, stearová a jejich směsi. (22)

Rozmezí teplot tání se nachází v rozsahu 30 – 60 °C. U některých jsou však známy nežádoucí účinky, jsou to například zápach, korozivost a zejména pak vysoká rychlost sublimace. Těmto nežádoucím vlastnostem lze předejít technologií výroby, kdy se mastné kyseliny připravují esterifikací s alkoholy. (23)

## 1.5 Problémy a záporné vlastnosti PCM materiálů

Každý materiál má jak kladné, tak i záporné vlastnosti. U PCM materiálů tomu není jinak. Mezi nejvýznamnější negativní vlastnosti patří podchlazení, nízká tepelná vodivost, dále separace fází nebo také špatná mechanická stabilita, která musí být modifikována spojením s dalším materiálem. (24)

### 1.5.1 Podchlazení látek

Značné množství PCM materiálů netuhne přímo při teplotě tání, ale až po dosažení nižší teploty a následně dochází k uvolnění latentního tepla. Dokud nedojde k tuhnutí materiálu, tak nedojde ani k uvolnění latentního tepla, materiál ukládá a uvolňuje pouze citelné teplo. (25)

Při krystalizaci nevzniká okamžitě pevná fáze, předpokladem je přítomnost krystalizačních jader, což jsou tuhé zárodky v kapalně fázi. Zárodky pevné fáze vznikají na cizích površích, to mohou být stěny nádoby, nečistoty nebo částice cizích tuhých fází a další. (24)

Přidání speciálních aditiv je nejjednodušší způsob, jak snížit podchlazení u PCM. Jde o nukleátory, které způsobí heterogenní nukleaci. Tato aditiva lze použít pro většinu běžně dostupných PCM. Snižují podchlazení až na několik málo °C. Zásadní je teplota tání nukleátorů, která je vyšší než teplota tání daného PCM. Je tomu tak z důvodu toho, aby nedocházelo k jejich deaktivaci, když je PCM v kapalně fázi. Nedostatkem této metody je, že mnoho nukleátorů má teplotu tání vyšší než konkrétní PCM pouze o 10 až 20 °C. (26)

### 1.5.2 Fázová separace látek

U PCM materiálů rozlišujeme tři typy tání: kongruentní, nekongruentní a semi-kongruentní. Velmi dobrým příkladem kongruentního tání je voda. Jestliže vodu

v kapalně fázi ochladíme pod teplotu tání, pak bude mít v pevné fázi stejné homogenní složení jako předtím. (24)

Nekongruentní tání lze pozorovat u sloučeniny soli ve vodě. Například roztok vody a soli s hmotnostním složením 10 % soli a 90 % vody je homogenní do teploty  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (24) Dojde-li ke zchlazení pod tuto teplotu, pak část kapalně fáze vody ze směsi přechází na tuhou fázi a zbylá kapalná fáze má větší koncentraci soli. Tudíž se sloučenina rozdělí na dvě rozdílné fáze. Tyto fáze se liší svojí hustotou. Ta, která má vyšší hustotu, bude klesat na dno nádoby a fáze s menší hustotou bude stoupat vzhůru. Tento jev je označován jako fázová separace.

Třetím zmíněným typem je semi-kongruentní tání. Obvykle při tání hydrátů solí dochází ke vzniku pevné fáze s malým počtem molekul vody a kapalně fáze s nižší koncentrací soli. (6)

### 1.5.3 Mechanická stabilita a teplotní vodivost

PCM jsou často kombinovány s dalšími látkami různých vlastností, čímž tvoří kompozit. Díky tomuto spojení získají nové pozměněné vlastnosti. Kompozity zvyšující mechanickou stabilitu bývají označovány jako tvarově stabilní. Aby byly zachovány vlastnosti kompozitu, musí být velikost struktur v kompozitu mikroskopická. Tvar bývá udržován podporující strukturou, příkladem bývá spojení parafínu například s polyethylenem (HDPE). Díky tomuto spojení nedochází k úniku PCM ze struktury HDPE ani při vysokých koncentracích. Hlavní nevýhodou je však nízká tepelná vodivost. (24)

Dalším způsobem, jak zvýšit mechanickou stabilitu, je impregnace PCM do mechanicky stabilního porézního nebo nasákavého materiálu. Nevýhodou je, že PCM může negativně ovlivnit pevnostní charakteristiku daného materiálu. (25)

Na to, zda se PCM nabíjí a vybíjí rychle či pomalu, má vliv tepelná vodivost materiálu. Pro její zlepšení se jako přísada používá grafit nebo různé kovové pěny. (25)

## 1.6 Praktické využití a aplikace PCM materiálů

Oblast použití PCM materiálů je již dnes poměrně rozsáhlá. Uplatnění těchto materiálů lze nalézt v mnoha průmyslových odvětvích, ale i pro běžné komerční využití. Běžně se tyto materiály používají ve stavebnictví, logistice, zdravotnictví, energetice a mnoha jiných odvětvích. (27)

V následujících podkapitolách jsou uvedena různá odvětví, kde nachází PCM materiály uplatnění a vždy je vybráno několik typických aplikací v dané kategorii.

### 1.6.1 Lékařské aplikace

Mezi medicínské aplikace se řadí jakékoli aplikace v lékařském sektoru, ale také aplikace zaměřené na lidské tělo obecně, případně chladicí systémy s tímto spojené. Běžně sem řadíme výrobky, jako jsou tepelné polštáře pro fyzioterapii nebo revmatismus, přikrývky proti podchlazení, chladicí zábaly používané po operacích, dále třeba inkubátory, ohřívače nebo chladiče pro novorozence **Obr. 5**. Významnou úlohu hrají PCM materiály také ve skladování a přepravě zdravotnického materiálu, tzn. přeprava léků, vakcín, částí lidského těla jako je krev nebo orgány. (27)



**Obr. 5:** Aplikace PCM ve zdravotnictví (27)

### 1.6.2 Logistika a aplikace chladicích řetězců

Do této sféry patří aplikace, kde dochází k manipulaci se zbožím, které je citlivé na určitou teplotu, což zahrnuje jak přepravu, tak i skladování. Pro lepší představu více na **Obr. 6**. PCM materiály zde pomáhají udržovat zboží v požadovaném teplotním rozsahu při přepravě mezi místy. Patří sem tedy různé kontejnery umístěné na nákladním automobilu, chladničky, chladírny atd. (28)



**Obr. 6:** Využití PCM materiálů pro transport teplotně citlivých výrobků a zboží (27)

K udržení ideální teploty je zapotřebí dobré izolace, která co nejvíce sníží výměnu tepla s okolím. Teplo nebo chlad je dodáváno topným nebo chladicím zařízením předem nabitým PCM nebo kombinací obou. Tyto přepravní zařízení obsahující PCM nemají připojení k elektrické energii, přesto je lze použít i pro skladování. Mnohdy jsou používány jako záloha pro případ výpadku proudu, běžně v zemích s nízkou stabilitou sítě, jako je například Indie. Také slouží pro zvýšení účinnosti samotného elektrického chladiče. Podle testů provedených UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) a CII (Confederation of Indian Industries) poskytují takové mrazničky a chladiče tepelnou zálohu až 16 hodin při teplotě okolí 35 – 40 °C. Úspora elektrické energie se pohybuje mezi 20 a 25 %. Například v Indii je takhle mezi spotřebiteli provozováno přibližně 50 tisíc mrazniček a chladicích zařízení, která v sobě využívají technologii obsahující PCM. Což činí asi 2 % z celkového počtu aktivně používaných chladicích spotřebičů v domácnostech. (27)

### 1.6.3 Aplikace zaměřené na lidské tělo

Aplikace pro lidské tělo zahrnují především běžné oděvy, vybavení na spaní a ochranné oděvy. (27)

Pro snadnou integraci do běžných oděvů se používá mikroenkapsulovaný organický PCM. Ten bývá aplikován nátěrem, nebo je integrován přímo do vláken. Komerční produkty v této oblasti použití jsou k dispozici již řadu let. Používají se pro širokou škálu oděvů od spodního prádla až po svrchní oděvy, dále třeba do rukavic, čepic a dokonce i helem nebo bot. (27)

Kvalita spánku, pohodlí a určitá psychická pohoda je alfou a omegou pro odpočinek každého člověka. Zhoršená kvalita této základní lidské potřeby může být zapříčiněna pocením v horkém prostředí nebo naopak třesem v prostředí chladném. Z tohoto důvodu byly vyvinuty materiály obsahující PCM, které napomáhají regulaci tělesné teploty během spánku. Této technologie se využívá pro ložní prádlo, oblečení na spaní, spací pytle, dokonce i matrace. Opět je zde použit organický PCM, který je enkapsulovaný. (27)

Ochranné oděvy s různým obsahem PCM používají zejména složky IZS. Zde je kladen důraz zejména na maximální účinek PCM a dobu jeho trvání. Aby toho bylo dosaženo, používá se velké množství PCM pomocí makroenkapsulace. Většinou v podobě sáčků s organickým nebo anorganickým PCM uvnitř. (27)



**Obr. 7:** Využití PCM pro výrobky denní potřeby, zejména pro pohodlí jejich uživatelů (27)

#### 1.6.4 Další aplikace

Jednou z největších oblastí pro využití a aplikace PCM materiálů je stavebnictví, kterému se budu věnovat v samostatné kapitole.

Dále bych rád zmínil ještě některá využití PCM materiálů. Jednou z oblastí úspěšné aplikace je i automobilový průmysl, kde se PCM používají ke snížení emisí ze spalovacích motorů při startu za studena, kde kladně působí na pokles emisí CO<sub>2</sub> až o 64 %. (29) Jedním z dalších využití je rekuperace tepla z výfuku a chladicí kapaliny. Tato technologie je považována za slibnou, avšak potýká se s řadou nevýhod. Mezi tyto nevýhody patří nízká tepelná ovladatelnost a špatná tepelná skladovatelnost. Možnosti jak tyto nevýhody eliminovat jsou předmětem dalších studií. (30)

Uplatnění našly tyto materiály i při chlazení telekomunikačních zařízení, datových center a bateriových skříní či elektronických zařízení. Tato zařízení obsahují polovodičové součástky citlivé na teplo nebo naopak na chlad. Patří zde i notebooky a podobná zařízení. (27)

Neméně důležité je pak využití v energetice. Uplatnění si tyto materiály našly v solárních kolektorech, ale také v atomových elektrárnách. (31) Pro atomové elektrárny byly navrženy vhodné materiály s vysokoteplotními PCM, které by mohly být zvažovány jako zlepšení pasivních bezpečnostních prvků například při ztrátě chladicí kapaliny. Jedním z nich by mohla být kyselina oktadekanová, která je slibným kandidátem PCM. Tato kritéria splňuje díky svému vhodnému chování při změně fáze s teplotou přechodu 70 °C a vysokým latentním teplem 221 J/g. (32)

Ve zveřejněných údajích však byly shledány značné nedostatky a další zkoumání odhalilo v několika případech závažné zkreslení. Tento materiál tedy bude i nadále zkoumán jestli bude možné ho využít pro tuto aplikaci.



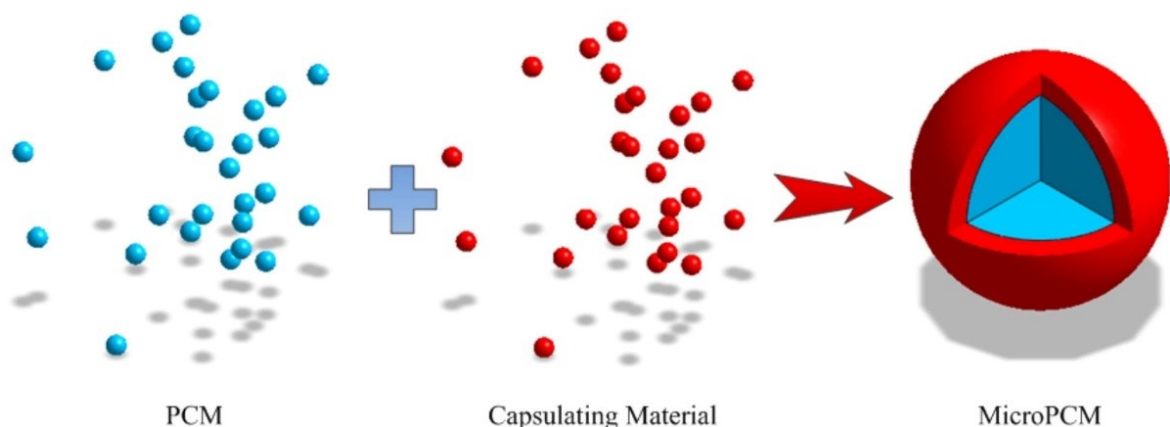
## 2 METODY VÝROBY, ZAČLENĚNÍ PCM DO STRUKTURY MATERIÁLŮ

PCM materiály se používají v zapouzdřené podobě, ale také existují aplikace, kde je přímo tepelný zásobník vyplněn PCM. Zde však musí být teplo přiváděno/odváděno pomocí tepelného výměníku. Nevýhodou přímého použití PCM je případná reakce s materiály v akumulární soustavě nebo znečištění životního prostředí. Jakmile se PCM dostane do kontaktu s jinými látkami, může docházet ke změně jeho chemického složení. Z tohoto důvodu je nutné vyrábět pouzdra z materiálů, které jsou k PCM chemicky netečné a mají dobrou tepelnou vodivost. Pro taková pouzdra jsou vhodné zejména kovy nebo plasty. Proto v praxi převažují PCM v zapouzdřené podobě. Toho se docílí mikro nebo makro enkapsulací. (10)

Mnoho výzkumníků zkoumalo různé metody, jak zvýšit nebo udržet výkon PCM a jednoznačně se shodují, že začlenění PCM do struktury materiálu je zcela zásadní. Takové pozitivní začlenění zachovává tepelné vlastnosti PCM a umožňuje jim vyhýbat se potenciálně nestabilním změnám. S oblibou se využívají dva způsoby zabudování, první je označován jako zapouzdření a druhý jako stabilizace tvaru. (33)

### 2.1 Mikroenkapsulovaný PCM (MicroPCM)

Na Obr. 8 vidíme schéma výroby MicroPCM. Metod, jak toho dosáhnout, existuje více. Jednou z možností je zapouzdření parafínu nanofibrilami acetylované celulózy (AcCNF). Suspenze parafínu a AcCNF lze magneticky míchat rychlostí 500 otáček za minutu po dobu 20 minut při 80 °C a různých hmotnostních poměrech. Takové koloidní suspenze parafín – AcCNF mají velkou fyzikální a tepelnou stabilitu. Latentní teplo a měrné teplo je o něco nižší než u čistého PCM. (33)

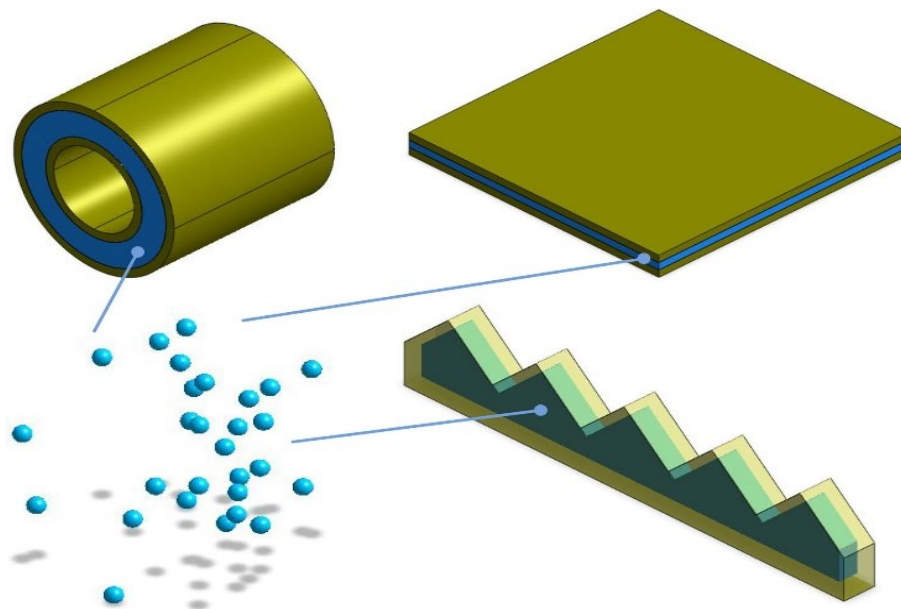


Obr. 8: Schéma mikroenkapsulace v PCM (33)

## 2.2 Makroenkapsulovaný PCM (MacroPCM)

Makroenkapsulace **Obr. 9** na rozdíl od mikroenkapsulace probíhá v makroměřítku. Z tohoto důvodu existuje mnohem více možností a prostoru pro různá makrozapouzdření. Za speciální makroenkapsulace lze pak označit výzkumy, kde se PCM vkládá mezi různé vrstvy struktury se zaměřením na tepelný tok a úsporu energie s výjimkou mechaniky. (33)

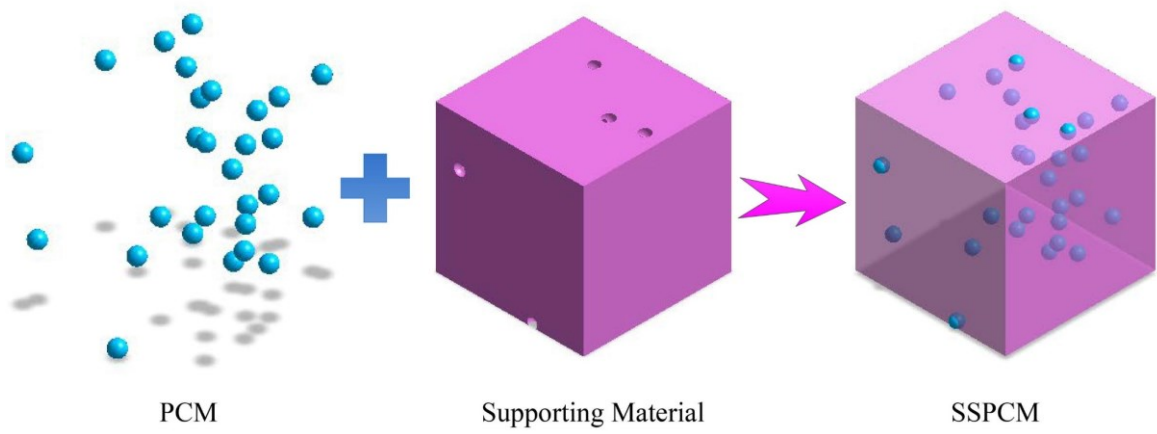
Srovnáme-li Micro a Macro PCM, tak základní rozdíl je v obsahu PCM. V MacroPCM je obsah PCM extrémně vysoký, to je z důvodu lepší kontrolovatelnosti celého procesu. Dalším rozdílem je také fakt, že se MacroPCM často využívá jako nezávislá struktura pouze pro tepelnou regulaci, zatímco MicroPCM se míchá se stavebními materiály, což má vliv na materiál matrice. Aplikace MacroPCM silně spoléhá na specifickou strukturu, která ovšem není ideální pro komerční procesy. Naopak použití MicroPCM je podobné konvenčnímu aditivu, které je vhodné pro hromadnou výrobu a univerzální použití. (33)



**Obr. 9:** Schéma makroenkapsulace v PCM (33)

## 2.3 Tvarová stabilizace PCM (SSPCM)

Stabilizace tvaru je další užitečnou technikou, jak začlenit PCM do struktury materiálu. PCM se impregnuje do nosného materiálu **Obr. 10**. Aplikáční metoda je podobná jako u MicroPCM. Aby nedocházelo k prosakování a nosný materiál měl vysokou míru absorpce, musí mít nosný materiál porézní strukturu. Nejrozšířenějšími zpracovatelskými metodami jsou vakuová impregnace a tavná impregnace. (34)



