

Příprava a charakterizace materiálů pro pasivní absorpci a uvolňování tepelné energie

Radim Řezníček

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Radim Řezníček
Osobní číslo:	T22804
Studijní program:	B0711A130009 Materiály a technologie
Specializace:	Polymerní materiály a technologie
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Příprava a charakterizace materiálů pro pasivní absorpci a uvolňování tepelné energie

Zásady pro vypracování

Materiály vykazující fázovou přeměnu jsou využívány pro absorpci a uvolnění energie. Nacházejí komerční využití jako pasivní klimatizace. Jedním z možných způsobů přípravy těchto materiálů je míchání vosků do polymerní matrice. Polymerní matrice slouží jako nosný materiál, zatímco vosk slouží jako aktivní komponent vykazující fázovou přeměnu, tj. umožňuje absorpci a uvolnění tepla během této přeměny.

Cílem práce bude příprava kompozitu na bázi termoplastického polymeru a parafinového vosku pomocí různých zpracovatelských technik, vylisování desek, charakterizace kompozitu z pohledu zpracovatelských a mechanických vlastností. Student zpracuje literární rešerši na dané téma. V laboratoři bude připravovat materiály s různou koncentrací vosků s cílem optimalizovat složení směsi s ohledem na entalpii fázového přechodu a udržení mechanických vlastností potřebných pro bezpečnou manipulaci s materiálem. Pomocí DSC bude sledován fázový přechod vosku z pevné do kapalné fáze a stanovováno množství tepla, které je při tomto procesu absorbováno-uvolněno. Únik vosku z materiálu bude charakterizován vážením temperovaných vzorků v čase. Mechanické vlastnosti budou sledovány tahovými zkouškami za pokojové teploty, pomocí frekvenčních závislostí reálného a ztrátového modulu za zvýšené teploty.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Al-Gunaid, T., Sobolciak, P., Chria, I., Karkri, M., Mrlik, M., Ilcikova, M., Sedlacek, T., Popelka, A., Krupa, I. Phase change materials designed from Tetra Pak waste and paraffin wax as unique thermal energy storage systems. Journal of Energy Storage, 2023, 64, 107173, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107173>
2. Sobolciak, P., Mrlik, M., Popelka, A., Minarik, A., Ilcikova, M., Srnec, P., Nogellova, Z., Quederni, M., Krupa, I. Foamed Phase Change Materials Based on Recycled Polyethylene/ParaffinWax Blends. Polymers 2021, 13, 1987. <https://doi.org/10.3390/polym13121987>
3. Nishad, S., Kasak, P., Krupa, I. Highly conductive phase change composites based on paraffin-infiltrated graphite panels for photo/electrothermal conversion and storage. Journal of Energy Storage, 2023, 66, 107449, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107449>.
4. Wang, X., Li, W., Luo, Z., Wang, K., Shah, S. P. Critical review on phase changematerials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. Energy & Buildings, 2022, 260, 111923. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>.
5. Matuszek, K., Kar, M., Pringle, J. M., and Mac Farlane, D. R. Phase Change Materials for Renewable Energy Storage at Intermediate Temperatures. Chemical Reviews, 2023, 123, 1, 491–514. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00407>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Markéta Ilčíková, Ph.D.**
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

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

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

Ve Zlíně dne 3. března 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- 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 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na studium nových kompozitních materiálů vykazujících fázovou přeměnu. Cílem bylo kombinovat termoplastický materiál s parafínovým voskem a vodivým plnivem, expandovaným grafitem (EG), za účelem zlepšení efektivity fázového přechodu. Kompozity byly charakterizovány z hlediska zpracovatelských a materiálových vlastností včetně diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC), dynamické mechanické analýzy (DMA), tahové zkoušky, zkoušky hoření a úniku parafínového vosku. Následně byly materiály vystaveny stárnutí v podmínkách simulujících jeden rok na Blízkém Východě. Materiálové vlastnosti byly porovnány se stárnutými vzorky. Na závěr byly vybrány materiály vhodné pro aplikaci ve stavebnictví.

Klíčová slova: PCM materiály, LDPE kompozity, expandovaný grafit, latentní teplo, hořlavost, stárnutí

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the study of new composite materials with phase transformation properties. The aim was to combine a thermoplastic material with paraffin wax and a conductive filler, expanded graphite (EG), to improve the phase-change performance. The composites were characterized from the point of view of processing, and materials properties including differential scanning calorimeter (DSC), dynamic mechanical analysis (DMA), tensile tests, burn tests and paraffin wax leakage. Further, the composite materials were subjected to one-year aging under Middle East weather conditions. The comparison of materials properties of as-prepared and aged samples was performed. Finally, the materials suitable for utilization in building industry were selected.

Keywords: PCM materials, LDPE composite, expanded graphite, latent heat, flammability, aging

Buď dravej, žravej, drahej, klidně i malej, ale nenechávej věci na poslední chvíli a makej dokud, víš co. Bojuj za ty, kteří tě milují, bojuj za to, co máš rád, bojuj za to, co tě v budoucnu bude hřát.

Tímto chci poděkovat mé rodině co mi umožnila a motivovala pro tuto cestu studeného potu, bez mozolů od lopaty. Svě vedoucí a kulturnímu gangu na CPS za pomoc v tvorbě tohoto díla a za zkušenost k nezaplacení. Svým spolužákům za výbornou zábavu a empatii, jak při konečném studiu, tak i mimo něj. A hlavně sobě za to, že to tu dnes píše po dlouhé trase.