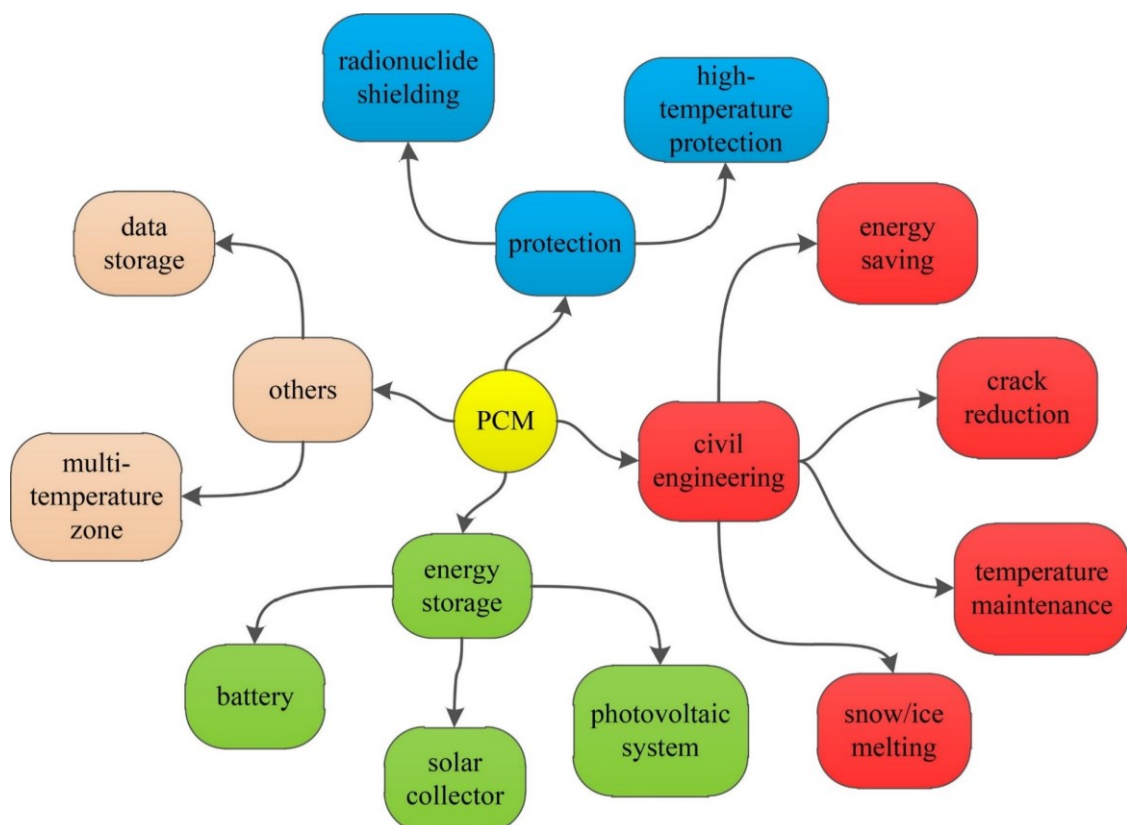
**Obr. 10:** Tvarová stabilizace v PCM (33)

### 3 APLIKAČNÍ POTENCIÁL PCM VE STAVEBNICTVÍ

Celosvětová spotřeba energií neustále roste, což je samozřejmě velký problém pro udržitelnost. Z tohoto důvodu se hledají metody, postupy a nové technologie, jak tuto spotřebu minimalizovat. Ve stavebnictví jsou navrhovány a následně zaváděny koncepty, jako je využití solární energie, akumulace tepelné energie a samozřejmě se hledají a vyvíjí nové lepší materiály pro izolaci nebo přímo modifikovaný beton ad. PCM zastává důležitou úlohu v mnoha ze zmíněných technologií. (35)

Očekávanými výhodami PCM je stabilní teplota a úspora energie. Zjistilo se, že základní vlastnost PCM, tepelná regulace, má mnohem širší možnosti využití. Tyto materiály prokázaly své skvělé vlastnosti v různých aplikacích a oblastech využití. Byly a jsou to následující aplikace jako: stínění radionuklidů, Li-ion baterie, solární ohřívač vody, fotovoltaický/vodní systém, chytrý fotodetektor, přepisovatelné optické úložiště dat, víceplotní zónový inkubátor, systém tepelné ochrany nebo vakuový trubicový solární kolektor. (33)

Široký rozsah aplikací PCM těží z neustále nových výzkumů a průzkumů potenciálu, jak lze vidět na **Obr. 11**. V pozemním stavitelství je nejzajímavějším tématem úspora energie při regulaci teploty v místnosti. (33)



**Obr. 11:** Ukázky PCM aplikace v různých odvětvích (33)

### 3.1 Aplikace pro akumulaci tepla v budovách

Ve stavebnictví je tepelná regulace budov na prvním místě. Každá konstrukce má různou strukturu a funkci, takže je vždy k dispozici několik aplikačních režimů pro úsporu energie. Je obecně známo, že tepelné chování PCM je ovlivněno oscilací teploty vnějšího prostředí, kterou nelze řídit. Ačkoliv bylo navrženo několik univerzálních metod, úspěšné použití aplikací závisí na různých faktorech. (33)

Za stavební aplikace lze označit jakoukoliv aplikaci v budově **Obr. 12**, konkrétně pro vytápění, chlazení a dodávku teplé užitkové vody. Tyto aplikace se dále dělí na pasivní a aktivní. Stavební materiály s PCM uvnitř jejich struktury jsou nejnámější pasivní aplikací PCM v budovách. Integrovaný PCM zvyšuje schopnost akumulace tepla. Jakmile teplo stoupne nad teplotu fázové změny, teplo je absorbováno PCM ve stavebním materiálu, čímž se ochlazuje vnitřek budovy, dokud se PCM zcela nerozpustí. Pokud teplota budovy klesne pod teplotu změny fáze, tak ji PCM ohřeje. Výhodou takových materiálů je, že automaticky tlumí teplotní výkyvy v budově a děje se tak bez jakékoli spotřeby energie či dalších přídatných zařízení. Běžně se používá pro takové účely mikroenkapsulovaný, organický PCM. (25)

Oproti tomu v aktivní aplikaci je akumulace nebo výdej tepla aktivně řízen přídatnými zařízeními, což mohou být ventilátory nebo čerpadla, které pohybují teplotním médiem. (27)



**Obr. 12:** Různé aplikace PCM v budovách (33)

#### 3.1.1 PCM v technologiích pro podlahové vytápění

Jsou to speciální systémy pro vytápění prostor **Obr. 13**. Běžné systémy podlahového vytápění fungují na principu proudění horké vody nebo vzduchu, který proudí potrubím v podlaze. Přes podlahu, kterou teplo ohřívá, proudí volnou konvekcí do

prostoru nad ní. V PCM integrovaných systémech podlahového vytápění má PCM za úkol zvyšovat schopnost akumulace tepelné energie. (27)



Obr. 13: Podlahové vytápění (PCM Technology) (27)

### 3.1.2 Aplikace ve stěnách budov

Stěna je považována za nejdůležitější část budovy pro regulaci energie. Existuje celá řada studií, které se zabývaly optimální aplikací PCM ve stěně. Za velmi zajímavou považují studii s názvem *Integrace PCM do stěn z dutých cihel: Směrem k úsporám energie v oblastech Středomoří* od autorů Hamidi a kol. (36)

Autoři se zde zaměřili na PCM materiály v aplikacích opláštění budov. Jako reprezentativní vzorek bylo vybráno 8 měst ze středomořského regionu – Al Hoceima (Maroko), Malaga (Španělsko), Marseille (Francie), Taher (Alžírsko), Neapol (Itálie), Tripolis (Libye), Ankara (Turecko) a Port Said (Egypt). Zkoumala se energetická náročnost tří typů budov – rodinné, veřejné a hotelové. Tyto budovy byly postaveny z dutých cihel s PCM a bez nich. Byl použit numerický model založený na zdánlivé tepelné kapacitě. V této studii byl zvolen široký rozsah teplot tání PCM od 22 °C do 32 °C. (36)

Z dostupných výsledků bylo zjištěno, že klima velmi ovlivňuje proces skladování/uvolňování PCM. Ve městech na severovýchodě Středomoří dosahovaly úspory energie za pomoci PCM s teplotou tání 26 °C až 56 % a to bez ohledu na typologii budovy. Oproti tomu u měst na jihovýchodě nebyly zaznamenány žádné úspory energie. (36)

Tyto závěry potvrzuje mnoho dalších studií. Dle dosažených výsledků, použití PCM ve stěnách budov nevede vždy ke snížení spotřeby energie a navíc nesprávné použití může vést naopak ke zvýšení spotřeby energie. Tato tvrzení jsou však velmi závislá na místním klimatu a zeměpisné šířce. Zmíněné atributy prokazatelně

ovlivňují množství tepelných zisků během chladící sezóny a tepelných ztrát během topné sezóny. (35)

### 3.1.3 Aplikace PCM v okenním systému

V článku *Simulační studie dynamického přenosu tepla skleněného okna plněného PCM s různými termofyzikálními parametry materiálu s fázovou změnou* od Zhong a kol. byla provedena experimentální měření za typických slunečných, ale i deštivých letních dnů. Autoři studie zde použili různé druhy oken plněných PCM. Byl měřen tepelný tok a teplota vnitřních povrchů okna z dutého skla a skel s obsahem PCM, který byl naplněn parafínem (MG29). (37)

Provedená měření ukazují, že maximální teploty na vnitřním povrchu dutého skla byly o 2,6 °C a 2 °C vyšší než u skel s použitím PCM. Okna s obsahem PCM snížily v konečném výsledku teplo vstupující do budovy o 18,3 %. (37)

### 3.1.4 Chladící stropy

Chladící stropy jsou speciálním typem systému chlazení prostor. Fungují na principu protékající vody, která je umístěna v potrubí umístěných ve stropě. Volnou konvekcí dochází k ochlazení prostor pod chladícím stropem. Takové stropy mají obvykle zanedbatelnou kapacitu pro uchování chladu. Avšak při integraci PCM do stropu místnosti se tato schopnost značně zvyšuje. Tímto způsobem lze využít chladný venkovní vzduch, který je v noci, na chlazení prostoru ve dne, kdy jsou teploty vysoké. (27)

Takových klimatických podhledů nebo indukčních jednotek využívajících PCM se běžně užívá v kancelářských budovách. (27)

Podhledy pro podlahové vytápění a chlazení s PCM mohou být pasivní nebo aktivní aplikací. Pokud je úložiště umístěno jinde než je centrální místnost pro vytápění nebo chlazení, pak musí být teplo transportováno ventilátory nebo čerpadly, čímž se tato aplikace stává aktivní. (27)

### 3.1.5 Aplikace pro střechu

V článku *Experimentální vyhodnocení optimální polohy kompozitní střechy s makroenkapsulovaným materiálem s fázovou změnou za horkých klimatických podmínek* autoři Al-Yasiri a Szabó zkoumali optimální umístění PCM v kompozitní střeše. Střecha složená z Isogamu (4 mm), betonu (50 mm) a sádrokartonu (8 mm) byla modelována na typické klimatické podmínky v oblasti Iráku. Celkem byly testovány 4 různé modely střech: model A představoval referenční střechu, další obsahovaly PCM materiál. V modelu B byl PCM umístěn mezi Isogamem a betonem, v modelu C byl použit PCM uprostřed betonu a pro model D bylo jako umístění PCM zvolen prostor mezi betonem a sádrokartonovou deskou. (38)

Vliv PCM vrstvy v daných polohách byl testován pomocí sady indikátorů založených na teplotě místnosti a vnitřního povrchu střechy proti průměrné venkovní povrchové teplotě. (38)

Z dosažených výsledků bylo možné vyvodit hned několik zajímavých závěrů:

- Díky PCM materiálu a jeho potenciálu akumulace tepla lze výrazně snížit pokojovou teplotu. Největšího maximálního snížení pokojové teploty bylo dosaženo v **modelu B**, kde pokles byl až 9 °C.
- PCM s vysokou teplotou tání nejlépe pracuje při vyšších venkovních teplotách a jeho tepelné akumulace lze efektivně využít.
- Umístění vrstvy PCM blízko vnitřního prostředí vykazuje nejhorší tepelné chování oproti jiné poloze blízko vnějšího prostředí.
- Obecně všechny vypočítané indikátory (tj. snížení maximální teploty v místnosti, průměrné snížení maximální teploty, faktor snížení, časové zpoždění a snížení tepelného toku) ukázaly, že nejlepší tepelné chování vrstvy PCM bylo získáno v **modelu B**.
- Umístění PCM uprostřed hlavní vrstvy střechy (**model C**) má také dobré tepelné chování ve srovnání s umístěním v interiéru (tj. **model D**). Instalace v této poloze však může ovlivnit mechanickou pevnost střechy, protože by měla být součástí hlavní střešní vrstvy během instalace. (38)

### 3.1.6 Aplikace v sádrokartonových deskách

Sádra je hojně používaným stavebním materiálem a je zároveň dobrým základním materiálem pro začlenění PCM za účelem snížení teplotní zátěže v místnosti. V článku *Tepelné hodnocení laminovaného kompozitního sádrového materiálu s fázovou změnou za dynamických podmínek* autoři Zhou a kol. testovali tepelný výkon laminovaných kompozitních sádrokartonových desek s PCM. (39)

Výzkum byl prováděn za dynamické teploty řízené klimatickou komorou. Teoretické studie zahrnovaly analýzu různých tloušťek vrstev PCM a jejich rychlosti přenosu tepla. Za účelem experimentální studie byla zvolena laminovaná sádrokartonová deska o tloušťce vrstvy PCM 4 mm. Pro vyhodnocení její tepelné účinnosti byla PCM sádrokartonová deska začleněna do modelové místnosti a srovnávána proti běžné sádrokartonové místnosti za stejných podmínek prostředí. (39)

Deska se 4 mm vrstvou PCM vykazovala vysokou tepelnou výměnu až 15,6 W/m<sup>2</sup> a velkou akumulaci energie až 363,7 kJ/m<sup>2</sup>. Tato schopnost způsobila snížení teploty o 3,2 °C ve srovnání s tradiční sádrokartonovou deskou. (39)



### 3.2 Solární systémy a tepelné zásobníky

Solární energie patří mezi obnovitelné zdroje energie a je považována za budoucí zdroj zelené energie, která by mohla nahradit alespoň z části fosilní paliva. Nevýhodou tohoto slibného zdroje energie je účinnost a výkon aktuálních solárních systémů a technologií. (35)

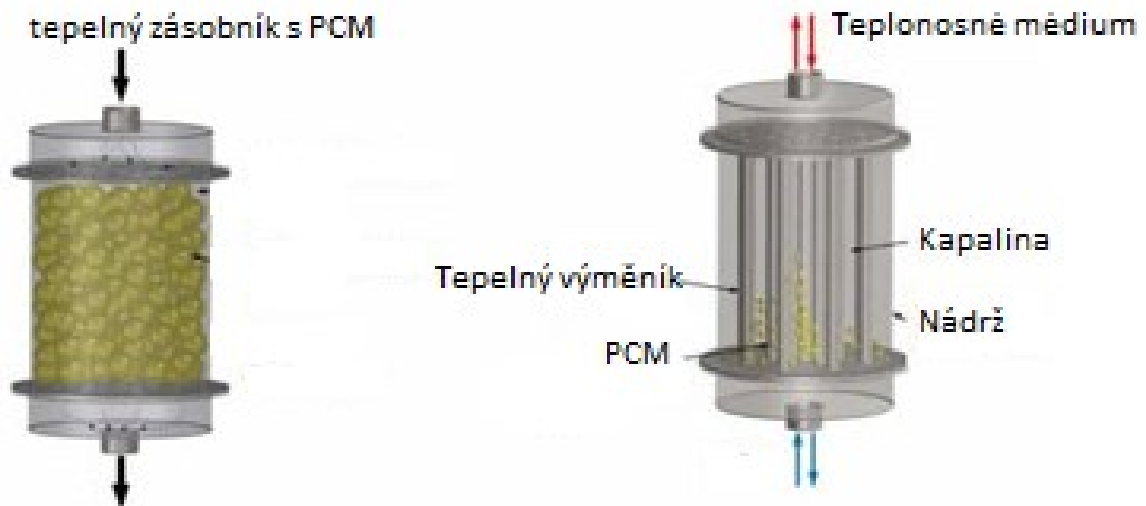
PCM se v solárních systémech doposud ukazoval velmi slibně a je již používán v široké řadě aplikací. Patří sem například solární systém pro ohřev vody nebo fotovoltaické/tepelné systémy. (35)

Klasické solární systémy jsou závislé na slunečním svitu. Střídání dne a noci, ročního období a s tím spojené klimatické podmínky mají vliv na množství a intenzitu slunečního záření. Je tedy nutné ukládat solární energii pro pozdější využití, kdy je slunečního záření nedostatek. Toho lze dosáhnout za pomoci PCM. (35)

Solárně-tepelná energie je obecně uložena ve formě ohřáté vody (citlivé teplo). Materiál PCM absorbuje teplo během cyklu změny fáze z pevného na kapalné, což se děje během denního slunečního cyklu. Množství tepla, které může nádrž s vodou absorbovat, je díky PCM mnohem vyšší. Většinou se používá pro tyto účely netoxický a nehořlavý, anorganický PCM. Ten následně bývá zapouzdřen v 50 – 100 mm polypropylenových nebo polyethylenových kuličkách s vysokou hustotou. Tyto kuličky se přidávají do izolovaných atmosférických zásobníků vody. (10)

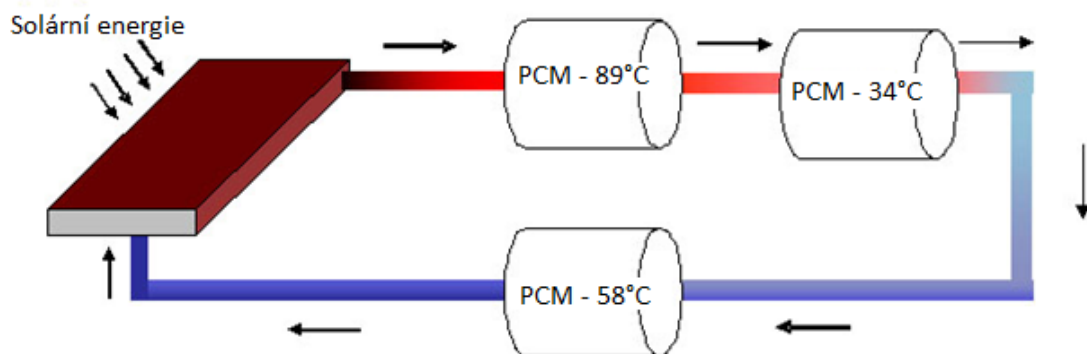
PCM pracuje od 52 °C do 63 °C s teplotou změny fáze 55 °C až 59 °C. Latentní teplo uložené do vody udržuje teplotu po delší dobu a také předehřívá studenou vstupní vodu během nepřítomnosti slunečního tepla. Zároveň PCM stabilizuje kolísání teploty vody v systému. (10)

Jedna z takových konstrukcí zásobníků od společnosti Hangzhou Phase Change Technology je na **Obr. 14**.



**Obr. 14:** Konstrukce zásobníků společnosti Hangzhou Phase Change Technology (10)

Na trhu jsou k dispozici pouzdra zásobníků různých průměrů a s různými náplněmi PCM. Můžeme tak sestavit okruh několika zásobníků s různou teplotou tání PCM a zvýšit tak účinnost soustavy, viz. **Obr. 15**.