OBSAH

ÚVOD.....	13
TEORETICKÁ ČÁST	14
1 MATERIÁLY S FÁZOVÝM PŘECHODEM (PCM)	15
1.1 ROZDĚLENÍ PCM	15
1.2 PEVNÉ – KAPALNÉ PCM	16
1.2.1 ANORGANICKÉ SOLI	16
1.2.2 HYDRÁTY SOLÍ	17
1.2.3 KOVOVÉ SLITINY	17
1.3 ORGANICKÉ PCM	17
1.3.1 ALKOHOLY.....	18
1.3.2 MASTNÉ KYSELINY	18
1.3.3 PARAFÍNY.....	18
1.3.4 POLYMERICKÉ PCM.....	19
1.3.5 RECYKLÁTY	19
1.4 PEVNÉ – PEVNÉ PCM	20
1.4.1 SLITINY S TVAROVOU PAMĚTÍ	20
2 AKTIVNÍ SLOŽKA	21
3 PLNIVA	23
3.1 KERAMIKA A UHLÍKOVÁ PLNIVA	24
3.2 KOVOVÁ PLNIVA	24
3.3 POLYMERNÍ PLNIVA	25
3.4 HYBRIDNÍ PLNIVA.....	25
4 VYUŽITÍ V PRAXI.....	26
4.1 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL.....	26
4.2 TEXTILNÍ PRŮMYSL	26
4.3 CHLAZENÍ ELEKTRONIKY	27
4.4 ENERGETICKY ÚSPORNÉ BUDOVY	27
4.5 LETECKÝ A KOSMICKÝ PRŮMYSL.....	28
5 BEZPEČNOSTNÍ A ENVIROMENTÁLNÍ ASPEKTY	29
5.1 RECYKLOVATELNOST A DRUHOTNÉ VYUŽITÍ PCM MATERIÁLŮ.....	29
5.2 EKOLOGICKÁ STOPA PCM.....	29

5.3	EKOLOGICKÁ ALTERNATIVA.....	30
6	METODY MĚŘENÍ.....	31
6.1	DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE.....	31
6.1.1	PRINCIP MĚŘENÍ	31
6.1.2	TYPY DSC PŘÍSTROJŮ	31
6.1.3	MĚŘENÉ VELIČINY.....	32
6.1.4	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ	32
6.2	TAHOVÉ ZKOUŠKY	32
6.2.1	PRINCIP MĚŘENÍ	33
6.2.2	VÝVOJOVÁ TAHOVÁ KŘIVKA	35
6.3	ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI.....	36
6.3.1	PRINCIP METODY	36
6.3.2	VYSTUPUJÍCÍ VÝSLEDKY.....	36
6.4	DMA	37
6.4.1	PRINCIP METODY	37
6.4.2	TYPY DMA	37
6.4.3	MĚŘENÉ VELIČINY.....	38
6.5	ÚBYTEK HMOTNOSTI.....	38
II	PRAKTICKÁ ČÁST	39
7	EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP.....	40
7.1	MATERIÁLY.....	40
7.2	PŘÍPRAVA PCM SMĚSÍ	40
7.3	MÍCHÁNÍ.....	40
7.4	LISOVÁNÍ ZA TEPLA	40
8	CHARAKTERIZACE.....	41
8.1	DSC.....	41
8.2	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	41
8.3	STABILITA SMĚSI	42
8.4	DMA	42
8.5	HOŘLAVOST	42
8.6	ÚBYTEK HMOTNOSTI MATERIÁLU	42
9	VÝSLEDKY A DISKUZE	43
9.1	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	44
9.2	DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA	51
9.3	STABILITA KOMPOZITŮ.....	54

9.4 HOŘLAVOST	56
9.4.1 RYCHLOST UVOLŇOVÁNÍ TEPLA	56
9.5 ÚBYTEK HMOTNOSTI.....	59
9.6 DIFERENCIÁLNÍ SKENOVACÍ KALORIMETR.....	60
ZÁVĚR	64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
SEZNAM OBRÁZKŮ	71
SEZNAM TABULEK.....	72
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73

ÚVOD

S množstvím celosvětové rostoucí spotřeby energie vzniká potřeba jejího zodpovědného využívání. Jednou z možností efektivního využití představují materiály s fázovou přeměnou.

Tyto materiály dokážou cyklicky držet či regulovat tepelnou energii při výrobních procesech, zajišťují bezpečnost elektronice, využívají se i v kosmonautice. Energetické hospodaření je řízeno množstvím latentního tepla, které je materiál schopen přijat nebo odevzdat při zachování své teploty. V těchto systémech je nejčastěji využívám fázový přechod z pevného do kapalného stavu a naopak. Děj se nazývá izotermní fázová přeměna. Ačkoliv je tento jev známý již dekády, a objevily se již komerční produkty, stále probíhá výzkum s cílem zefektivnit tepelné vlastnosti, uchovat mechanické vlastnosti a zajistit stabilitu materiálů během ohřívacích/chladicích cyklů.

Tato práce se zabývá plněním LDPE voskem a expandovaným grafitem. Vosk plní funkci aktivní složky poskytující fázovou přeměnu, zatímco expandovaný grafit zvyšuje tepelnou vodivost materiálu a zajišťuje efektivní tavení vosku v kompozitu. Cílem práce bylo připravit kompozity vykazující vysoké latentní teplo při zachování mechanických vlastností vhodných pro využití ve stavebním průmyslu, konkrétně jako součást vnitřního zdiva. V práci se testovaly dva typy vosků s rozdílnými teplotami fázového přechodu, vosk RT 28HC a RT 35HC, od stejné firmy Rubitem. Jako polymerní matrice byl využit nízkohustotní polyethylen (LDPE). Pro zvýšení tepelné vodivosti se přidal expandovaný grafit (EG). Mechanické vlastnosti byly sledovány pomocí tahové zkoušky a dynamické mechanická analýzy. Množství latentního tepla bylo měřeno pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie. V neposlední řadě byla sledována i stabilita materiálů při zvýšených teplotách a v čase. Připravené kompozity byly podrobeny stárnutí v podmínkách simulující jeden rok na Blízkém Východě. Materiálové vlastnosti byly následně srovnány se vzorky, které podrobeny stárnutí nebyly. Pro komplexní charakterizaci materiálů byly provedeny i zkoušky hořlavosti.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních kapitol. První, teoretická část, je věnována informacím o materiálech s fázovou přeměnou (PCM) a jejich využití. Jsou zde vysvětleny principy základních PCM systémů, na jaké bázi fungují, s čím se kombinují a metodiky měření. Druhá, praktická část, je zaměřena na samotný výzkum.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 MATERIÁLY S FÁZOVÝM PŘECHODEM (PCM)

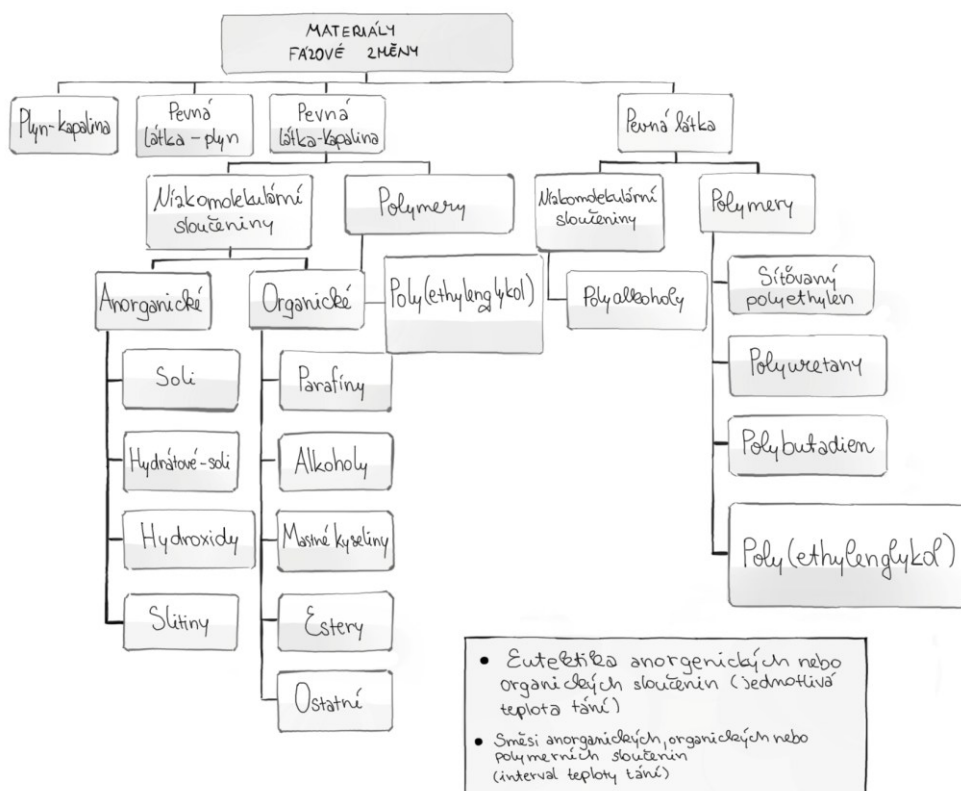
Ve světě emisí a ztrátové energie je uchování každé formy energie či jen její přeměna v něco užitého pro další proces zpracování nebo využití velmi důležitým krokem. Chytré materiály s fázovou změnou (Phase Change Materials, PCM) jsou právě speciální svojí schopností ukládat a uvolňovat tepelnou energii ve formě latentního tepla v izotermických podmínkách. PCM jsou definovány jako materiály, které procházejí fázovou přeměnou během ohřevu /chlazení nad/pod teplotou fázového přechodu [1]. Při vystavení PCM tepelnému zdroji dochází nejdříve k ohřevu materiálu jako důsledek absorpce tepla. Jakmile je dosažena teplota fázového přechodu (phase transition temperature), materiál absorbuje teplo bez toho, aby se teplota zvyšovala. Toho teplo je nazýváno latentní teplo. PCM materiál absorbuje toto teplo při konstantní teplotě do té doby, dokud komponent vykazuje fázový přechod kompletně nepřejde do kapalné fáze. Poté co je fázová přeměna dokončena a tepelný zdroj stále dodává energii, teplota materiálu začne opět stoupat.

Obecně je možné tepelnou energii uchovávat ve formě senzibilní termální energie nebo latentního tepla. V prvním případě se materiál ohřívá nebo chladí bez fázové přeměny, tedy zvyšuje nebo snižuje svoji teplotu. Tato metoda se nazývá senzibilní termální energetické úložiště (sensible heat thermal energy storage-SHTES). Efektivita těchto materiálů závisí na vlastnostech materiálu jako je objem, hustota a specifická tepelná kapacita. V případě využívání latentního tepla se materiál vnímá jako „houba“, tedy akumuluje energii při přibližném izotermickém ději v úzkém rozptylu teplot. Této metodě se nazývá latentní termální energetické úložiště (latent heat thermal energy storage-LHTES). [1-5]. PCM systémy mohou uloženou energii uvolnit ve formě senzibilního i latentního tepla.

V současnosti se dosáhlo rychlého pokroku těchto materiálů a jejich využití. Stále ale jejich pokrok nekončí a výzkum a inovace PCM se posunuje k jejich dalším využitím a rozptylu teplotního nebo energetického.

1.1 Rozdělení PCM

Typy PCM směsí záleží na jejich počátečním a následném skupenství. Tedy lze kvalifikovat typy pevná látka – pevná látka, pevná látka – kapalná, pevná látka – plynná a kapalná – plynná viz. Obr. 1. [2; 4-9]



Obrázek 1 Typy PCM [2]

Další rozdělení těchto tříd je v tepelném rozmezí fázového přechodu. Dělí se na tři intervaly, které i dále určují v kterém odvětví se prakticky uplatní: (i) nízkoteplotní PCM – teplota fázového přechodu do 15 °C; (ii) středněteplotní PCM – teplotní rozsah od 15–90 °C; (iii) vysokoteplotní PCM – teplota fázového přechodu nad 90 °C. [2; 4; 5]

1.2 Pevné – kapalné PCM

Mnoho druhů PCM materiálu s pevnou a kapalnou fází, jako voda, parafíny, polymery nebo kovové slitiny, je využíváno pro skladování tepelné energie. V dalších podkapitolách si je více rozepíšeme.