**Obr. 15:** Řazení zásobníků v solárním okruhu (10)

### 3.3 Další použitelné aplikace ve stavebnictví

Běžně se v praxi preferují a nejčastěji používají materiály na bázi cementu nebo sádry. Tepelné vlastnosti těchto stavebních materiálů mají předpoklady pro vylepšení technologií PCM. (40)

Pro běžné stavby často bývá problém tvorba trhlin ve struktuře použitého betonu, což může vážně ovlivnit strukturální bezpečnost. Při vytvrzování cementu je generováno a odváděno hydratační teplo, což má za příčinu změnu objemu

a následný vznik trhlin. Z tohoto důvodu je do struktury integrován PCM, který snižuje množství a pravděpodobnost vzniku trhlin ve struktuře betonu. (40)

Této vlastnosti bylo využito i při výstavbách vozovek. Během změny ročních období, které jsou spojeny s růstem nebo naopak poklesem teplot, dochází k cyklům zmrazování a rozmrazování. Led a sníh na vozovce představují problém pro bezpečnost provozu, kde konvenční metody tání mohou vozovku poškodit. Z těchto důvodů se do vozovky začleňuje PCM. (40)

V různých oblastech USA byla zkoumána účinnost PCM ve vozovkách. Bylo použito  $170 \text{ kg/m}^3$  PCM, kde ve 122 z 210 zkoumaných měst výsledky prokázaly, že PCM zkrátil dobu a hloubku zamrzání alespoň o 10 % a to především ve východních, středních a severozápadních oblastech. (40)

### 3.4 PCM stavební produkty vyskytující se na trhu

PCM ve stavebnictví se nejvíce využívají pro tepelně akumuláční vlastnosti sádrokartonových desek a tvárnic z pórobetonu nebo při aplikaci samotných PCM neprodyšně uzavřených v obalech různých velikostí, tvarů a materiálů. (2)

#### 3.4.1 Micronal PCM

Jedná se o parafínový vosk zapouzdřený do mikrokapslí. Vyrábí jej společnost BASF SE. Tento materiál byl řešením pro předchozí používané materiály, kde kapalná fáze PCM difundovala kompozitem k povrchu a způsobovala nežádoucí konstrukční a mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu se přistoupilo k zapouzdření PCM a tím se zabránilo difúzi kapaliny skrze póry. Micronal PCM se dodává ve třech různých teplotách a to 21, 23 a 26 °C. (2)

Tento materiál se může využít ve formě kapalné disperze s obsahem cca 40 % mikrokapslí nebo v práškové formě s obsahem 100 % mikrokapslí. Uplatnění pak nachází jako interiérová omítka, tvárnice z pórobetonu nebo do sádrokartonových desek. (2)

#### 3.4.2 Pórobetonové tvárnice CelBloc Plus

Tyto tvárnice jsou nejvýznamnějším druhem odlehčeného betonu. Typické pro tento beton jsou makropóry vytvořené v jemnozrné maltě. Pórobeton je vhodný pro pasivní stabilizaci teploty, proto se společnost H+H (přední evropský výrobce pórobetonových tvárnic) rozhodla spolupracovat se společností BASF SE a společnými silami vyvinuli tvárnice CelBloc Plus, které v sobě obsahují příměs Micronal PCM. (41)

### 3.4.3 Systém Glass X

Jedná se o víceplášťový skleněný panel připomínající a fungující jako okno. Součástí zasklení panelu je 2 až 4,5 cm silná vrstva PCM (Delta Cool 28) uzavřená do komor průhledné desky. Tyto panely jsou montovány jako fasádní plášť a slouží jako neotvíratelná okna. Průhlednost je zaručena v obou případech, když je PCM roztaven, i když je ztuhlý. (2)

### 3.4.4 Systém Delta Cool

PCM je neprodyšně uzavřen v obalech různých velikostí a tvarů. Většinou se jedná o ploché sáčky sdružené do větších montážních rohoží či panelů. Ve srovnání s jinými technologiemi je PCM univerzálnější, intenzivnější a lze jej nasadit prakticky v libovolném množství. (41)

Od roku 2009 se přešlo na zapouzdření do plastových desek z důvodu větší ochrany proti poškození. Sáčky byly náchylné k mechanickému poškození. Jako PCM plnivo se využívá hexahydrát chloridu vápenatého. (2)

Systém se používá jako chladič umístěný ve stropu nebo stěnách za účelem stabilizace vnitřní teploty budovy **Obr. 16.** (41)



**Obr. 16:** Systém Delta Cool v praxi (41)

## 3.5 Shrnutí a další vývoj PCM

Materiály s fázovou změnou, zkráceně PCM, jsou velmi slibnou možností pro skladování tepelné energie nebo naopak chladu. V některých oblastech využití je

PCM již standardem, používá se v široké škále komerčních produktů. Pro některé jiné aplikace je jeho využití stále ve fázi zkoumání a testování. (27)

V současnosti jsou PCM volně ložené nebo zapouzdřené běžně k dostání od mnoha výrobců a v požadované kvalitě, což v 90. letech minulého století, kdy se datuje počátek komerčního využívání těchto produktů, nebylo zdaleka samozřejmostí. V dnešní době nejen firmy, ale i výzkumné skupiny na univerzitách studují a zkoumají nové možnosti využití PCM v nových aplikacích. (27)

Ve stavebnictví se PCM ukázaly jako velmi výhodné, přesto stále existuje velký prostor pro zlepšení a nápravu mnoha nedostatků. Za zmínku určitě stojí problém vlivu materiálu a tepla na konstrukce, dále třeba hořlavost u organických PCM nebo korozivní účinky či přechlazení u anorganických PCM. (33)

Jelikož je stále větší a větší poptávka po nových technologiích s obsahem PCM, tak budou vznikat i nové studie zabývající se problémy, které jsou s tím spojeny. (33)

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 POUŽITÉ VSTUPNÍ MATERIÁLY, PŘÍSTROJE, METODY MĚŘENÍ

V praktické části diplomové práce bylo cílem vyrobit a charakterizovat připravené PCM materiály pro praktické využití ve stavebnictví.

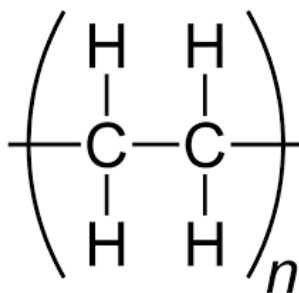
### 4.1 Použité vstupní materiály

Použil jsem 4 různé chemikálie, které jsem vzájemně zamíchal v určitých koncentracích mezi sebou. Těmito látkami byl polyethylen (LDPE) – LD 100BR, vosk (parafín) – RT 35HC, grafit (0,025 mm) a nZ-BOCH 01 (ZnO-BOCH\_01).

#### 4.1.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen je nejpoužívanějším polymerem na světě. Patří do skupiny termoplastů a vzniká polymerací ethenu. Rozlišujeme dva základní druhy PE. Prvním typem je LDPE – nízkohustotní polyethylen (**low-density polyethylene**) a druhým pak HDPE – vysokohustotní polyethylen (**high-density polyethylene**). (42)

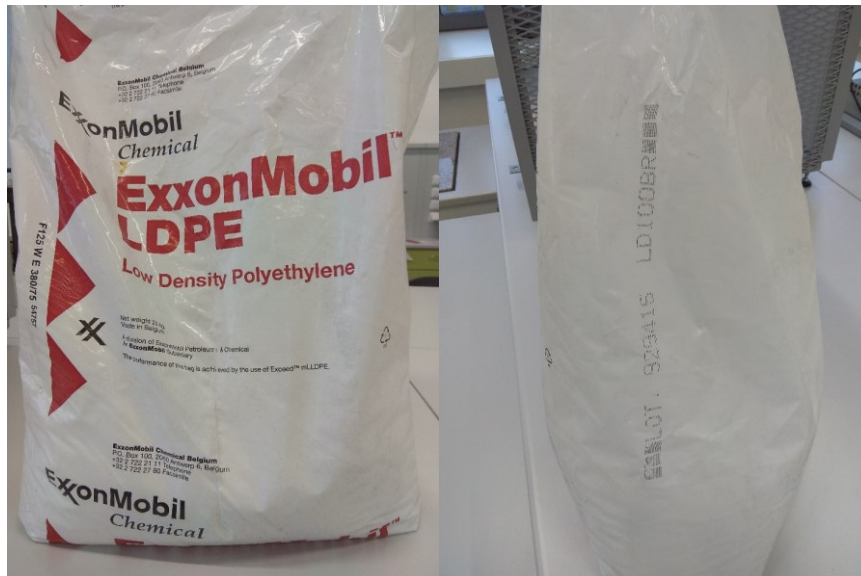
Strukturní vzorec polyethyleny na **Obr. 17**.



**Obr. 17:** Strukturní vzorec polyethyleny

Tento termoplast se stal velmi oblíbeným a vyhledávaným materiálem, především díky svým užitným vlastnostem, širokému spektru využití a nízké ceně. Mezi jeho přednosti patří mimořádná chemická odolnost, výborné elektrické vlastnosti, nenasákavost, mrazuvzdornost, použitelnost v extrémně nízkých teplotách, odolnost proti vzniku a šíření napěťových trhlin nebo dlouhá životnost. (42)

Ve své práci jsem použil LDPE typ LD 100BR **Obr. 18**, který je netoxický a bez zápachu, dlouhodobě snese teploty 80 °C, krátkodobě až 95 °C. Jeho hustota je 0,915 – 0,925 g/cm<sup>3</sup>, krystalický podíl 50 – 70 %, má rozvětvenou strukturu a vyrábí se radikálovou polymerací za vysokého tlaku. Teplotu tání má (T<sub>m</sub>) = 105 – 115 °C, modul pružnosti se nachází v rozmezí E = 200 – 400 MPa a mez pevnosti 9 – 15 MPa. (43)



Obr. 18: Použitý LDPE typ LD 100 BR

#### 4.1.2 Vosk (parafín)

Patří mezi nasycené uhlovodíky mající lineární uhlíkový řetězec. Není rozpustný ve vodě a není ani toxický. Parafíny jsou velmi hořlavé, jejich tepelná vodivost je nízká. (14)

Parafínové vosky bývají nejčastěji bílé krystalické látky, jejichž teplota tání bývá v rozmezí od 45 °C do 65°C. Vosky od firmy Rubitherm, které jsme používali my, mají rozsah teplot tání mezi -10 °C a 90 °C. Hodnota tepelné kapacity má hodnotu v rozmezí 2,1 – 2,9 kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a hodnota měrného skupenského tepla se pohybuje okolo 210 kJ.kg<sup>-1</sup>. (2)

Pro moji práci byl použit typ RT 35HC Obr. 19.



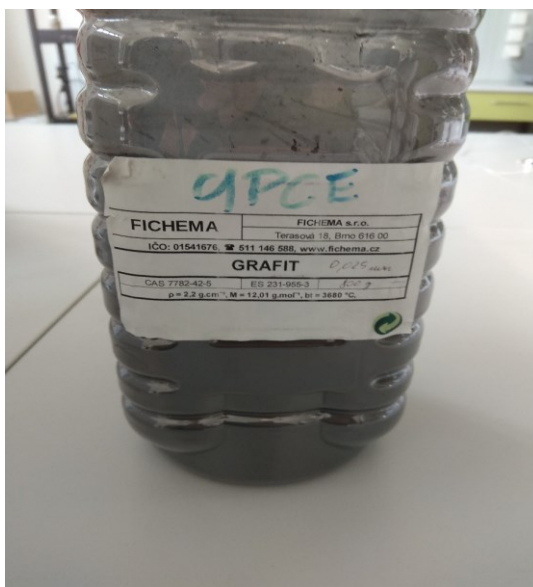
Obr. 19: Použitý typ vosku, typ RT 35HC



### 4.1.3 Grafit

Grafit **Obr. 20** je nejrozšířenější modifikací uhlíku vyskytující se v přírodě. Barvu má světle i tmavě ocelově šedou, někdy úplně černou. Je neprůhledný, s kovovým nebo matným odleskem. Má dobrou elektrickou i tepelnou vodivost a vyniká značnou stálostí v kyselinách i loužích. Chemicky se jedná o téměř čistý uhlík. (44)

Taví se při 2800 °C, bod varu má při teplotě 4250 °C, je chemicky velmi odolný, hustotu má v rozmezí 2,1 – 2,3 g.cm<sup>-3</sup> a na stupnici tvrdosti je jeho typická anizotropní tvrdost 1 – 1,5. (44)

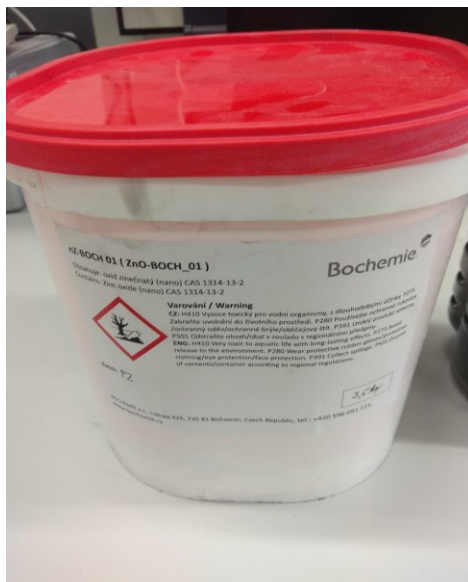


**Obr. 20:** Použitý grafit

### 4.1.4 nZ-BOCH 01 (ZnO-BOCH\_01)

Nano oxid zinečnatý ve formě bílého prášku **Obr. 21** se používá jako funkční aditivum v nátěrových hmotách, lacích, opalovacích krémech, plastech apod. Jako plnivo se přidává za účelem prodloužení životnosti a zvýšení účinnosti daného výrobku. Dále má antimikrobiální, vulkanizační, antikorozi a fotokatalytické vlastnosti. (45)

Nano ZnO má extrémně vysoký povrch, tudíž technologie, které obsahují tento nano oxid, jsou šetrné k životnímu prostředí a řadí se mezi nejpokročilejší nanomateriály. (45)



Obr. 21: Bílý, krystalický nano nZ-BOCH 01 (ZnO-BOCH\_01)

## 4.2 Pracovní postup

Pro přípravu pracovních vzorků jsem použil laboratorní dvoušnekový mikrohnětič DSM Xplore Obr. 22. a ruční lisy Obr. 23.



Obr. 22: Laboratorní dvoušnekový mikrohnětič DSM Xplore



**Obr. 23:** Ruční lis na lisování destiček

Na dvoušneku jsem nejprve míchal LDPE typ LD 100BR s voskem (parafínem) RT 35HC. Dobu míchání každého pracovního vzorku jsem stanovil na 5 minut při teplotě 130 °C a otáčkách šneků 50 – 70 ot/min. dle potřeby.

Připravil jsem vzorky **Tab. 2** v hmotnostních koncentracích LDPE/vosk – 100/0 – 90/10 – 80/20 – 70/30 – 60/40 – 50/50. V další sérii jsem připravil dvě sady vzorků, které obsahovaly kromě dvou zmíněných látek ještě plnivo v koncentraci 10 hm. %. V první sadě jsem použil grafit o velikosti částic 25  $\mu\text{m}$  a ve druhé potom nZ-BOCH 01(ZnO-BOCH\_01). Obě tyto sady byly připraveny v koncentracích PE/plnivo/vosk – 50/10/40 – 40/10/50 – 30/10/60.

**Tab. 2:** Připravené vzorečky a jejich hmotnostní koncentrace v %

Připravené vzorečky		
PE/vosk (hm. %)	PE/ZnO/vosk (hm. %)	PE/grafit/vosk (hm. %)
100/0	50/10/40	50/10/40
90/10	40/10/50	40/10/50
80/20	30/10/60	30/10/60
70/30		
60/40		
50/50		

Z takto vytlačených vzorků jsem poté vylisoval destičky. Lisování jsem provedl na ručním lisu při 130 °C

## 4.3 Metody měření

### 4.3.1 Použité přístroje

Pro určení termofyzikálních vlastností a co nejdůkladnější charakterizaci vzorků jsem použil následující přístroje:

- Sušárna Binder FD 53
- Váha semimikro Radwag XA 82/220.R2
- Rotační reometr Anton Paar MCR 502
- Analyzátor tepelné vodivosti model TCI-3-A
- Termogravimetrický analyzátor TGA Q500-0299
- Dynamicko mechanický analyzátor Mettler Toledo DMA 1
- Diferenciální skenovací kalorimetr Mettler Toledo DSC 1
- Skenovací elektronický mikroskop Phenom Pro

### 4.3.2 Tepelná stabilita (leaching)

Tepelná stabilita je definována jako schopnost materiálu odolávat působení tepla a zachovat si své vlastnosti, jako je pevnost, houževnatost nebo elasticita při dané teplotě. Tepelná stabilita polymeru velmi závisí na jeho chemické struktuře, stupni krystalinity a molekulové hmotnosti. (46)

### 4.3.3 TGA – termogravimetrická analýza

Tato metoda má podobně široké uplatnění jako DSC, DMA a TMA. Při měření TGA se měří hmotnost vzorku během jeho zahřívání nebo ochlazování v atmosféře s předem stanovenými vlastnostmi. Hlavním cílem TGA je charakterizovat materiály s ohledem na jejich složení. Z této metody lze zjistit fyzikální a chemické vlastnosti materiálu v závislosti na teplotě. Tyto informace jsou cenné zejména pro kontrolu kvality, výzkum a vývoj. V praxi se využívá pro studium polymerů, potravin, léčiv atd. (47)

### 4.3.4 SEM – skenovací elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie slouží k poskytnutí informací o topografii a morfologii materiálu. Oproti světelné mikroskopii lze dosáhnout většího zvětšení a to až 100 000 krát, dále také větší hloubky ostrosti. Princip této metody spočívá v tom, že emitované elektrony dopadají na malou plochu vzorku, která je potažena tenkou vrstvou kovu, aby nedocházelo k tvorbě náboje na povrchu. Sekundární elektrony, které se odráží od vzorku, mají nižší energii než paprsek dopadající na vzorek. Jsou

charakteristické pro daný atom a jsou schopny nám dát informaci o obrazu povrchu vzorku. Pomocí elektronové mikroskopie lze také zkoumat krystalografii a chemické složení vzorku. (48)

#### 4.3.5 Reologické vlastnosti – rotační reometr (deska-deska)

Rotační reometr funguje na principu dvou ploch, z nichž jedna vykonává rotační pohyb (rotor). Stanovovaná látka se umístí mezi tyto plochy, též nazývané jako geometrie, kde je tento vzorek namáhán. Zde jsou měřeny otáčky a krouticí moment vyvolaný materiálem, který je umístěn mezi těmito deskami. Z těchto veličin je stanovena rychlost smykové deformace a smyková viskozita. (49)

Rychlostní spád je závislý na vzdálenosti desek –  $h$ . Smykové napětí získáváme z naměřeného krouticího momentu. (49)

Oscilační charakteristiky (fázový a ztrátový modul) vystihují míru elasticity a fluidity materiálu, která je měřena v závislosti na frekvenci a amplitudě oscilačního pohybu jedné z desek. (49)

#### 4.3.6 TCi – tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost látky vést teplo. Závisí na struktuře hmoty, její hustotě, vlhkosti, tlaku a teplotě. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí. Tepelná vodivost látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti. (50)

U polymerů je tato schopnost obecně nízká, v porovnání s kovy nižší o 2 až 3 řády. Špatná tepelná vodivost polymerů je příčinou delších výrobních cyklů, při nichž probíhá ohřev nebo chlazení. (50)

#### 4.3.7 DSC – diferenciální skenovací kalorimetrie

Diferenciální skenovací kalorimetrie, nebo též také diferenciální kompenzační kalorimetrie, slouží pro zkoumání tepelných vlastností materiálů. Zejména se používá pro určení teplot tání, skelných přechodů a krystalizací různých materiálů. Konkrétně to mohou být studie polymerů, emulzí, kinetiky reakcí či tepelné vodivosti materiálů. Teplotní rozsah přístroje se standardně pohybuje od  $-100$  do  $600$  °C. (51)

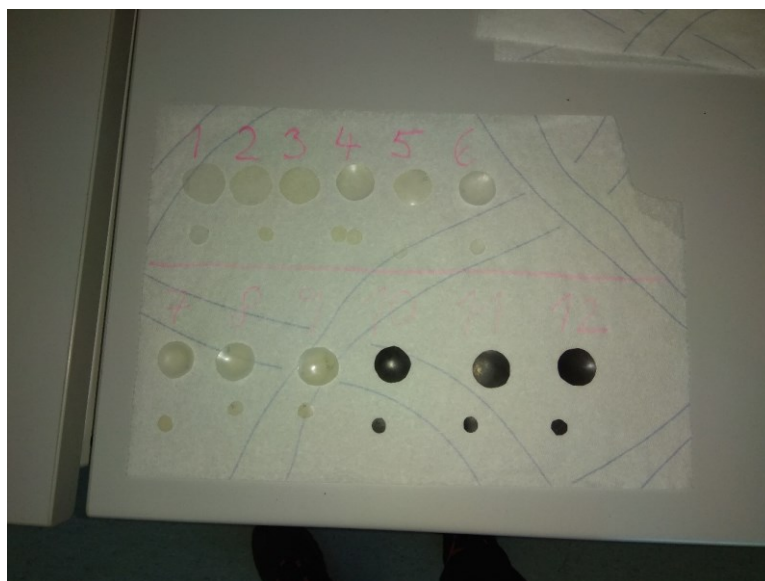
Metoda DSC měření spočívá v konstantní rychlosti ohřívání (chlazení) dvou nádob, z nichž jedna je prázdná (referenční) a ve druhé je umístěn vzorek. Řídící jednotka (počítač) neustále zjišťuje konstantní rychlost ohřevu obou vzorků po celou dobu experimentu, typicky  $10$  °C/min. Tím, že srovnáváme jednu nádobu, která je prázdná s druhou, ve které je vzorek, pak bude odlišný i tepelný tok do jednotlivých nádob. Je to způsobeno složením vzorku a fázovými změnami, které v něm probíhají. Měříme tedy rozdíl v tepelných tocích do jednotlivých nádob a tento údaj poté vynásíme do grafu proti teplotě. (51)

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

K charakterizaci PCM materiálů, které jsem si připravil, jsem zvolil několik hodnotících metod. Tyto metody hodnocení a charakterizace materiálu byly pečlivě vybrány tak, aby bylo možné určit a srovnat vzniklé změny v materiálech, ke kterým došlo při určitých podmínkách na ně působících a zároveň moci tyto materiály porovnat mezi sebou navzájem.