1.2.1 Anorganické soli

Anorganické PCM materiály se obvykle dělí na dvě základní skupiny: hydrátové soli a kovové slitiny. Hydrátové soli tvoří sloučeniny prvků ze skupiny anorganických solí, jako jsou oxidy, dusičnany nebo halogenidy, které váží molekuly vody v přesně definovaném poměru.

1.2.2 Hydráty solí

Hydráty solí s obecným vzorcem $AB \cdot nH_2O$ jsou anorganické soli obsahující krystalizační vodu. Během fázové přeměny dochází k dehydrataci soli, přičemž vzniká buď hydrát soli, který obsahuje méně molekul vody, nebo bezvodá forma soli.

V závislosti na chování při tání lze hydráty solí klasifikovat jako:

- hydráty solí s kongruentním chováním při tání – při teplotě tání je sůl rozpustná v hydratační vodě;
- hydráty solí s inkongruentním táním – při teplotě tání je sůl v hydratační vodě rozpustná pouze částečně;
- hydráty solí s polokongruentním táním – během procesu tání mají pevná a kapalná fáze, které jsou v rovnováze, rozdílné složení v důsledku přeměny hydrátu soli na hydrát soli s menším množstvím hydratační vody. [2; 10; 11]

nedávná studie potvrdila soli $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ a $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ jako vhodné komponenty pro lithiové baterie. Jejich výhodou je odolnost proti úniku a spolehlivost PCM při tepelných cyklech. [10] Hydráty solí dále nacházejí uplatnění v solárních panelech nebo jako tepelné úložiště u výměníků tepla, kde jsou vyžadovány soli pro velmi vysoké teploty nad 300 °C. [11]

1.2.3 Kovové slitiny

Kovové slitiny se díky své vysoké tepelné odolnosti a opakovatelnosti používají jako vysokoteplotní PCM. Bylo zjištěno, že binární a ternární slitiny relativně hojně zastoupených prvků Al, Cu, Mg a Zn mají největší teplo fázového přechodu na hmotnostní nebo objemové bázi. Ne všechny perspektivní materiály jsou však vhodné pro použití v teplotních energetických úložištích (thermal energy storage, TES). Pro použití jako PCM ve vysokoteplotních systémech TES byly studovány především eutektické slitiny hliníku, a to díky jejich vhodné teplotě fázové změny, vysoké hustotě latentního tepla a dobré tepelné stabilitě ve srovnání s jinými materiály pro ukládání latentní tepelné energie.[2; 12; 6; 13]

1.3 Organické PCM

Organické PCM zahrnují široké spektrum. Patří sem příkladem parafíny, mastné kyseliny, eutektika, estery a organické sloučeniny.

1.3.1 Alkoholy

Vzhledem k tomu, že alkoholy jsou pro účely skladování energie zkoumány již více než čtyřicet let, je nový vývoj v oblasti PCM spojen s konkrétními kompozity nebo nanomateriály, které mají zvláštní vlastnosti, jako je například přidaná elektrická vodivost.

Důležitou vlastností je, že mají schopnost snášet určitý stupeň tepelného šoku při použití jako vodivé materiály.[2; 14] Ve studii již byl nápad kombinovat poly(vinyl alkohol) s aerogelem pro retardaci hoření a jako skelet polyetylen glykol, s tím výsledkem, že se alkohol hrál roli stabilizátoru a zpomalovače hoření s nanoplnivem BN-HN₂. [14]

1.3.2 Mastné kyseliny

Použití mastných kyselin ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{-COOH}$) jako PCM pro skladování energie se v poslední době rozšířilo díky jejich příznivým kinetickým a termodynamickým vlastnostem pro nízkoteplotní latentním tepelným úložištěm (latent heat storage, LHS). Na rozdíl od parafinů mají vysoké latentní teplo tání a konzistentní chování při tání a mrznutí s malým nebo žádným přechlazováním. Mastné kyseliny však mají nepříjemný zápach, jsou poněkud žíravé a stojí více než technické parafíny. Teploty tání a tuhnutí, teplo tání a stupeň krystalizace postupně rostou s rostoucím počtem atomů uhlíku v molekule mastné kyseliny.

Nasycené mastné kyseliny mají relativně vysoké teploty tání a varu a při mrznutí vykazují minimální objemové změny fázového přechodu s malým nebo žádným přechlazením.[2]

1.3.3 Parafíny

Mezi široce využívané pevné a kapalně PCM patří parafíny, což jsou nasycené uhlovodíky se vzorcem $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. Jsou považovány za netoxické a neškodné pro životní prostředí a mají vysokou kapacitu akumulace latentního tepla v malém rozsahu teplot. Přestože parafíny mají mírnou hustotu TES, jejich nízká tepelná vodivost vyžaduje široký povrch. To snižuje rychlost jejich nabíjení a vybíjení teplem během cyklů tání a tuhnutí. Parafíny mají latentní teplo založené na molární hmotnosti a jejich různé teploty fázové změny umožňují flexibilní výběr správného PCM pro určitou aplikaci LHTES. Při opakovaných cyklech přechodu mezi pevnou a kapalnou fází nedochází k jejich separaci a jsou komerčně využitelné. Kapalně parafíny spadají do rozmezí C₅ až C₁₅, zatímco jejich vyšší analogy jsou voskovité pevné látky s teplotami tání mezi 23 a 67 °C. Surová ropa se destiluje za účelem vytvoření

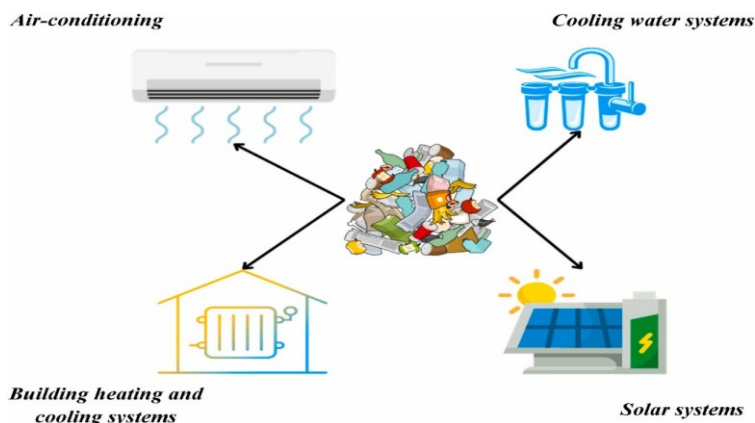
komerčního parafínu a směsi několika uhlovodíků. Obecně platí, že teplota tání a teplo tání se zvyšují s průměrnou délkou uhlovodíkového řetězce. Tento vztah lze využít k návrhu vlastností PCM smícháním fyzikálně odlišných parafínů.[2; 4; 11]

1.3.4 Polymerické PCM

Polyethylen glykol je významný semikrystalický polymer, který má opakující se jednotku poly(ethylenoxid) zakončenou OH, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$. Jako rozpouštědlo se používá ve vodních barvách, nátěrech papíru, textilních vláknech, obalech a lécích. Díky vysokému stupni krystalinity a velkému teple tání jej lze využít jako PCM. Jeho klíčovou korelací TES je jeho molární hmotnost.[2; 5; 15; 16] V práci pana Karamana se zabírali kompozitem PEG s diatomitem. Zjistili, že maximální množství PEG obsaženého v diatomitu je 50 %, přičemž se dále ukázala chemická kompatibilita pomocí FTIR. Jako výsledek byl slibný kompozit pro tepelně úložné desky do stavebnictví.[15] Jako další polymerní PCM kompozit je polyvinyliden fluorid v emulzi s dimethylformalamidem s voskem RT-25HC. V této práci se využilo emulzního tryskového vstřikování pomocí a fabrikace kompozity pro zajištění elasticity a tepelného úložiště.[16]

1.3.5 Recykláty

Jako kompozitní materiály jsou PCM velkým kandidátem pro recyklované nebo odpadové materiály. V práci pana Hordova se zabírali organickými a anorganickými odpadky a jejich následné kompozitování pro tepelnou udržitelnost latentního tepla. Jejich práce ukázala jako vhodná alternativa pro recyklaci odpadků s velkým tepelně energetickým skladováním, viz Obr. 2. [4]



Obrázek 2 Využití organických a anorganických odpadů [4]

1.4 Pevné – pevné PCM

Vzhledem k tomu, že PCM v pevné fázi často vykazují nižší latentní teplo fázového přechodu, jsou PCM v pevné a kapalně fázi nyní velmi zkoumány a využívány v aplikacích pro skladování energie. Ve srovnání s PCM pevná látka-kapalina však mají PCM pevná látka-pevná látka hlavní výhody v menší objemové změně během fázového přechodu a v nemožnosti úniku. Tyto materiály fungují tak, že ukládají a uvolňují tepelnou energii prostřednictvím jedinečné krystalové struktury, která se mění z uspořádanou krystalové fáze na vysokoteplotní neuspořádanou semikrystalickou pevnou fázi.[5; 7; 11; 12]

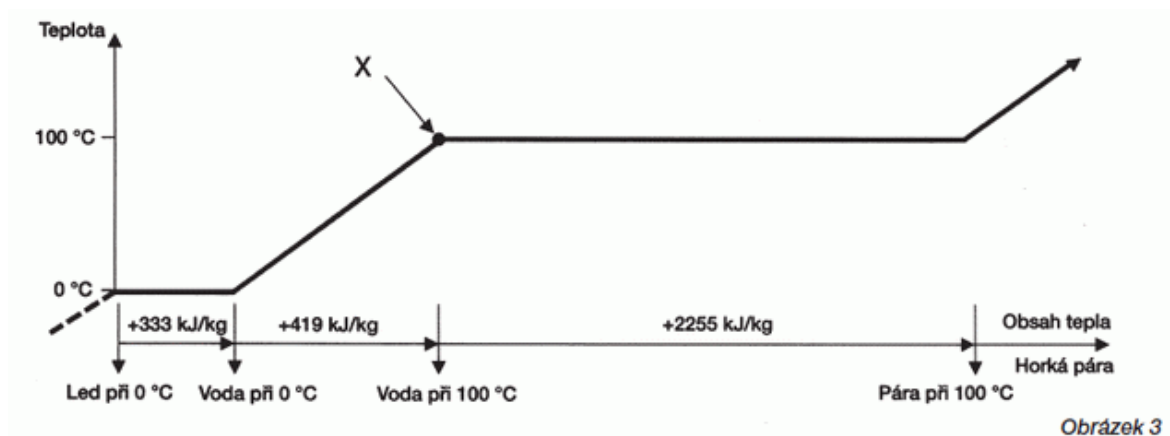
1.4.1 Slitiny s tvarovou pamětí

Populárně využívaným PCM v kategorii Pevné – Pevné skupenství jsou slitiny kovů. Kvůli své veliké tepelné vodivosti jsou i skvělým kandidátem pro aplikace tepelného managementu.