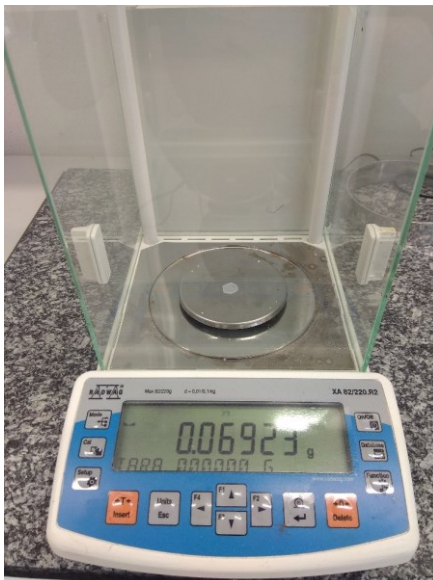
### 5.1 Tepelná stabilita (leaching)

Jako první charakterizaci pro připravené PCM pracovní vzorky jsem zvolil zkoumání teplotní stability. Pro toto stanovení jsem si z vylisovaných destiček vystříhl vzorky o velikosti přibližně kovové mince **Obr. 24**.



**Obr. 24:** Vystřížené PCM vzorečky ve tvaru mince pro stanovení tepelné stability

Takto připravené pracovní vzorečky jsem následně zvažil na vahách semimikro XA 82/220.R2. Hmotnost vzorků jsem stanovoval v čase 0 při běžné pokojové teplotě okolo 22 °C **Obr. 25**



**Obr. 25:** Používané váhy XA 82/220.R2 pro stanovení hmotnosti

Následně jsem zvážené vzorky umístil do sušárny Binder FD 53 **Obr. 26**, kterou jsem nastavil na 80 °C. Vzorečky byly umístěny na savém papíře a stejně tak přikryty papírem i ze strany horní.

Cílem experimentu bylo stanovit úbytek hmotnosti v čase, kde při 80 °C vosk difundoval ze struktury materiálu směrem k povrchu a zde se vsakoval do savého papíru.



**Obr. 26:** Sušárna Binder FD 53 použitá pro stanovení tepelné stability

Úbytek hmotnosti jsem stanovoval po 1, 2, 3 a 5 hodinách a dále po libovolném časovém úseku až do ustálení hmotnosti, k čemuž došlo po 262 hodinách. Podrobná data jsou vyobrazena v **Tab. 3**.

**Tab. 3:** Naměřená data úbytku hmotnosti PCM v čase

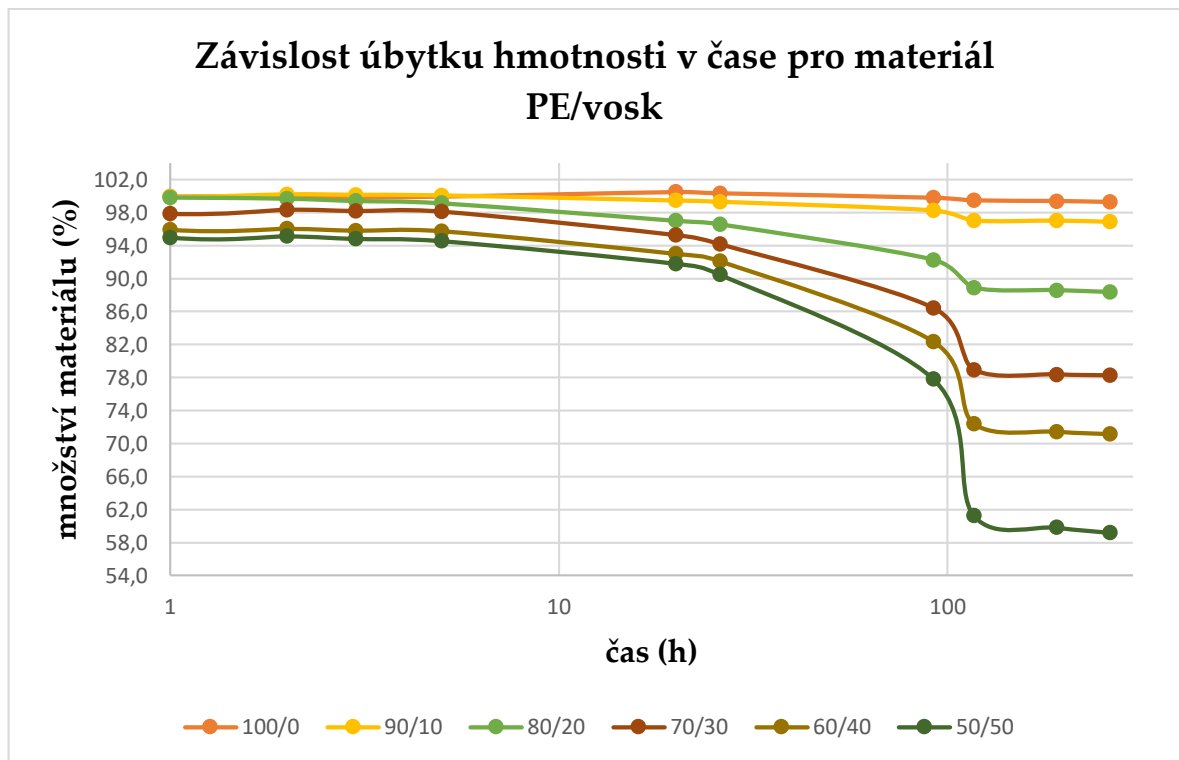
Tepelná stabilita materiál	čas (h)										
	0	1	2	3	5	20	26	92	117	191	262
PE/vosk (100/0)	0,28579	0,28559	0,28578	0,28536	0,28556	0,28718	0,28674	0,28517	0,28423	0,28401	0,28366
90/10	0,25820	0,25795	0,25874	0,25859	0,25841	0,25680	0,25641	0,25370	0,25053	0,25052	0,25012
80/20	0,24042	0,23999	0,23965	0,23898	0,23831	0,23320	0,23217	0,22182	0,21369	0,21296	0,21241
70/30	0,16755	0,16393	0,16476	0,16451	0,16439	0,15962	0,15777	0,14480	0,13226	0,13130	0,13109
60/40	0,18797	0,18029	0,18050	0,18008	0,17996	0,17480	0,17310	0,15479	0,13608	0,13428	0,13371
50/50	0,18141	0,17228	0,17255	0,17198	0,17149	0,16652	0,16410	0,14114	0,11111	0,10851	0,10738
PE/ZnO/vosk (30/10/60)	0,17863	0,16788	0,16809	0,16739	0,16680	0,15819	0,15546	0,12640	0,09425	0,09333	0,09304
40/10/50	0,21870	0,20991	0,20926	0,20816	0,20745	0,19882	0,19600	0,16858	0,13612	0,13346	0,13279
50/10/40	0,23423	0,22593	0,22705	0,22662	0,22642	0,21951	0,21722	0,19836	0,18198	0,18114	0,18046
PE/graf./vosk (30/10/60)	0,17086	0,16312	0,16313	0,16242	0,16193	0,15665	0,15400	0,13000	0,09307	0,09042	0,08960
40/10/50	0,13687	0,13159	0,13190	0,13136	0,13090	0,12416	0,12188	0,10220	0,08758	0,08730	0,08707
50/10/40	0,16293	0,15917	0,15923	0,15852	0,15836	0,15120	0,14919	0,13316	0,12104	0,12077	0,12058

hmotnost

Pro lepší přehlednost a srovnání jsou připravené materiály rozděleny do třech skupin (sérií). První sadou vzorků byl materiál PE/vosk, další skupinou PE/ZnO/vosk a třetí sérií vzorků PE/grafit/vosk.

Z naměřených dat jsem vypočítal množství materiálu v %, které zůstalo po ustálení hmotnosti (262 hodinách) a tyto data přehledně zobrazil v grafech **Obr. 27**, **Obr. 28** a **Obr. 29**



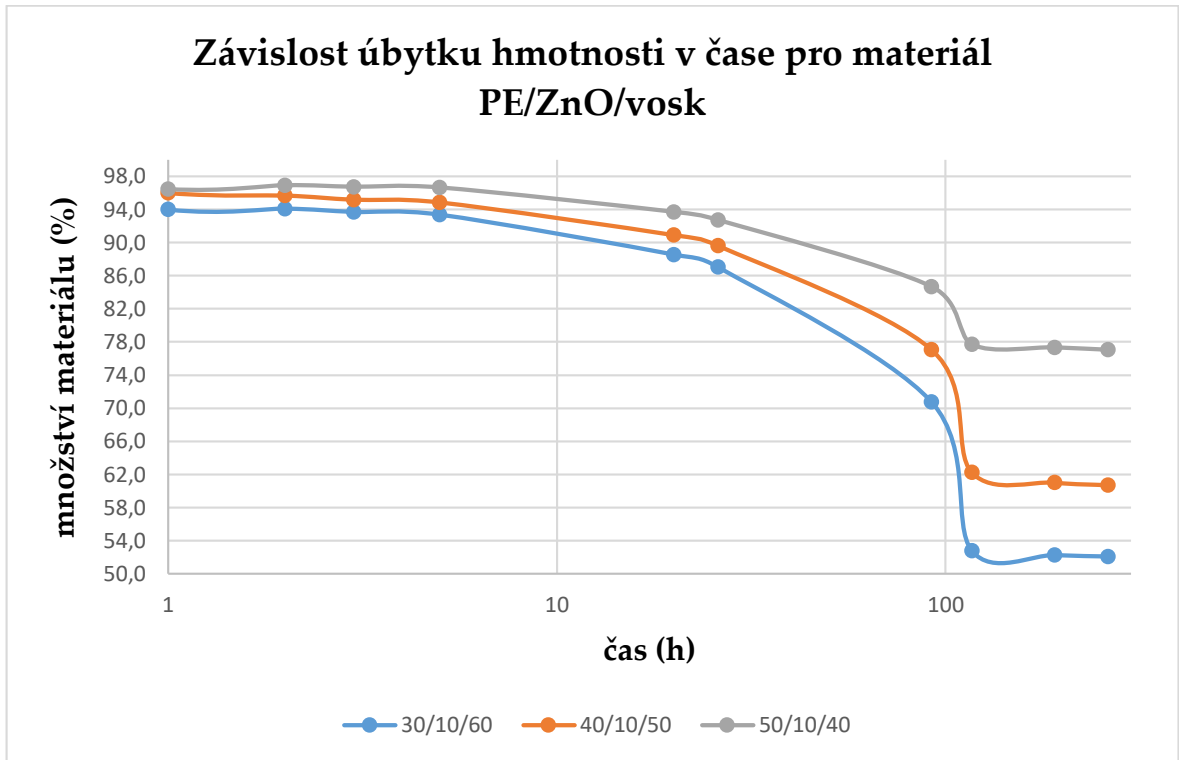


**Obr. 27:** Graf závislosti úbytku hmotnosti v čase pro materiál PE/vosk

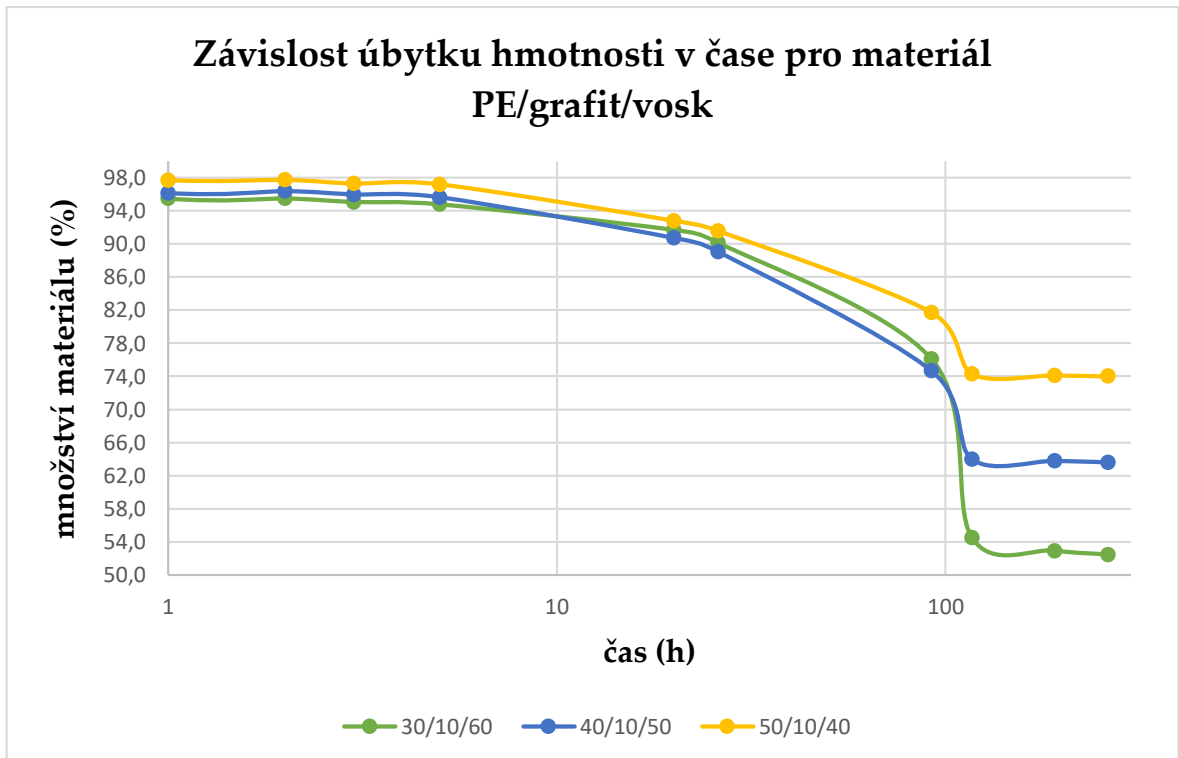
Z grafu závislosti úbytku hmotnosti v čase lze vidět, že pro sérii materiálu PE/vosk byla koncentrace vosku ve všech pracovních vzorcích nižší, než měla původně být. To bylo způsobeno při přípravě vzorků na mikrohnětiči, kdy se po každém dalším míchání komora čistila čistým PE a vždy určité množství čistého PE zůstalo v komoře. Následkem toho docházelo k nežádoucímu naředění a snížení koncentrace vosku v následujícím vzorku.

Dále můžeme jednoznačně říci, že po 262 hodinách veškerý vosk difundoval ze struktury materiálu k povrchu, kde se v celém svém objemu vsákl do svého papíru. Můžeme tedy konstatovat, že veškerý vosk vytekl ze struktury materiálu pryč. K tomuto jevu došlo přibližně okolo 100 hodiny měření, kde je pozorovatelný skokový úbytek hmotnosti a lze jej vidět v grafu.

Čím byla větší koncentrace vosku v daném vzorku, tím byl i větší následný úbytek hmotnosti v čase.



Obr. 28: Graf závislosti úbytku hmotnosti v čase pro materiál PE/ZnO/vosk



Obr. 29: Graf závislosti úbytku hmotnosti v čase pro materiál PE/grafit/vosk

Pro obě sady s plnivem PE/ZnO/vosk **Obr. 28** i PE/graf./vosk **Obr. 29** platí to, co již bylo popsáno pro sadu PE/vosk. Tedy v oblasti 100 hodiny dochází k citelnému poklesu hmotnosti a vsáknutí vosku do savého papíru. Nelze však říci, zda vytekla veškerý vosk, protože zde bylo použito plnivo, které mohlo určitou část vosku navázat do své struktury.

Opět čím větší je obsah vosku v materiálu, tím citelnější a výraznější je následný pokles hmotnosti. Jakmile dojde k maximálnímu možnému uvolnění vosku, tak je hmotnost ve zbývajícím čase prakticky konstantní.

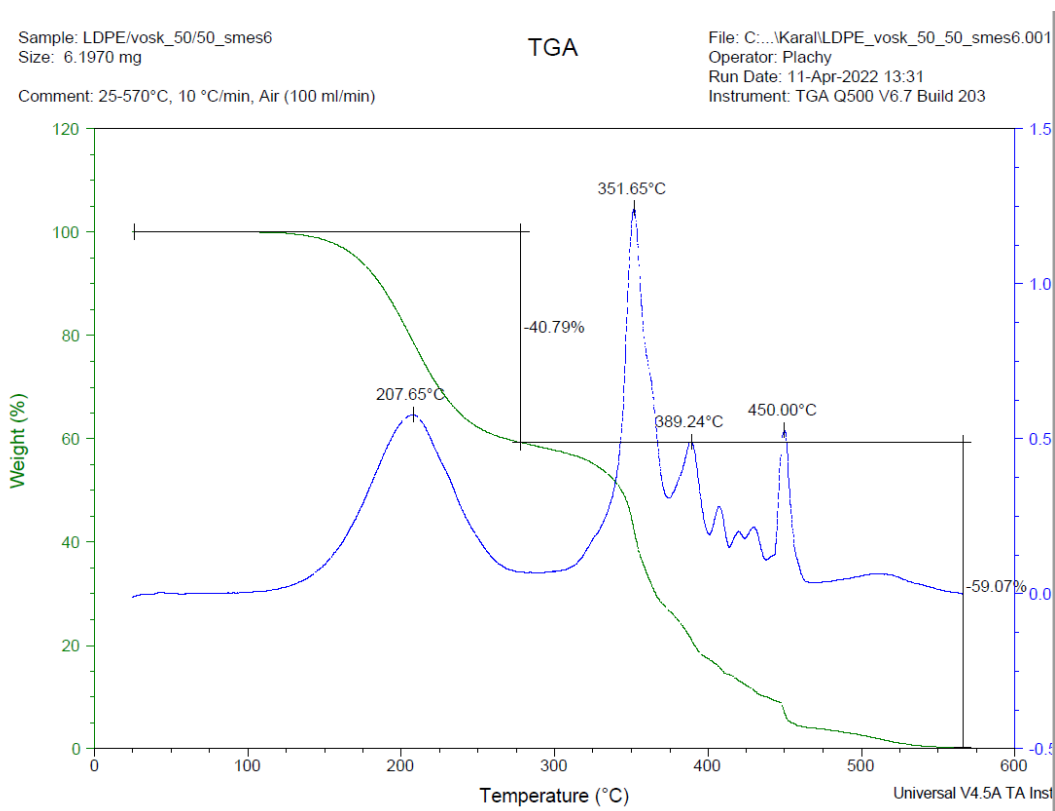
## 5.2 TGA – Termogravimetrická analýza

Pro stanovení přesného množství jednotlivých komponent v dané směsi a potvrzení správnosti daných koncentrací jsem provedl termogravimetrickou analýzu. Pro tuto analýzu jsem použil přístroj TGA Q500-0299 **Obr. 30**.