[6; 12; 17] V citaci je příkladem slitina niklu, titánu a mědi jako paměťově tvarová slitina.[17]

2 AKTIVNÍ SLOŽKA

Latentní akumulace tepla je nejefektivnějším způsobem ukládání tepelné energie. Latentní skladování tepla (LHS) spočívá v tom, že skladovací materiál absorbuje nebo uvolňuje teplo při fázové změně pevné látky na pevnou, pevné na kapalnou nebo kapalnou na plynnou nebo naopak. Graficky je znázorněno LHS na příkladu vody na obrázku 3.



Obrázek 3 Grafické znázornění latentního tepla na příkladu vody [18]

Ideální PCM by měl splňovat řadu kritérií souvisejících s požadovanými termofyzikálními, kinetickými a chemickými vlastnostmi:[2; 11]

Termofyzikální vlastnosti:

- Teplota tání v požadovaném pracovním rozsahu
- Vysoké latentní teplo fázového přechodu na jednotku objemu
- Vysoká tepelná vodivost obou fází

Mechanické vlastnosti:

- Malá objemová změna při fázové přeměně
- Nízký tlak par při provozní teplotě
- Vysoká hustota
- Příznivá fázová rovnováha

Kinetické vlastnosti:

- Vysoká rychlost nukleace
- Přiměřená rychlost krystalizace

Chemické vlastnosti:

- Dlouhodobá chemická stabilita
- Žádný korozní vliv na materiály
- Netoxický, nehořlavý a nevýbušný, pro zajištění bezpečnosti

V praxi tato kritéria PCM plně nesplňuje. Avšak nové pokroky ve skladování energie, charakterizace materiálů a nanomateriálů, otevřely další možnosti a přiblížení se k ideálu.

3 PLNIVA

Do kompozitních směsí na bázi fázově měnících se materiálů (PCM) se běžně přidávají různá plniva, jejichž úkolem je specificky upravit strukturu výsledného materiálu nebo zlepšit jeho funkční vlastnosti. Tento přístup umožňuje přizpůsobit PCM kompozitní systém konkrétním požadavkům aplikace, a to jak z hlediska tepelné účinnosti, tak mechanické nebo chemické stability. Vzhledem k široké rozmanitosti PCM (organické, anorganické, polymerní) je volba typu plniva a jeho koncentrace klíčovým návrhovým parametrem při konstrukci kompozitních úložišť tepelné energie. [2; 19-22]

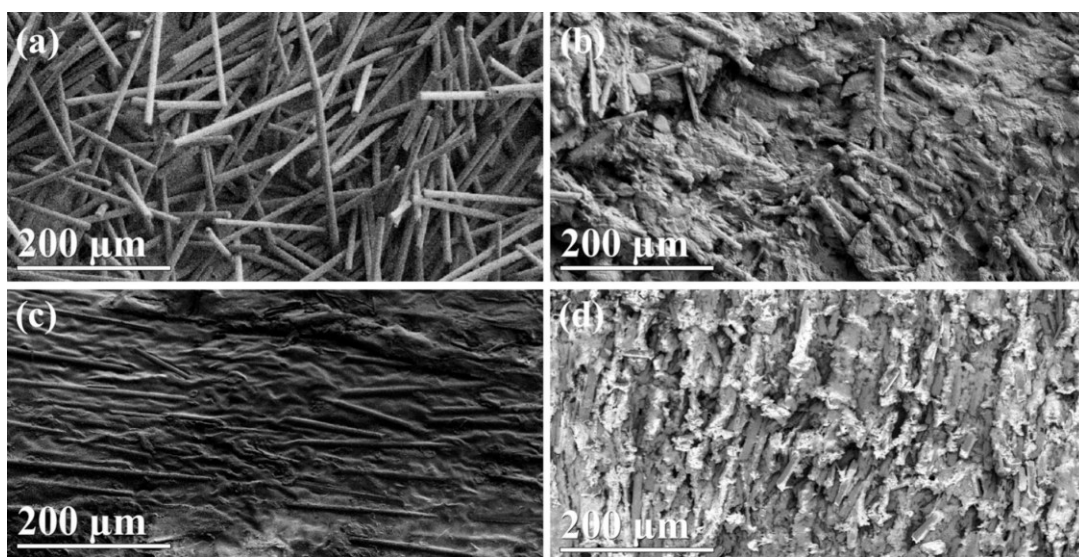
Plniva hrají zásadní roli při optimalizaci vlastností PCM, a to zejména v kontextu jejich nízké tepelné vodivosti, která je typickým omezením přirozené účinnosti těchto materiálů. Kromě zlepšení tepelné vodivosti mohou plniva významně ovlivnit i další klíčové parametry, jako je měrné latentní teplo, teplota tání, mechanická stabilita, odolnost vůči úniku a celková stabilita materiálu při dlouhodobém cyklickém zatěžování (opakované tání a tuhnutí). [21; 22]

Například přidání vysoce vodivých uhlíkových nanostruktur, jako je grafen nebo uhlíkové nanotrubičky, do parafínových PCM výrazně zvyšuje jejich schopnost přenášet teplo. Takto vytvořené vodivé sítě uvnitř kompozitu přispívají ke zrychlení přenosu energie během nabíjení i vybíjení tepelného zásobníku. Nicméně přítomnost plniv není bez rizik. Příliš vysoký objem plniva může negativně ovlivnit jinak výhodné vlastnosti PCM – například snížit jejich latentní teplo akumulace v důsledku snížení podílu samotné akumulární fáze. Rovněž může dojít ke zhoršení disperzního stavu kompozitu, což vede k segregaci nebo nežádoucí změně reologických a transportních vlastností. [21]

Z tohoto důvodu je důležité nejen pečlivě zvolit typ plniva (např. keramické, kovové, uhlíkové nebo polymerní), ale také optimalizovat jeho koncentraci a způsob zapracování do matrice PCM. Efektivní kombinace plniv může poskytnout synergický efekt, při kterém se zvyšuje jak tepelná vodivost, tak celková strukturní integrita kompozitu. Moderní výzkumy ukazují, že správně navržené hybridní systémy, obsahující například grafen s hexagonálním nitridem boru nebo s kovovými částicemi, vykazují výrazně lepší výsledky než jedno-komponentní směsi.[20]