**Obr. 30:** Přístroj TGA Q500-0299

Na **Obr. 31** lze pro ilustraci vidět grafický výstup z TGA měření pro koncentraci vzorku PE/vosk (59/41).



**Obr. 31:** Grafický výstup z TGA měření pro vzorek PE/vosk (59/41)

Pro lepší porovnání jsem umístil získaná data z tepelné stability (leaching) a TGA analýzy do **Tab. 4**.

Tab. 4: Porovnání tepelné stability vs. TGA

PE/vosk	Tepelná stabilita		TGA			
	zbytek PE (%)	vosk (%)	PE (%)	vosk (%)	plnivo (%)	organická složka (%)
90/10	96,9	3,1	92,3	7,7	—	—
80/20	88,3	11,7	90,0	10,0	—	—
70/30	78,2	21,8	79,2	20,8	—	—
60/40	71,1	28,9	65,1	34,9	—	—
50/50	59,2	40,8	59,2	40,8	—	—
PE/ZnO/vosk	zbytek PE + plnivo (%)	vosk (%)	PE (%)	vosk (%)	plnivo (%)	organická složka (%)
50/10/40	77,0	24,0	57,6	34,8	7,6	92,4
40/10/50	60,7	27,3	58,8	35,2	6,0	94,0
30/10/60	52,1	47,9	40,0	51,4	8,6	91,4
PE/graf./vosk	zbytek PE + plnivo (%)	vosk (%)	PE (%)	vosk (%)	plnivo (%)	organická složka (%)
50/10/40	74,0	26,0	53,7	40,9	5,4	94,6
40/10/50	63,6	36,4	46,2	46,7	7,1	92,9
30/10/60	52,4	47,6	35,6	56,1	8,3	91,7

Jak lze vidět v příložené tabulce, data získaná z obou dvou měření přibližně korespondují.

Pro sadu vzorků PE/vosk jsou tyto hodnoty velmi podobné a lze říci, že se přibližně shodují. Drobná odchylka v obsahu vosku může být způsobena nerovnoměrnou distribucí vosku ve struktuře materiálu, která ovlivňuje jednotlivá měření.

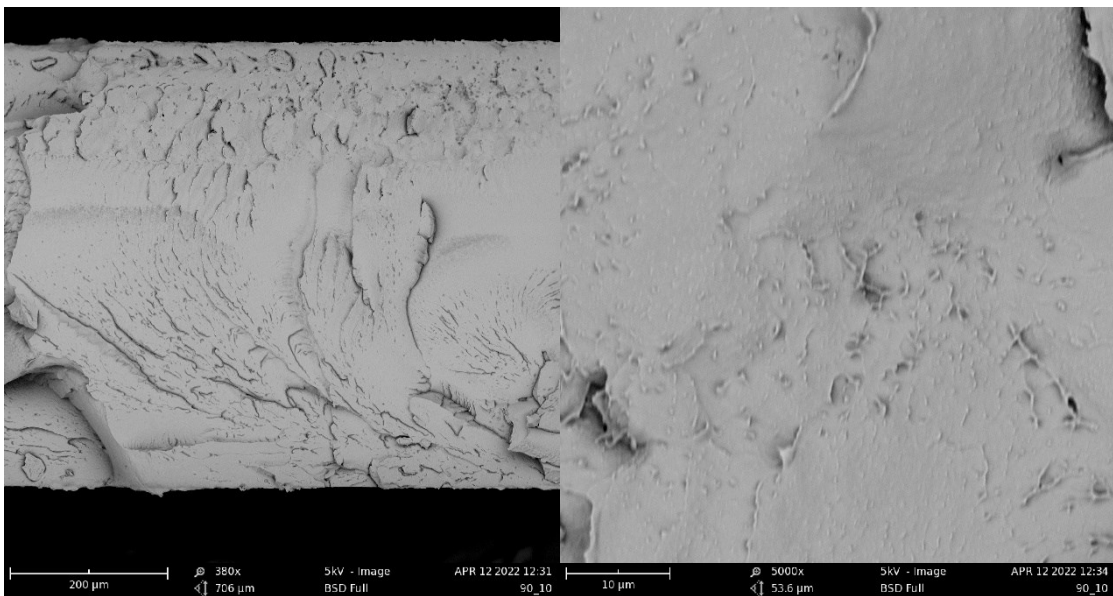
Pro obě plněné sady PE/ZnO/vosk i PE/grafit/vosk se hodnoty obsahu vosku ve struktuře liší. Toto procentuální množství získané z TGA je vyšší než z měření tepelné stability. Rozdíl je pravděpodobně zapříčiněn plnivem obsaženým ve struktuře PCM, které má schopnost na sebe navázat vosk. V testování tepelné stability se pracuje při nižší teplotě a plnivo je schopno udržet určitou část vosku ve struktuře. Oproti tomu při vyšších teplotách TGA analýzy vosk obsažený ve struktuře vyteče kompletně celý a v celém objemu se odpálí pryč. Na základě tohoto lze stanovit přesnou koncentraci vosku. Také je patrné, že grafit jako plnivo má větší schopnost vázat molekuly vosku než ZnO.

Jelikož pro sadu vzorků PE/ZnO/vosk byla koncentrace vosku u vzorečku 50/10/40 a 40/10/50 prakticky totožná, tak pro další měření došlo ke sloučení těchto hodnot. Dále bude brána pouze hodnota vzorku 50/10/40 viz. **Tab. 4**.

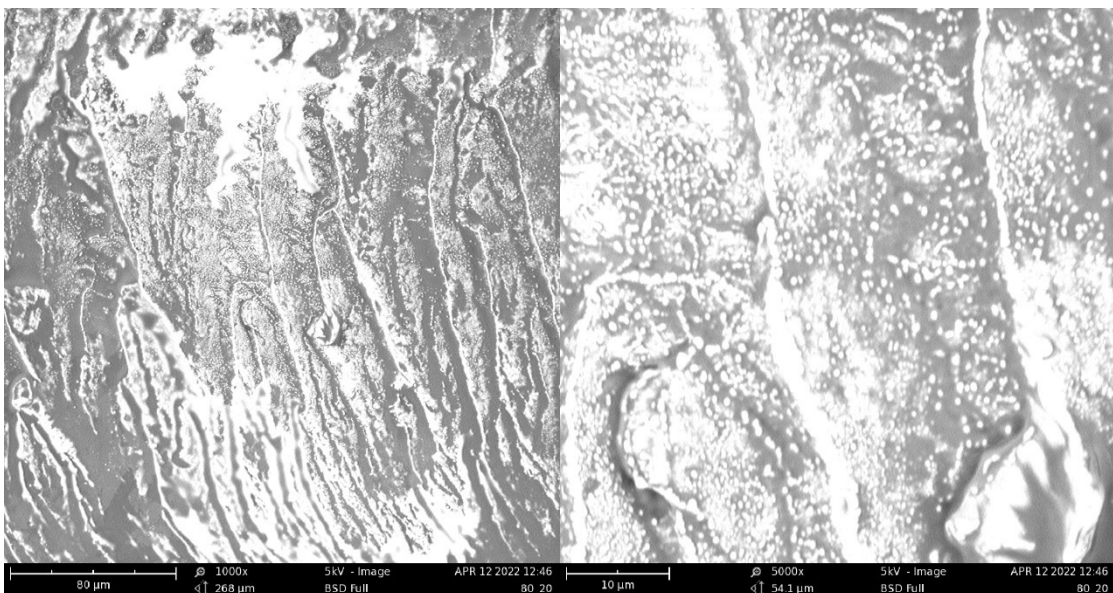
Při dalších měřeních budou vzorky popisovány již s reálnou koncentrací vosku získanou z TGA analýzy, která je pro nás z pohledu obsahu vosku stěžejní.

### 5.3 SEM – Skenovací elektronová mikroskopie

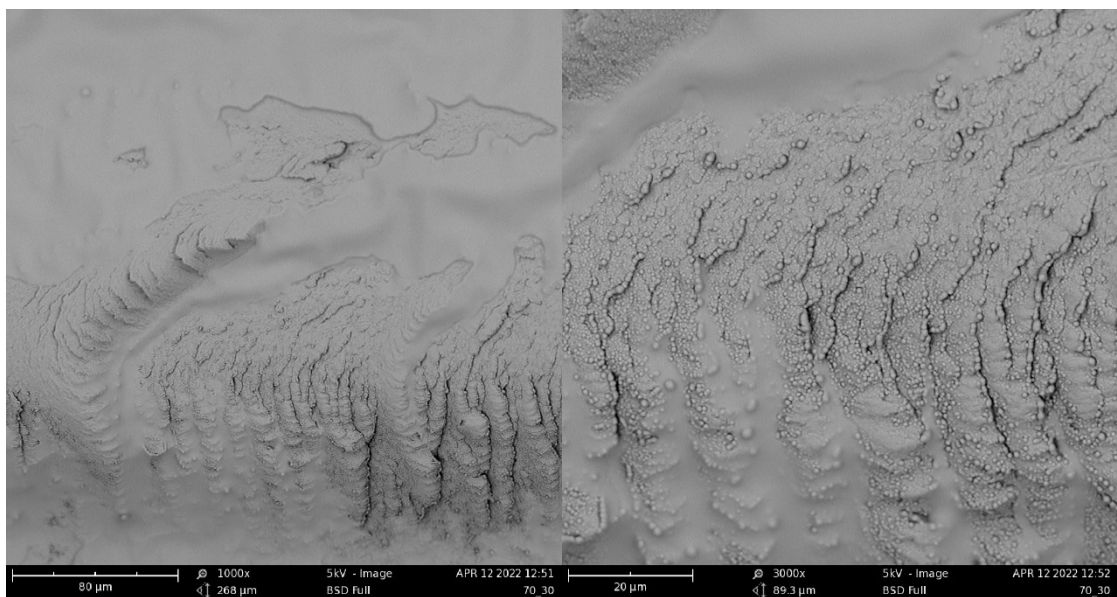
K pozorování povrchové morfologie PCM materiálů jsem použil skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop. Všechny pracovní vzorečky jsem zchladil v tekutém dusíku a nalámal na menší fragmenty. Pod mikroskopem jsem pak zkoumal oblast lomu a jeho vnitřní strukturu. Každý pracovní vzoreček byl zobrazen pod elektronovým mikroskopem v několika postupných zvětšeních a to (300, 200, 100, 80, 50, 30, 20, 10  $\mu\text{m}$ ). Pro každou koncentraci jsem vždy vybral dva snímky, které nejlépe zobrazovaly vnitřní strukturu.



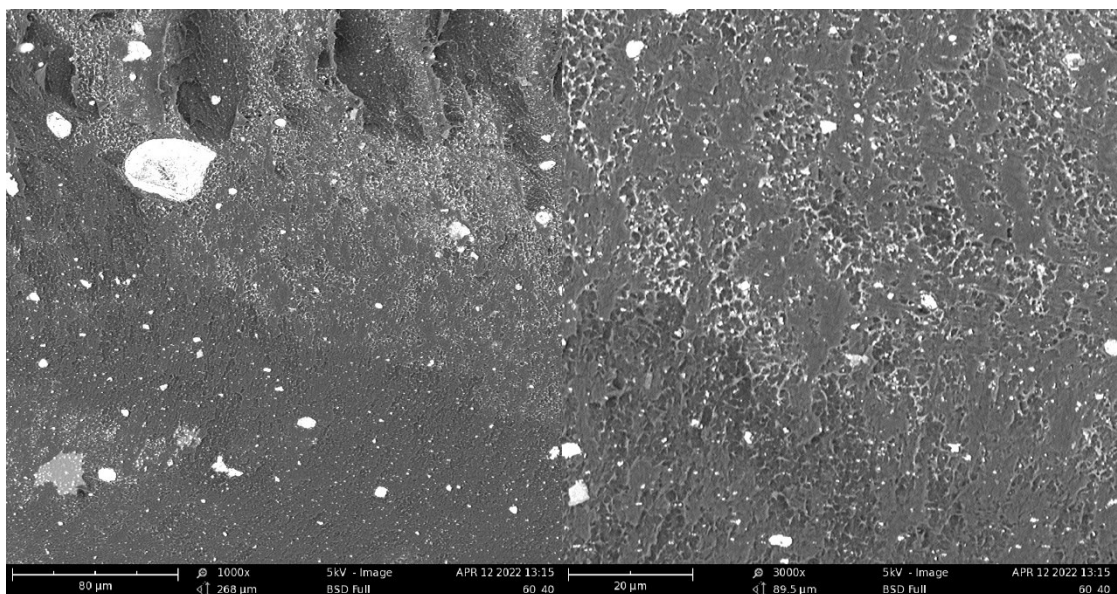
**Obr. 32:** Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 92/8



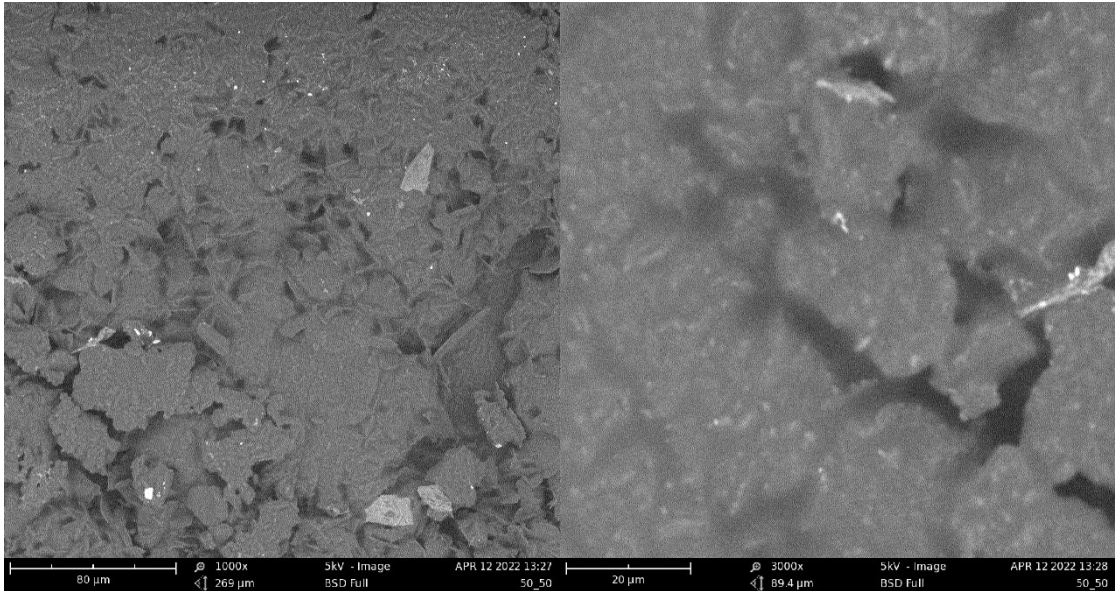
**Obr. 33:** Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 90/10



**Obr. 34:** Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 79/21



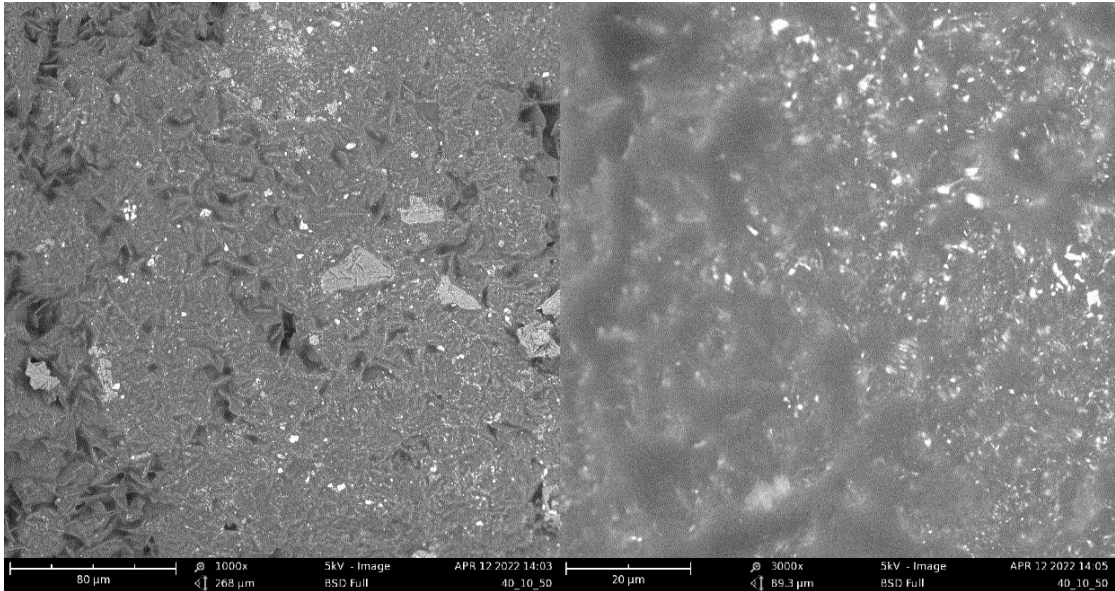
**Obr. 35:** Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 65/35



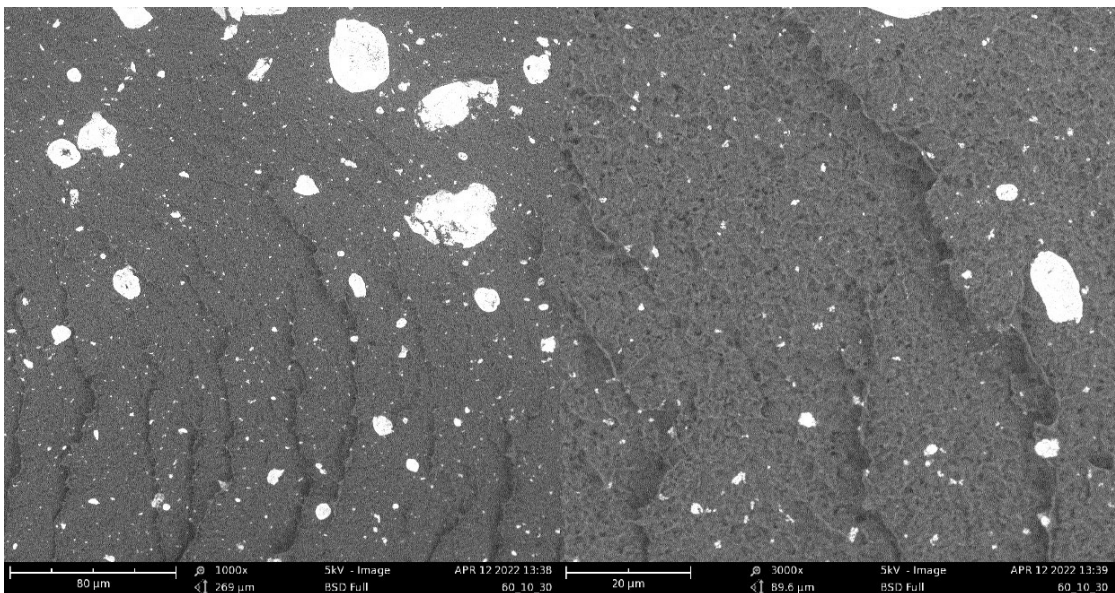
**Obr. 36:** Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 59/41

Na **obrázcích 32 – 36** jsou zobrazeny pracovní vzorky PE/vosk pro určité koncentrace. Zatímco při koncentraci 92/8 **Obr. 32** není vosk ve struktuře PCM viditelný, tak v poměru 90/10 **Obr. 33** při velikosti 10 µm se objevuje ve struktuře ve formě kapiček. Na dalších snímcích, kde už je poměr 79/21 **Obr. 34**, je krásně pozorovatelné, jak se kuličky vosku spojují a tvoří řetízky. Na **Obr. 35** a **Obr. 36** tvoří vosk větší struktury zakomponované v PE matrici a již nelze vidět pouhé kuličky nebo řetízky vosku ve struktuře. Lze tedy říci, že při nižších koncentracích tvoří aglomeráty, které nejsou rovnoměrně rozmístěné ve struktuře materiálu. Při vyšších koncentracích pak vosk přechází do lamelární fáze.





**Obr. 37:** Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/ZnO/vosk v hm. poměru 58/7/35 %

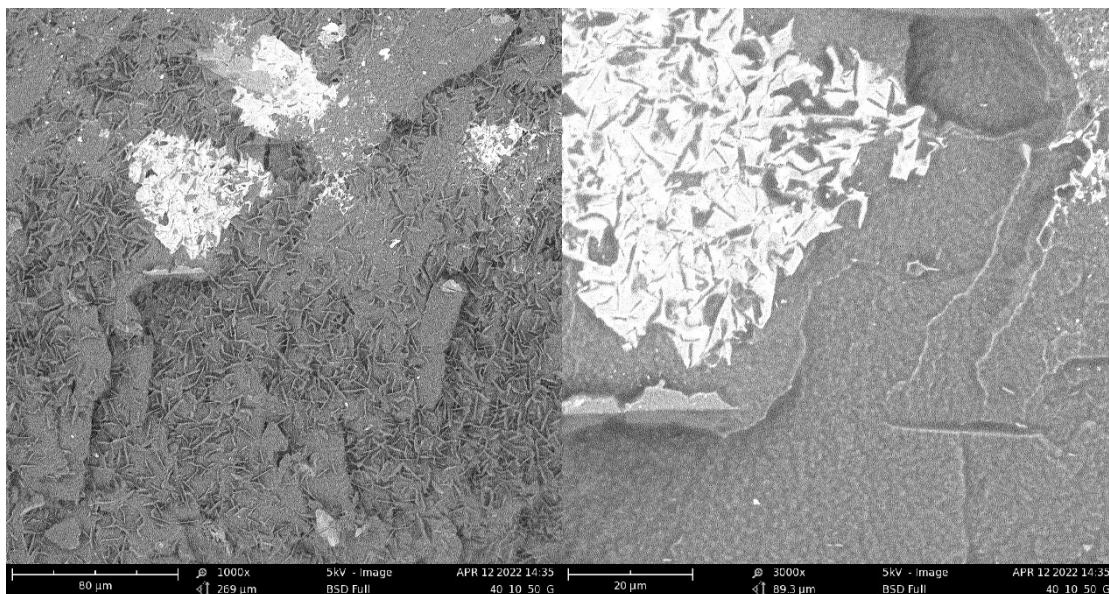


**Obr. 38:** Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/ZnO/vosk v hm. poměru 40/9/51 %

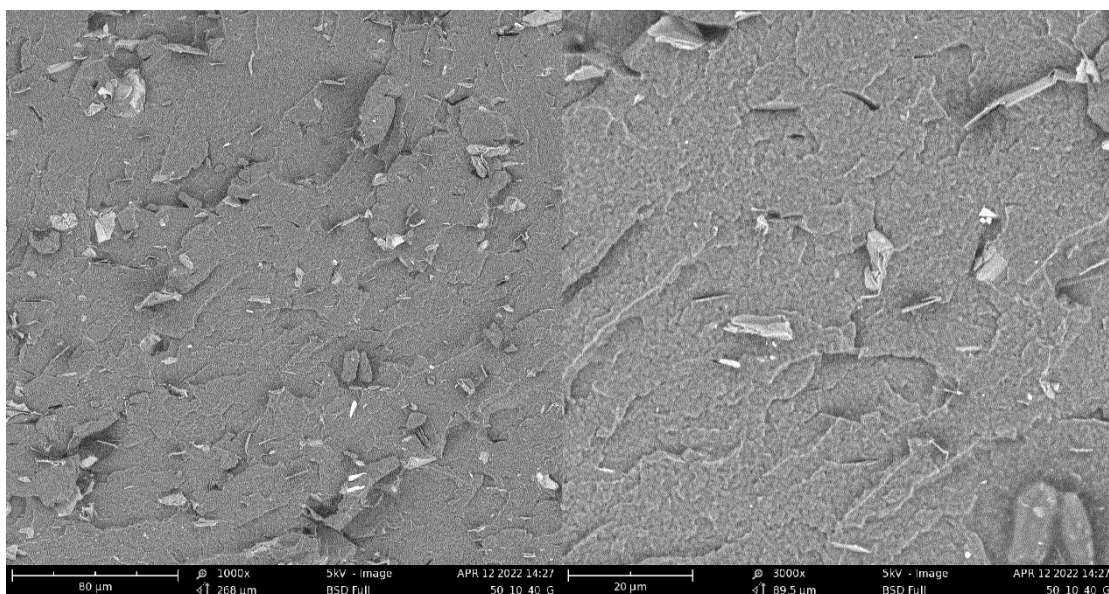
Na **obrázcích 37 a 38** jsou snímky PCM materiálu, kde k PE a vosku bylo přidáno plnivo. V dané sérii byl plnivem bílý, krystalický nano nZ-BOCH 01 (ZnO-BOCH\_01). A opět se měnilo množství vosku ve struktuře. Naproti tomu koncentrace plniva byla pro oba případy stejná.

Při koncentraci 58/7/35 **Obr. 37** jsou vidět krystaly vosku v lamelárním uspořádání. Na **Obr. 38** se viditelnost této struktury ztrácí s rostoucí koncentrací a vosk tvoří

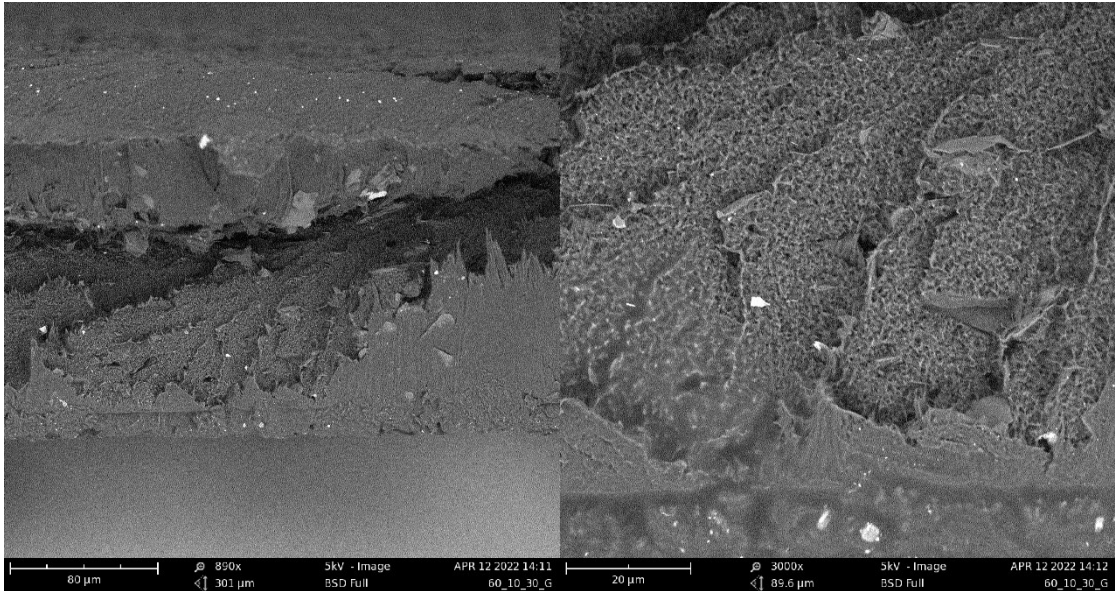
kontinuální fázi ve struktuře materiálu. Bílé tečky viditelné na obrázcích mohou být aglomeráty plniva, případně jiné nečistoty obsažené ve struktuře.



**Obr. 39:** Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/graf./vosk v hm. poměru 54/5/41 %



**Obr. 40:** Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/graf./vosk v hm. poměru 46/7/47 %



**Obr. 41:** Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/graf./vosk v hm. poměru 36/8/56 %

V poslední sérii vzorků byl plnivem grafit, který byl opět obsažen v množství 10 %. Na **Obr. 39** jsou vidět drobné jehličky, což jsou krystaly vosku. Tato struktura byla viditelná pouze pro tuto koncentraci a bylo velmi těžké ji zaznamenat, protože při pohledu elektronovým mikroskopem docházelo k zahřívání daného místa a tím i k tání vosku a jeho krystaly mizely velmi rychle.

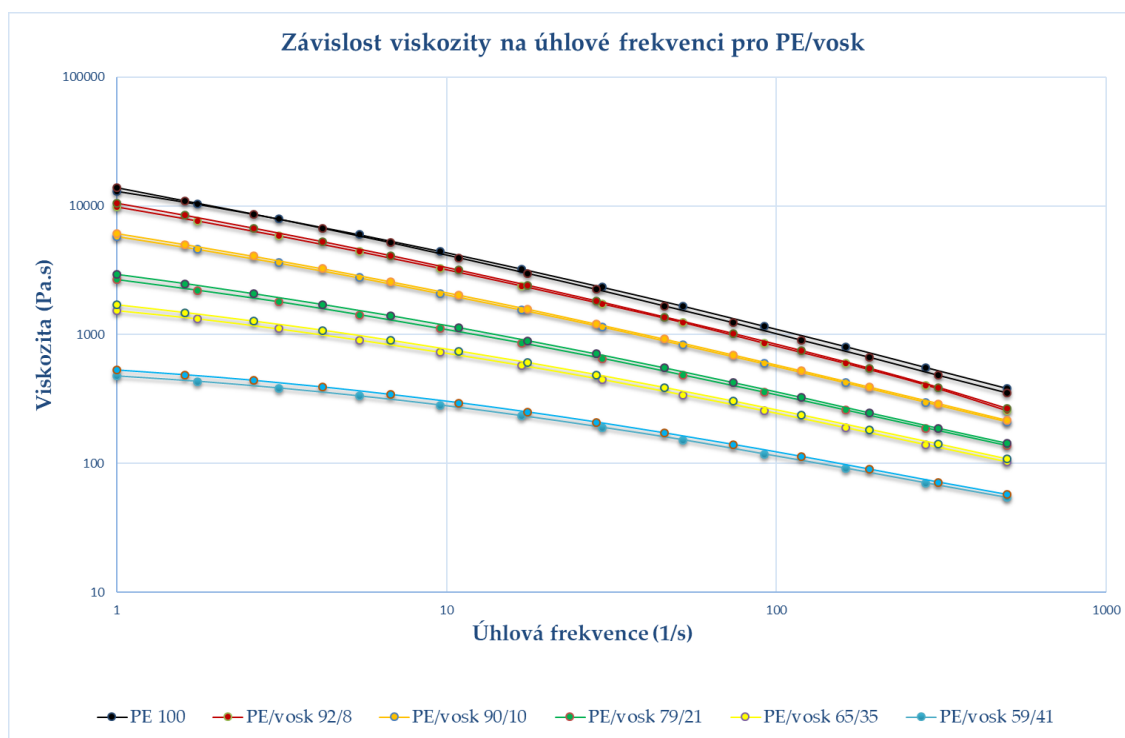
Na **Obr. 40** a **Obr. 41** je koncentrace vosku vyšší a zároveň je vosk mnohem více vázán na grafit. Tudíž jeho krystaly nevystupují na povrch jako v případě 54/5/41 na **Obr. 39**.

## 5.4 Viskoelastické vlastnosti

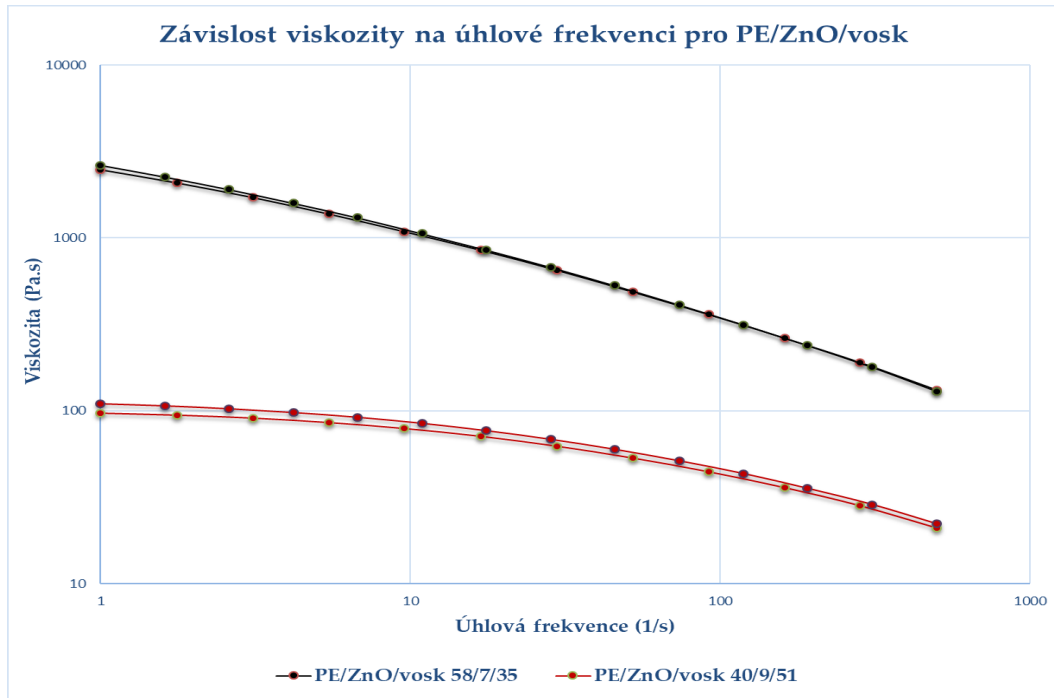
Pro určení viskoelastických vlastností byl použit rotační reometr Anton Paar MCR 502 s měřící geometrií deska – deska typ MCR 502



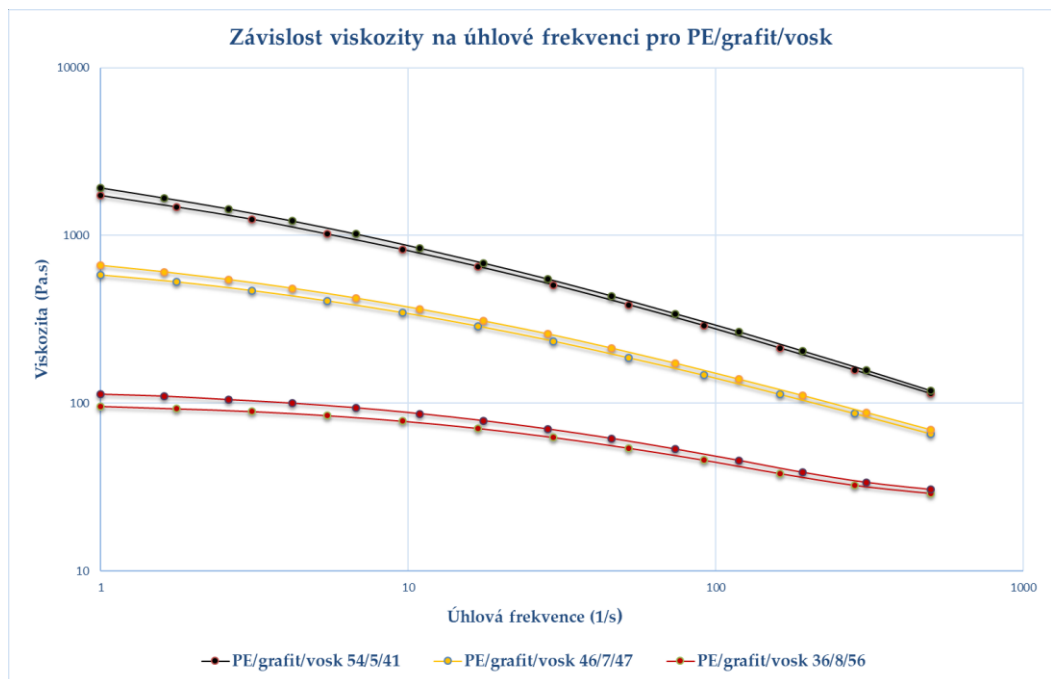
Obr. 42: Rotační reometr deska – deska typ MCR 502



Obr. 43: Závislost viskozity na úhlové frekvenci pro PE/vosk



**Obr. 44:** Závislost viskozity na úhlové frekvenci pro PE/ZnO/vosk



**Obr. 45:** Závislost viskozity na úhlové frekvenci pro PE/grafit/vosk

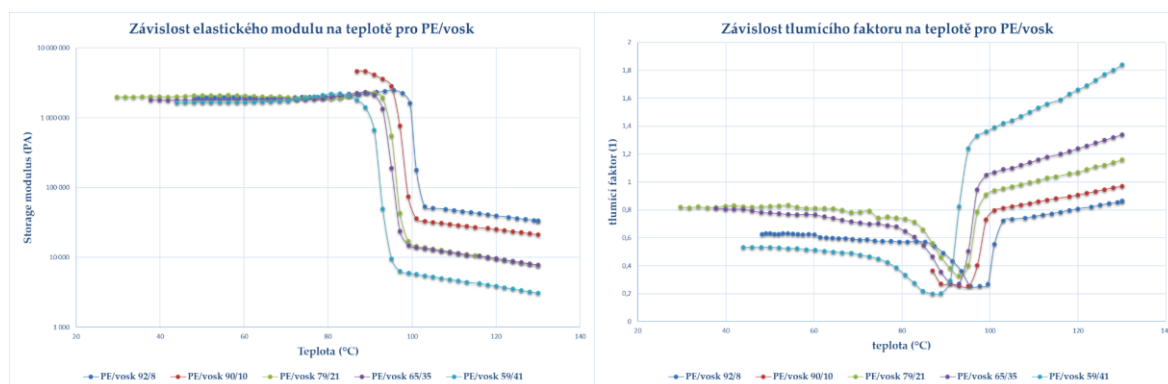
Měření viskozity v závislosti na úhlové frekvenci proběhlo dvakrát při 130 °C. Hodnoty se shodují, což je vidět na **obrázcích 43 – 45**. Ve všech případech měření viskozita klesá v závislosti na zvyšující se úhlové frekvenci a to jak pro neplněné tak i plněné PCM. Dále je vidět, že s rostoucím množstvím vosku obsaženým ve

struktúre materiálu klesá i viskozita PCM, materiály se tak stávají méně viskózní, tedy více tečou. Toto platí opět pro plněné i neplněné PCM.