3.1 Keramika a uhlíková plniva

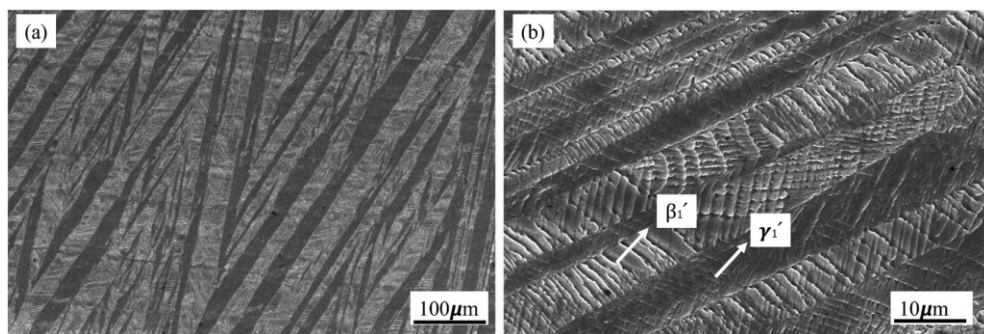
Keramická a uhlíková plniva se často používají ke zlepšení tepelně kondukčních vlastností PCM kompozitů. Mezi keramická plniva patří například hexagonální nitrid boru (h-BN), který díky své vysoké tepelné vodivosti a chemické stabilitě zvyšuje tepelnou vodivost PCM. Na obrázku 4 jsou vyobrazena uhlíková plniva, jako je expandovaný grafit, grafen a uhlíkové nanotrubičky, které vytvářejí tepelně vodivé sítě, které zlepšují přenos tepla v PCM kompozitech.[21; 22]



Obrázek 4 Uhlíková plniva pod mikroskopem [23]

3.2 Kovová plniva

Kovová plniva, jako je nikl, se používají k zvýšení tepelné vodivosti PCM kompozitů. Nikl má vysokou tepelnou vodivost a může být kombinován s dalšími materiály, jako je grafit, pro dosažení synergického efektu. Například kompozitní materiál obsahující nikl a grafit vykazuje vyšší tepelnou vodivost než samotný nikl, viz Obr. 5. [12; 20]



Obrázek 5 Mikroskopická struktura slitiny hliníku, mědi a niklu [12]

3.3 Polymerní plniva

Polymerní plniva, jako je poly(butylén-adipát-tereftalát) (PBAT), se používají k vytvoření flexibilních PCM kompozitů. PBAT může být kombinován s PCM, jako je polyethylenglykol (PEG), pomocí technik tavení, což vede k vytvoření kompozitních materiálů s vylepšenými mechanickými a tepelnými vlastnostmi. [15; 19]

3.4 Hybridní plniva

Hybridní plniva kombinují různé typy materiálů pro dosažení specifických vlastností. Například kombinace grafenu a hexagonálního nitridu boru může vést k vytvoření kompozitů s vysokou tepelnou vodivostí a mechanickou stabilitou. Takové hybridní plniva umožňují optimalizaci PCM kompozitů pro konkrétní aplikace [22]

4 VYUŽITÍ V PRAXI

Materiály s fázovou přeměnou nacházejí široké uplatnění v různých oblastech díky své schopnosti akumulovat a uvolňovat tepelnou energii při změně skupenství. Tato vlastnost je využívána k efektivnímu řízení teploty a úspoře energie v různých aplikacích

4.1 Automobilový průmysl

Současné efektivní systémy pro tepelný management baterií často využívají aktivní chladicí technologie, jako jsou vzduchové, kapalinové nebo termoelektrické systémy, které však vyžadují dodatečný energetický vstup. V posledních letech se proto do popředí dostávají materiály s fázovým přechodem (PCM) jako pasivní chladicí technologie, které fungují bez potřeby externí energie a využívají latentního tepla k udržení teploty baterie v požadovaném rozsahu.

PCM absorbují nadbytečné teplo při změně skupenství z pevné na kapalnou fázi a při následném ochlazení opět uvolňují akumulovanou energii. Tím přispívají ke stabilizaci teploty během špičkového zatížení, například při rychlém dobíjení nebo jízdě ve vysokých teplotách. Tento mechanismus je efektivní, avšak klasické PCM mají nízkou tepelnou vodivost, což omezuje rychlost přenosu tepla. [24]

Další využití se dá představit jako chytrý regulátor teploty při převozu potravin, zdravotnických potřeb nebo technických paliv v přívěsech za kamiony. Tyto velké nákladní vozy převážejí značné množství surovin, které potřebuje při delší logistice kontrolovanou teplotu. PCM se dá využít pro udržitelnost, a tudíž menší spotřebě energie pro tuto regulaci. [25]

4.2 Textilní průmysl

Rostoucí nároky na komfort uživatelů, efektivní hospodaření s energií a potřeba ochrany proti přehřátí přivedly textilní průmysl ke zkoumání pasivních metod tepelného managementu. Mezi nejperspektivnější strategie se řadí radiativní chlazení a latentní akumulace tepla pomocí PCM (materiálů s fázovým přechodem). Tyto technologie dokážou snižovat teplotu bez vnějšího energetického vstupu, čímž zvyšují komfort uživatelů.

Klíčovými výhodami kombinací těchto dvou je snížená teplota v pasivním režimu, redukci přehřátí při tepelném šoku a zamezení přechlazení po odeznění tepelného zatížení.