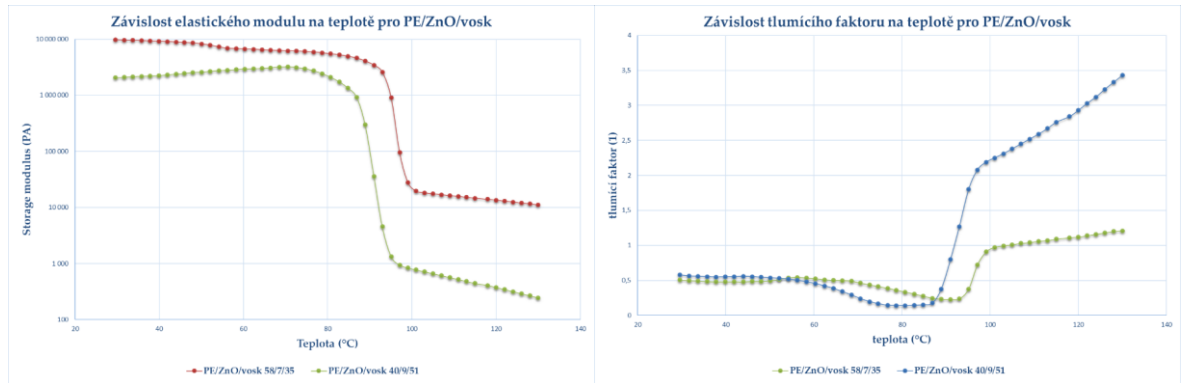
**Tab. 5:** Viskozity pro jednotlivé koncentrace PCM

PE/vosk	$\eta$ (Pa.s)	PE/ZnO/vosk	$\eta$ (Pa.s)	PE/grafit/vosk	$\eta$ (Pa.s)
100	13800	58/7/35	2640	54/5/41	1920
92/8	10500	40/9/51	110	46/7/47	662
90/10	6120	—	—	36/8/56	113
79/21	2920	—	—	—	—
65/35	1700	—	—	—	—
59/41	529	—	—	—	—

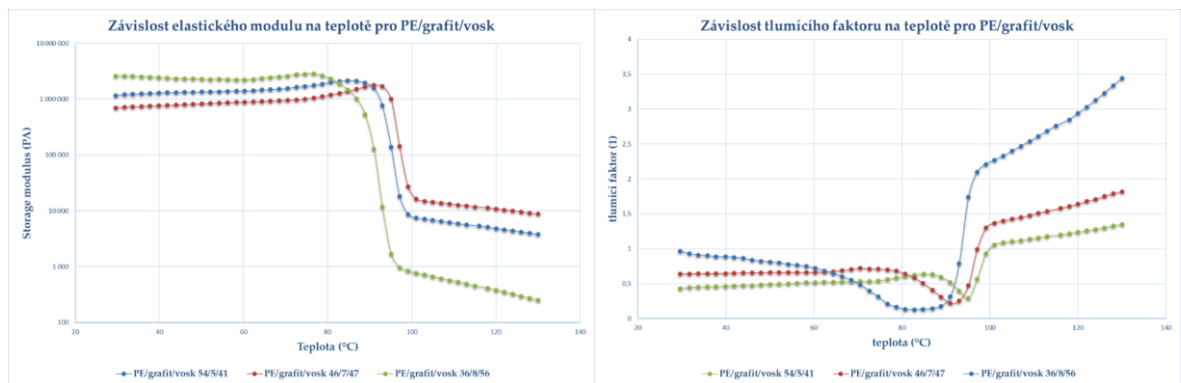
Hodnoty smykové viskozity v **Tab. 5** jsou odečítány vždy pro úhlovou rychlost v hodnotě 1 (1/s). Lze vidět klesající hodnoty viskozit v závislosti na rostoucím množství vosku ve struktuře daných materiálů. Dále za povšimnutí stojí nízké hodnoty viskozit, které jsou u materiálů s nejvyšším množstvím vosku ve struktuře. Z hodnot viskozit je patrné, že přídavek plniv zvyšuje viskozitu ve srovnání se sadou vzorků, kde plnivo použito nebylo. Takto lze srovnat například vzorek PE/vosk 65/35 a PE/ZnO/vosk 58/7/35, kde je pro oba shodně obsah vosku 35 %. U takto plněného PCM došlo k nárůstu viskozity o 55 %. Předpokládáme, že obsah plniva bude zlepšovat zpracovatelnost těchto systémů. Pro PCM plněný grafitem je tento nárůst ještě vyšší. Zde je dobré srovnání vzorků PE/ZnO/vosk 40/9/51 a PE/grafit/vosk 36/8/56, kde přestože PCM s obsahem grafitu má o 5 % vyšší množství vosku, tak i přesto má vyšší viskozitu než zmíněný PCM plněný ZnO.



**Obr. 46:** Závislost elastického modulu a tlumicího faktoru na teplotě pro PE/vosk



**Obr. 47:** Závislost elastického modulu a tlumícího faktoru na teplotě pro PE/ZnO/vosk



**Obr. 48:** Závislost elastického modulu a tlumícího faktoru na teplotě pro PE/grafit/vosk

Na **obrázcích 46 – 48** jsou v levé části grafy závislosti elastického modulu na teplotě a v pravé části grafy závislosti tlumícího faktoru na teplotě. Teploty krystalizace jsou vždy odečítány ze střední hodnoty poklesu elastického modulu a střední hodnoty růstu tlumícího faktoru. Z přiložených grafů je zřejmé, že na teplotu krystalizace má vliv množství vosku obsažené v dané struktuře. S dostupných výsledků tedy plyne, že čím větší je procentuální množství vosku obsažené v materiálu, tím více se snižuje teplota krystalizace pro jednotlivé materiály.

**Tab. 6:** Hodnoty teplot krystalizace odečtené ze střední hodnoty poklesu elastického modulu

PE/vosk	T(°C)	PE/ZnO/vosk	T(°C)	PE/grafit/vosk	T(°C)
92/8	101	58/7/35	96,1	54/5/41	98,1
90/10	98,1	40/9/51	92	46/7/47	96,1
79/21	96,1	—	—	36/8/56	93
65/35	96,1	—	—	—	—
59/41	93	—	—	—	—

**Tab. 7:** Hodnoty teplot krystalizace odečtené ze střední hodnoty růstu tlumícího faktoru

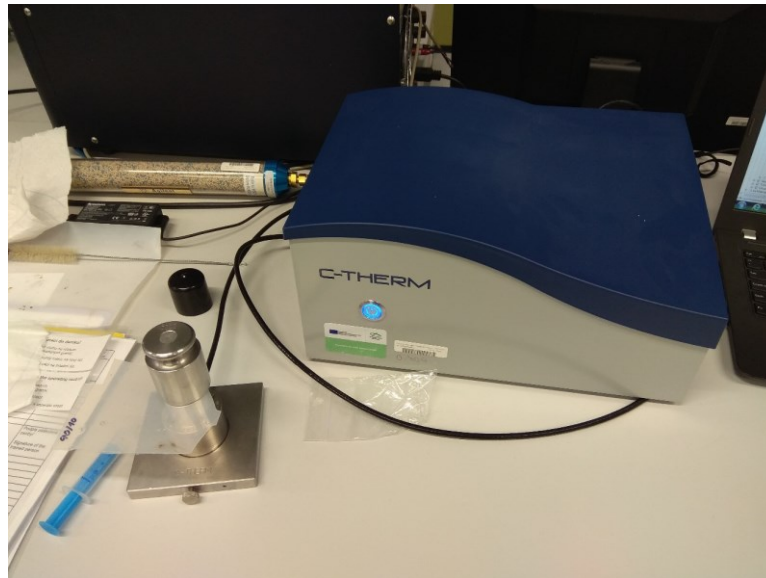
PE/vosk	T(°C)	PE/ZnO/vosk	T(°C)	PE/grafit/vosk	T(°C)
92/8	100,4	58/7/35	97,1	54/5/41	97,1
90/10	98,1	40/9/51	92	46/7/47	95,1
79/21	95,2	—	—	36/8/56	92
65/35	95,2	—	—	—	—
59/41	92	—	—	—	—

V **Tab. 6** a **Tab. 7** jsou přehledně srovnány teploty krystalizací pro jednotlivé materiály a dané koncentrace. Pro zhodnocení vlivu plniva na teplotu krystalizace a její nejpřesnější srovnání opět vybírám vzorky s nejbližší koncentrací vosku. Tedy PE/ZnO/vosk 58/7/35 má díky vlivu plniva o téměř 2 °C vyšší teplotu krystalizace než PE/vosk 65/35. Při srovnání neplněného vzorku PE/vosk 59/41 a PE/grafit/vosk 54/5/41 je tento rozdíl ještě větší, v tomto případě až 5,1 °C. To znamená, že grafit má na vliv teploty krystalizace větší vliv než ZnO.



## 5.5 Tepelná vodivost

Tepelnou vodivost připravených materiálů jsem měřil na přístroji TCi-3-A **Obr. 49**.



**Obr. 49:** Přístroj pro měření tepelné vodivosti TCi-3-A

Každý pracovní vzorek jsem pro stanovení tepelné vodivosti otestoval třikrát po sobě na 4 různých místech. Z těchto hodnot jsem poté vypočítal průměrnou hodnotu tepelné vodivosti **Tab. 8**. Tepelná vodivost se pohybovala v rozmezí od 0,435 W/mK do 0,667 W/mK. Z průměrných hodnot lze říci, že pro vzorečky PE/vosk měla teplotní vodivost vzrůstající charakter se zvyšujícím se obsahem vosku ve struktuře PCM. Podobný trend jsem pozoroval i u série plněné ZnO, kde s vyšší koncentrací vosku rostla i tepelná vodivost. Naopak u vzorečků plněných grafitem tomu bylo přesně opačně, kde s rostoucí koncentrací vosku tepelná vodivost rostla.

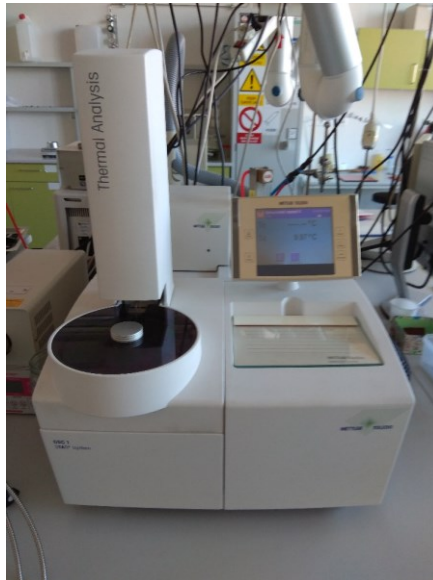
Tab. 8: Tepelné vodivosti jednotlivých pracovních vzorků PCM

Tepelná vodivost					
vzorek					
PE/vosk (hm. %)	k (W/mK)				průměr
92/8	0,437	0,432	0,438	0,432	<b>0,435</b>
90/10	0,451	0,446	0,449	0,448	<b>0,449</b>
79/21	0,454	0,456	0,454	0,455	<b>0,455</b>
65/35	0,483	0,479	0,485	0,483	<b>0,483</b>
59/41	0,501	0,496	0,496	0,491	<b>0,496</b>
PE/ZnO/vosk (hm. %)					
58/7/35	0,523	0,530	0,530	0,533	<b>0,529</b>
40/9/51	0,664	0,674	0,667	0,663	<b>0,667</b>
PE/grafit/vosk (hm. %)					
54/5/41	0,510	0,516	0,522	0,520	<b>0,517</b>
46/7/47	0,501	0,490	0,491	0,492	<b>0,494</b>
36/8/56	0,463	0,465	0,468	0,474	<b>0,468</b>

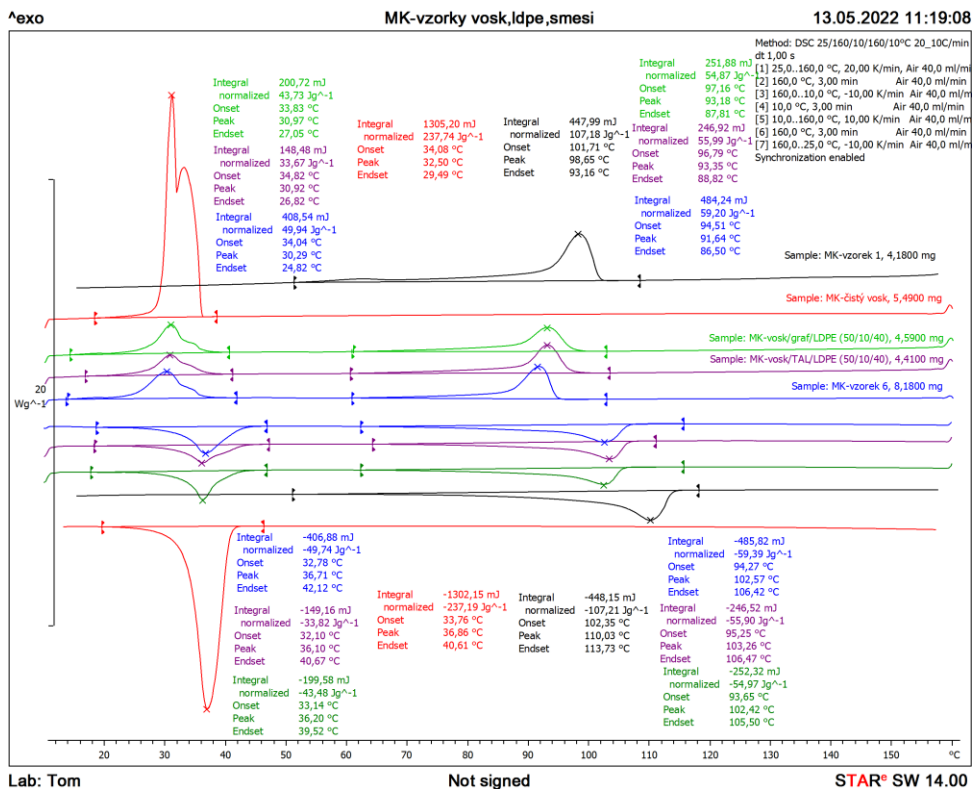
Pokud má grafit větší schopnost vázat vosk, což bylo pozorovatelné z rozdílu tepelné vodivosti a TGA analýzy, pak je možné, že je i voskem více obalen, což by vysvětlovalo snižující se hodnoty teplotních vodivostí pro rostoucí koncentrace vosku ve struktuře u plněných materiálů grafitem. Tedy čím více vosku bude v materiálu plněného grafitem, tím nižší bude i teplotní vodivost daného materiálu.

### 5.6 DSC – Diferenciální skenovací kalorimetrie

Pro zjištění tepelných vlastností PCM materiálů byl použit přístroj Mettler Toledo DSC 1. Zejména pak pro zjištění teploty tání, skelného přechodu a množství latentního tepla polyethylenu a vosku u jednotlivých materiálů.



Obr. 50: Přístroj Mettler Toledo DSC 1



Obr. 51: Grafické znázornění DSC měření pro vybrané materiály

Tab. 9: Teploty tání, skelných přechodů a latentních tepel pro jednotlivé materiály

Materiál	PE		Vosk		PE	Vosk
	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	Em (J.g <sup>-1</sup> )	Em (J.g <sup>-1</sup> )
PE/vosk (100/0)	110,03	98,65	—	—	107,21	—
92/8	111,30	96,16	24,33	25,01	92,31	0,82
90/10	108,30	95,69	37,97	31,20	83,22	5,90
79/21	105,80	95,01	38,01	33,00	72,67	14,48
65/35	104,06	94,12	35,79	30,71	66,30	29,22
59/41	102,57	91,64	36,71	30,29	59,39	49,74
čistý vosk	—	—	36,86	32,50	—	237,19
PE/ZnO/vosk						
58/7/35	105,07	94,88	35,98	33,03	72,13	21,14
40/9/51	100,27	90,67	36,40	31,25	47,90	64,31
PE/graf./vosk						
54/5/41	104,59	94,68	35,80	30,72	65,33	24,98
46/7/47	102,42	93,18	36,20	30,97	59,31	41,85
36/8/56	102,59	93,20	35,89	31,11	60,40	38,74

Bylo provedeno DSC měření a získané hodnoty přehledně srovnány do **Tab. 9**. Významnými teplotami je teplota tání a krystalizace pro čistý vosk. V teoretické části diplomové práce bylo popsáno, že ke změně fázové struktury PCM materiálů dochází ve velmi malém rozsahu teplot. Toto tvrzení je zde ověřeno. K tání čistého vosku dochází při teplotě 36,86 °C a skupenství se mění na pevné při teplotě 32,5 °C. Rozmezí teplot, při kterých dochází k tání a ke krystalizaci, činí pouze 4,36 °C, což je velmi úzký interval, čímž jsou právě PCM materiály charakteristické.

Dále jsou PCM materiály charakteristické svojí schopností uchovávat velké množství latentního tepla. Pokud srovnáme čistý vosk s čistým polyethylenem, tak je z tabulky zřejmé, že čistý vosk dokázal přijmout dvakrát větší množství latentního tepla než čistý polyethylen. Z naměřených hodnot také lze vidět, že rostoucí množství vosku ve struktuře materiálu zvyšuje schopnost daného materiálu uchovávat více latentního tepla.

Zde se projevuje i vliv použitých plniv. Jako lepší plnivo ovlivňující schopnost uchování latentního tepla je jednoznačně nano ZnO. Toto plnivo dosahuje vyšších hodnot množství latentního tepla než grafit pro podobnou koncentraci vosku ve struktuře.

Znepokojující je fakt, že hodnoty latentních tepel pro všechny materiály jsou o dost nižší, než by se dalo očekávat. Pro materiál plněný voskem z 50 % bych očekával, že množství latentního tepla se bude pohybovat přibližně kolem poloviční hodnoty

latentního tepla čistého vosku. Tedy že materiál s 50 % vosku bude mít hodnotu latentního tepla přibližně  $100 \text{ J.g}^{-1}$ , čehož ani zdaleka nedosahuje.

Jako nejslibnější materiál se jeví PE/ZnO/vosk, kde při složení 40/9/51 dosahuje množství latentního tepla  $64,31 \text{ J.g}^{-1}$ . Z tohoto pohledu se PCM materiály plněné ZnO jeví jako nejslibnější variantou pro další výzkum a následné praktické využití.

## ZÁVĚR

PCM materiály s fázovým přechodem lze považovat za novou kategorii materiálů. Jsou sice známé už od počátku 20. století, ale k jejich velkému rozvoji a zavedení do praktických aplikací dochází až s rozvojem potřebných technologií v relativně nedávné či současné době. Se zdražujícími se energiemi a jejich horší dostupností bude jejich význam i nadále narůstat a poptávka po nových PCM materiálech poroste.

Hlavní předností těchto materiálů je schopnost ukládání a následné uvolňování tepelné energie, také stabilizace teplot ve vnitřních prostředích a to všechno jen díky změně skupenství. V drtivé většině se využívá změny skupenství z kapalné fáze na pevnou a opačně. Obrovskou výhodou je, že k tomuto procesu není potřeba žádných dalších zdrojů energie.

PCM materiály nachází uplatnění v mnoha průmyslových oborech nebo výrobcích pro denní potřebu. K největšímu využívání dochází ve stavebnictví, kde se přidávají do stavebních materiálů, ve kterých jsou zpravidla v enkapsulované formě. Typickým příkladem jsou omítky, různé nátěry, cement nebo beton s obsahem PCM, sádkartonové desky a mnoho dalších. Lze je tedy najít v nejrůznějších formách od podlahy až po střechu domu.

Dalšími odvětvími, kde PCM našly využití, je medicína, potravinářský průmysl, textilní průmysl nebo doprava a automobilový průmysl.

Materiály s fázovou změnou ale nemají pouze kladné vlastnosti. Zjistilo se, že pro jejich efektivní použití je třeba určitých podmínek. Jakmile jsou tyto podmínky nepříznivé, tak je jejich využití kontraproduktivní a nedochází k žádné úspoře energie. Vliv na účinnost PCM má zejména určité podnebí, vlhkost a dalšími vlivy. Dalšími negativními vlastnostmi jsou podchlazení, separace fází nebo špatná tepelná vodivost.

Je tedy nutné vždy pečlivě zvážit a řádně vyhodnotit přínos PCM pro danou aplikaci. V mnoha odvětvích se PCM používá už zcela běžně a je již standardní součástí mnoha materiálů.

V praktické části diplomové práce bylo cílem vyrobit a charakterizovat připravené PCM materiály pro praktické využití. Byly připraveny tři sady vzorků, první sadou vzorků byl polyetylen míchaný v určitých koncentracích s voskem, druhá a třetí série vzorků byla plněná nano ZnO a grafitem shodně s obsahem 10 %.

Takto vyrobené vzorky byly testovány a následně charakterizovány metodami, které měly za cíl určit tepelnou stabilitu, charakterizovat přesné složení a koncentraci jednotlivých komponent v připraveném materiálu, dále zmapovat informace o topografii a morfologii materiálu, tepelnou vodivost, zjistit teploty tání, skelných přechodů a krystalizací a také míru elasticity a fluidity materiálu.

Ze zjištěných testů a analýz lze vyvodit následující závěry: Aby byla technologie schopná obstát v praxi, je nutné vosk do struktury zapouzdřit, tedy použít mikro nebo makroenkapsulaci. Pokud nebude vosk nijak fixován ve struktuře materiálu, tak přibližně po 100 hodinách teplotního namáhání dojde k vytečení veškerého vosku ven.

Plnivo, které bylo použito, mělo vliv na řadu vlastností. Například grafit byl schopen lépe vázat vosk ve struktuře materiálu a také zvyšoval tepelnou vodivost. Nano ZnO byl výhodnější z hlediska schopnosti zvyšovat množství uchovávaného latentního tepla, což je pro danou aplikaci zásadní.

Z tohoto důvodu bych doporučil použití jako plniva nano ZnO a dále se věnoval pouze materiálu PE/ZnO/vosk. Tento materiál by mohl být slibný pro využití v praxi, ale je nutné ho podrobit detailnější a časově náročnější analýze.

Je nutno říci, že po získaných zkušenostech bych mnoho postupů přehodnotil a modifikoval, aby bylo dosaženo lepších výsledků. Jedním z příkladů může být příprava vzorků, kde byl použit laboratorní hnětič a ukázalo se, že tímto zařízením nedošlo k dokonalé homogenizaci směsi. To mělo vliv na konečné výsledky.

Z tohoto důvodu je nutno považovat tuto diplomovou práci jako úvod do problematiky a nadále pokračovat ve zkoumání doporučeného materiálu s cílem najít optimální řešení pro následnou aplikaci uvedenou do praxe.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **Rudecká, Monika.** *Mikroenkapsulace materiálů s fázovým přechodem.* [Diplomová práce] Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2017/2018.
2. **Šebek, Jan.** *Studium pasivní stabilizace teploty kompozitních stavebních materiálů.* [Diplomová práce] Brno : VUT v Brně, Fakulta chemická, 2010.
3. **Zavoralová, Pavla.** PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM. [Online] 2011. [Citace: 27. 04 2022.] <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>.
4. **Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M. a Farid, M.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. *A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium.* 2014. Sv. 31, stránky 531-542. ISSN 1364-0321.
5. **Zavoralová, Pavla.** PCM ve stavebnictví Díl 3: Laboratorní ověření vlastností PCM. [Online] 2011. [Citace: 10. 05 2022.] <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7557-pcm-ve-stavebnictvi-dil-3-laboratorni-overeni-vlastnosti-pcm>.
6. **Maříková, Petra.** *Materiály s fázovou změnou pro ECCS systémy.* [Diplomová práce] Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni - Fakulta elektroenergetiky a ekologie, 2018.
7. **Skovajsa, Jan, Koláček, Martin a Zálešák, Martin.** PCM akumulční zařízení v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie a termoelektrickým chlazením. *Vytápění, větrání, instalace.* Zlín : ÚAŘT, FAI UTB ve Zlíně, 2019. Sv. 28, vydání 1, stránky 18-25. ISSN 1210-1389.
8. **Vítek, Marek.** *Užití materiálů se změnou fáze k akumulaci tepelné energie.* [Diplomová práce] Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2008.
9. **Langer, Jan.** *Aplikace hysterezního modelu materiálu pro akumulaci tepla na latentní akumulátor s PCM ve válcových pouzdrech.* [Diplomová práce] Praha : ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2021.
10. **Krause, Luboš.** *Akumulace tepelné energie v PCM.* [Diplomová práce] Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2017.
11. **Alva, Guruprasad, a další.** A review, *Energy Build. Synthesis, characterization and applications of microencapsulated phase change materials in thermal energy storage.* 2017. Sv. 144, stránky 276-294. ISSN 0378-7788.
12. **Castell, a další.** *Energy and Buildings. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling.* 2010. Sv. 42, 4, stránky 534-540. ISSN 0378-7788.
13. **Vadhera, Jatin, a další.** *Materials Today: Proceedings. Study of Phase Change materials and its domestic application.* 2018. Sv. 5, 2, stránky 3411-3417. ISSN 2214-7853.



14. **Lamrani, Johannes a Kuznik.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Phase change materials integrated into building walls: An updated review.* 2021. Sv. 140. ISSN 1364-0321.
15. **Sportisimo.** Skivo parafín univerzál. 2022.
16. **Baker, James.** MSDS Sodium Sulfate Anhydrous. [Online] 2006. <https://web.archive.org/web/20070528132804/http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/s5022.htm>.
17. **Vohlídal, Jiří, Štulík, Karel a Julák, Alois.** *Chemické a analytické tabulky.* 1. vydání. Praha : Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-855-5..
18. **Ladislav, Hoffmann.** Síran sodný dekahydrát čistý. *Dr. Hoffmann.* 2022.
19. **Hoshi, a další.** Solar Energy. *Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR.* 2005. Sv. 79, 3, stránky 332-339. ISSN 0038-092X.
20. **Březina, a další.** *Chemické a analytické tabulky.* 1. vydání. Praha : SNTL, 1986. str. 344.
21. **Giro-Paloma, a další.** A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM).* 2016. Sv. 53, stránky 1059-1075. ISSN 1364-0321.
22. **Ondřejová, Kateřina.** *Materiály s fázovým přechodem.* [Bakalářská práce] Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018.
23. **Sarier, Nihal a Onder, Emel.** An overview, Thermochemica Acta. *Organic phase change materials and their textile applications.* 2012. Sv. 540, stránky 7-60. ISSN 0040-6031.
24. **Mareček, Tomáš.** *Akumulace tepelné energie skupenskou změnou látek.* [Bakalářská práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2015.
25. **Mehling, Herald a Cabeza, Luisa.** *Heat and cold storage with PCM.* 2008. ISBN: 978-3-540-68557-9.
26. **Ragasová, Ina.** *Krystalizace v podchlazeném vodném roztoku sacharózy.* [Diplomová práce] Pardubice : Univerzita Pardubice, 2012.
27. **Mehling, Herald, Brütting, Michael a Haussmann, Thomas.** Journal of Energy Storage. *PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021.* 2022. Sv. 51. ISSN 2352-152X.
28. **Dhingra, Devakar a Srivastava, Shreyas.** PCM improves the efficiency of the running application, additionally it saves on the operating and maintaining cost of the application. *Cold Chain Logistics and Refrigeration Using PCM.* 2019.

29. **Jurkowska, Małgorzata a Szczygieł, Ireneusz.** Review on properties of microencapsulated phase change materials slurries (mPCMS). *Applied Thermal Engineering*. 2016. Sv. 98, stránky 365-373. ISSN 1359-4311.
30. **Omara, Adil.** Journal of Energy Storage. *Phase change materials for waste heat recovery in internal combustion engines: A review*. 2021. Sv. 44. ISSN 2352-152X.
31. **Khan, Mohamed, Saidur a Sulaiman, Fahad.** A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Sv. 76, stránky 105-137. ISSN 1364-0321.
32. **Saeed, Rami, Schlegel a Sawafta.** Energy. *Characterization of high-temperature PCMs for enhancing passive safety and heat removal capabilities in nuclear reactor systems*. 2019. Sv. 189. ISSN 0360-5442.
33. **Wang, Xiaonan, a další.** A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building. *Design, characteristic, performance and application, Energy and Buildings*. 2022. Sv. 260. ISSN 0378-7788.
34. **Ramakrishnan, Sayanthan, a další.** Applied Energy. *A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites*. 2015. Sv. 157, stránky 85-94. ISSN 0306-2619.
35. **Ghasemi, Kasra, Tasnim, Syeda a Mahmud, Shohel.** Sustainable Energy Technologies and Assessments. *PCM, nano/microencapsulation and slurries: A review of fundamentals, categories, fabrication, numerical models and applications*. 2022. Sv. 52. ISSN 2213-1388.
36. **Hamidi, Youssef, a další.** Energy and Buildings. *Integrating PCM into hollow brick walls: Toward energy conservation in Mediterranean regions*. 2021. Sv. 248. ISSN 0378-7788.
37. **Zhong, Kecheng, a další.** Energy and Buildings. *Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material*. 2015. Sv. 106, stránky 87-95. ISSN 0378-7788.
38. **Al-Yasiri, Qudama a Szabó, Márta.** Sustainable Energy Technologies and Assessments. *Experimental evaluation of the optimal position of a macroencapsulated phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions*. 2021. Sv. 45. ISSN 2213-1388.
39. **Zhou, Tongyu a Darkwa, Jo, Kokogiannakis, Georgios.** Renewable Energy. *Thermal evaluation of laminated composite phase change material gypsum board under dynamic conditions*. 2015. Sv. 78. ISSN 0960-1481.
40. **Esmaeeli, Hadi, a další.** Materials & Design. *Numerical analysis of the freeze-thaw performance of cementitious composites that contain phase change material (PCM)*. 2018. stránky 74-87. ISSN 0264-1275.

41. **Zavoralová, Pavla.** PCM ve stavebnictví Díl 2. *PCM jako stavební materiál - možnosti aplikace.* [Online] 2011. [Citace: 10. 05 2022.] <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7381-pcm-ve-stavebnictvi-dil-2-pcm-jako-stavebni-material-moznosti-aplikace?msclkid=14f4a3d7c62b11ec82daa207c6b04a6a>.
42. **TRIBON, s.r.o.** Polyetylen - PE. [Online] <https://www.technicke-plasty-tribon.cz/prodej-plastu/materialy-polotovaru/bezne-plasty/polyetylen>.
43. **Sova, Miloš.** TECH portal.cz. *Vlastnosti polyethylenu.* [Online] 2015. <https://www.techportal.cz/33/vlastnosti-polyethylenu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxYXINuL5OkcY/>.
44. **Anthony, John, a další.** *Handbook of Mineralogy, Elements, Sulfides and Sulfosalts.* Arizona : Mineral data publishing, 1990. str. 192. ISBN-10 : 0962209708.
45. **Bochemie, a.s.** Vlastní produkty a technologie. *nZ-BOCH 03.* [Online] <https://www.nanoasociace.cz/bochemie/>.
46. **Król-Morkisz, Klaudia a Pielichowska, Kinga.** Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles. *Thermal Decomposition of Polymer Nanocomposites With Functionalized Nanoparticles.* 2019. stránky 402-435. ISBN 9780128140642.
47. **Mettler, Toledo.** Dynamický mechanický analyzátor. [Online] [https://www.mt.com/cz/cs/home/products/Laboratory\\_Analytics\\_Browse/TA\\_Family\\_Browse/DMA.html](https://www.mt.com/cz/cs/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/DMA.html).
48. **Petříková, Aneta.** *Možnosti mikroenkapsulace chemických substancí v matrici PLA.* [Bakalářská práce] Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019.
49. **Pivokonský, Radek.** Stárnutí polymerních materiálů – aneb jak nám může pomoci reologie. [Online] Ústav pro hydrodynamiku Akademie věd ČR. [https://www.ih.cas.cz/files/uploads/4\\_verejnost/1\\_verejnost/Reologie\\_starnuti.pdf](https://www.ih.cas.cz/files/uploads/4_verejnost/1_verejnost/Reologie_starnuti.pdf).
50. **Běhálek, Luboš.** *Polymery.* Svitavy : © Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2016. ISBN: 978-80-88058-68-7.
51. **Karlova, Univerzita.** Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC). *Matematicko-fyzikální fakulta-Katedra fyziky materiálů.* [Online] <https://www.mff.cuni.cz/cs/kfm/experimentalni-vybaveni/diferencni-skenovaci-kalorimetrie-dsc>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PCM	Phase change materials
PE	Polyethylen
Apod	A podobně
LDPE	Low density polyethylen
DSC	Diferenciální skenovací kalorimetrie
TGA	Termogravimetrická analýza
MJ	Megajoule
kWh	Kilowatthodina
°C	Stupeň Celsia
%	Procento
Obr.	Obrázek
Tab.	Tabulka
kJ	Kilojoule
kg	Kilogram
K	Kelvin
Viz.	Více
Atd.	A tak dále
HDPE	High density polyethylen
IZS	Integrovaný záchranný systém
J	Joule
g	Gram
AcCNF	Acetylovaná celulóza
Ot/min	Otáčky za minutu
SSPCM	Tvarová stabilizace PCM
Ad.	A další
Kol.	Kolektiv
mm	Milimetr
Tj.	To je
m	metr
W	watt

---

cm	centimetr
E	Youngův modul pružnosti
MPa	Megapascal
Hm. %	Hmotnostní procenta
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
DMA	Dynamická mechanická analýza
TMA	Teplotní mechanická analýza
h	vzdálenost desek
TCi	Tepelná vodivost
min.	minuta
graf.	grafit
µm	Mikrometr

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1:</b> Teplotně kapacitní (citelné) a latentní teplo během změny fáze v oblasti řízení teploty (7) .....	13
<b>Obr. 2:</b> Základní rozdělení PCM (3).....	15
<b>Obr. 3:</b> Jedno z možných využití parafínových vosků (15) .....	18
<b>Obr. 4:</b> Glauberova sůl (18).....	19
<b>Obr. 5:</b> Aplikace PCM ve zdravotnictví (27).....	22
<b>Obr. 6:</b> Využití PCM materiálů pro transport teplotně citlivých výrobků a zboží (27).....	22
<b>Obr. 7:</b> Využití PCM pro výrobky denní potřeby, zejména pro pohodlí jejich uživatelů (27) .....	24
<b>Obr. 8:</b> Schéma mikroenkapsulace v PCM (33) .....	25
<b>Obr. 9:</b> Schéma makroenkapsulace v PCM (33) .....	26
<b>Obr. 10:</b> Tvarová stabilizace v PCM (33).....	27
<b>Obr. 11:</b> Ukázky PCM aplikace v různých odvětvích (33).....	28
<b>Obr. 12:</b> Různé aplikace PCM v budovách (33).....	29
<b>Obr. 13:</b> Podlahové vytápění (PCM Technology) (27).....	30
<b>Obr. 14:</b> Konstrukce zásobníků společnosti Hangzhou Phase Change Technology (10)....	34
<b>Obr. 15:</b> Řazení zásobníků v solárním okruhu (10) .....	34
<b>Obr. 16:</b> Systém Delta Cool v praxi (41) .....	36
<b>Obr. 17:</b> Strukturní vzorec polyethylenu .....	39
<b>Obr. 18:</b> Použitý LDPE typ LD 100 BR .....	40
<b>Obr. 19:</b> Použitý typ vosku, typ RT 35HC .....	40
<b>Obr. 20:</b> Použitý grafit .....	41
<b>Obr. 21:</b> Bílý, krystalický nano nZ-BOCH 01 (ZnO-BOCH_01) .....	42
<b>Obr. 22:</b> Laboratorní dvoušnekový mikrohnětič DSM Xplore .....	42
<b>Obr. 23:</b> Ruční lis na lisování destiček .....	43
<b>Obr. 24:</b> Vystřížené PCM vzorečky ve tvaru mince pro stanovení tepelné stability .....	46
<b>Obr. 25:</b> Používané váhy XA 82/220.R2 pro stanovení hmotnosti .....	47
<b>Obr. 26:</b> Sušárna Binder FD 53 použitá pro stanovení tepelné stability .....	47
<b>Obr. 27:</b> Graf závislosti úbytku hmotnosti v čase pro materiál PE/vosk.....	49
<b>Obr. 28:</b> Graf závislosti úbytku hmotnosti v čase pro materiál PE/ZnO/vosk .....	50
<b>Obr. 29:</b> Graf závislosti úbytku hmotnosti v čase pro materiál PE/grafit/vosk.....	50
<b>Obr. 30:</b> Přístroj TGA Q500-0299.....	51

<b>Obr. 31:</b> Grafický výstup z TGA měření pro vzorek PE/vosk (59/41) .....	52
<b>Obr. 32:</b> Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 92/8 .....	54
<b>Obr. 33:</b> Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 90/10 .....	54
<b>Obr. 34:</b> Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 79/21 .....	55
<b>Obr. 35:</b> Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 65/35 .....	55
<b>Obr. 36:</b> Zobrazení struktury materiálu PE/vosk v hmotnostním poměru 59/41 .....	56
<b>Obr. 37:</b> Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/ZnO/vosk v hm. poměru 58/7/35 %....	57
<b>Obr. 38:</b> Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/ZnO/vosk v hm. poměru 40/9/51 %....	57
<b>Obr. 39:</b> Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/graf./vosk v hm. poměru 54/5/41 %....	58
<b>Obr. 40:</b> Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/graf./vosk v hm. poměru 46/7/47 %....	58
<b>Obr. 41:</b> Pohled na vnitřní strukturu materiálu PE/graf./vosk v hm. poměru 36/8/56 %....	59
<b>Obr. 42:</b> Rotační reometr deska – deska typ MCR 502 .....	60
<b>Obr. 43:</b> Závislost viskozity na úhlové frekvenci pro PE/vosk.....	60
<b>Obr. 44:</b> Závislost viskozity na úhlové frekvenci pro PE/ZnO/vosk .....	61
<b>Obr. 45:</b> Závislost viskozity na úhlové frekvenci pro PE/grafit/vosk.....	61
<b>Obr. 46:</b> Závislost elastického modulu a tlumícího faktoru na teplotě pro PE/vosk .....	62
<b>Obr. 47:</b> Závislost elastického modulu a tlumícího faktoru na teplotě pro PE/ZnO/vosk ..	63
<b>Obr. 48:</b> Závislost elastického modulu a tlumícího faktoru na teplotě pro PE/grafit/vosk	63
<b>Obr. 49:</b> Přístroj pro měření tepelné vodivosti TCi-3-A .....	65
<b>Obr. 50:</b> Přístroj Mettler Toledo DSC 1.....	67
<b>Obr. 51:</b> Grafické znázornění DSC měření pro vybrané materiály .....	67

**SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 1:</b> Výhody a nevýhody jednotlivých fázových přechodů.....	16
<b>Tab. 2:</b> Připravené vzorečky a jejich hmotnostní koncentrace v %.....	43
<b>Tab. 3:</b> Naměřená data úbytku hmotnosti PCM v čase.....	48
<b>Tab. 4:</b> Porovnání tepelné stability vs. TGA .....	53
<b>Tab. 5:</b> Viskozity pro jednotlivé koncentrace PCM.....	62
<b>Tab. 6:</b> Hodnoty teplot krystalizace odečtené ze střední hodnoty poklesu elastického modulu .....	64
<b>Tab. 7:</b> Hodnoty teplot krystalizace odečtené ze střední hodnoty růstu tlumícího faktoru .....	64
<b>Tab. 8:</b> Tepelné vodivosti jednotlivých pracovních vzorků PCM.....	66
<b>Tab. 9:</b> Teploty tání, skelných přechodů a latentních tepel pro jednotlivé materiály .....	68