Využití se tedy najde pro ochranné oděvy, sportovní textilie. Ideálním pro prostředí s výraznými výkyvy teplot a omezením chlazením. [26]

4.3 Chlazení elektroniky

Vzhledem k rostoucí miniaturizaci a výkonnosti moderních elektronických zařízení se stává termální management nedílnou součástí jejich návrhu. Každá nová generace čipů a mobilních zařízení integruje větší výpočetní výkon do menšího prostoru, což způsobuje zvýšené tepelné zatížení. Pro zachování spolehlivosti, stability a bezpečnosti těchto systémů je nezbytné zajistit účinné chlazení, které předejde přehřátí klíčových komponent.

V posledních letech jsou materiály s fázovým přechodem (PCM) zkoumány jako alternativní metoda pasivního chlazení především pro zařízení s přerušovaným provozem, jako jsou osobní počítače, chytré telefony, nositelná elektronika, digitální kamery nebo zdravotnické senzory. PCM se ukazují jako výhodné zejména tam, kde se teplo uvolňuje nárazově, krátkodobě nebo cyklicky.

PCM jsou schopny absorbovat teplo během tání, čímž dochází k dočasnému „vyrovnání“ teploty součástí. Následně, během krystalizace (tuhnutí), se akumulované teplo uvolní zpět do okolního prostředí, čímž se prodlužuje čas, po který komponenty zůstávají pod kritickou teplotou. [25; 27]

4.4 Energeticky úsporné budovy

Spotřeba energie v budovách celosvětově dramaticky vzrostla, zejména kvůli narůstajícím nárokům na vytápění v zimním období a chlazení v létě. Proto se hledají inovativní způsoby, jak zlepšit energetickou účinnost budov bez ztráty komfortu uživatelů.

PCM jsou integrovány do stavebních materiálů, jako jsou sádkartonové desky, omítky nebo izolační panely, za účelem zlepšení tepelné stability budov. Tímto způsobem lze snížit

spotřebu energie na vytápění a chlazení a zvýšit komfort obyvatel. PCM absorbují přebytečné teplo během dne a uvolňují ho v noci, čímž vyrovnávají teplotní výkyvy.[28]

4.5 Letecký a kosmický průmysl

Fázově měnící se materiály (PCM) představují jeden z nejperspektivnějších směrů vývoje v oblasti tepelné ochrany leteckých a kosmických systémů. Jejich schopnost akumulovat a uvolňovat značné množství tepla při fázovém přechodu je důvodem jejich rostoucího využití v prostředí, kde je systém vystaven náhlým a extrémním teplotním změnám, typickým například pro hypersonické lety či vstupy do atmosféry.[29]

Při průletu atmosférou dochází vlivem aerodynamického tření k výraznému ohřevu povrchu letounu. Teplota na návětrné straně trupu může dosáhnout hodnot v rozmezí 1100–1500 °C a na extrémně exponovaných místech, jako je nosový kužel nebo náběžná hrana křídla, může překročit až 1700 °C. V takových podmínkách je nezbytné využívat vysoce odolné a účinné tepelné ochranné systémy, které ochrání nejen konstrukci, ale i palubní elektroniku a posádku.[30]

PCM přinášejí do oblasti tepelné ochrany zcela nový přístup. Při své fázové přeměně – obvykle ze stavu pevného do kapalného – dokážou absorbovat značné množství tepla bez znatelného zvýšení vlastní teploty. Tento jev lze efektivně využít k dočasnému „tlumení“ tepelného náporu. Po překročení kritického teplotního bodu PCM přechází do kapalné fáze, během čehož pohlcuje teplo, které by jinak vedlo k přehřátí vnitřních struktur. Po snížení okolní teploty dochází k opačnému ději – PCM krystalizuje a uvolňuje uloženou energii, čímž pomáhá stabilizovat teplotu systému.

Tato forma pasivní tepelné ochrany má velký význam zejména u lehkých a opakovaně použitelných hypersonických prostředků, kde je klíčová nízká hmotnost, spolehlivost a účinnost. PCM navíc umožňuje konstruovat adaptabilní tepelně-ochranné vrstvy, které reagují na aktuální podmínky bez nutnosti externího chlazení či elektronického řízení.[29; 30]

5 BEZPEČNOSTNÍ A ENVIROMENTÁLNÍ ASPEKTY

Vzhledem k předpokládanému využití PCM materiálů ve stavebnictví bylo důležité zaměřit se také na bezpečnostní a environmentální aspekty. Hodnocena byla zejména hořlavost materiálů, která představuje klíčový faktor pro jejich použití v obytných a komerčních budovách. Současně byla posuzována i možná ekologická zátěž spojená s výrobou, použitím a likvidací těchto materiálů. Cílem bylo zajistit, aby nové materiály splňovaly nejen technické požadavky, ale také standardy bezpečnosti a šetrnosti k životnímu prostředí.

5.1 Recyklovatelnost a druhotné využití PCM materiálů

Při recyklaci je cílem při nejmenších emisích rekombinovat použitý materiál s novým druhotným materiálem pro kompozitní výplň. Při velké cyklické únavě se dá využít PCM jako plnivo do stavebnictví, stejně tak jako přímo mířené PCM pro stavební materiály na tepelně chytré budovy nebo jako retardéry hoření.

Mezi nejvíce využívanou skupinou patří pevně – kapalné PCM. Díky své nízké tepelné roztažnosti při změně skupenství a vysokou praktičností. Nicméně zde hrozí únik kapalné fáze společně s omezenou cyklickou odolností. V tomto případě je potřeba využití enkapsulace PCM pro zamezení jeho úniku a vylepšení těchto vlastností. Následuje volba polymeru pro enkapsulaci a tím se otevírá možnost recyklovatelných zdrojů. Biomasa jako porézní kostra PCM, biopolymery jako kapsle, recyklovatelné polymery s uzavřeným materiálovým cyklem pro udržitelnost tvaru. Tímto můžeme zařídit znovuvyužití pro již PCM po vyčerpání a stále využít alespoň jeho struktury a tepelné vodivosti.[31; 32]

5.2 Ekologická stopa PCM

Přestože PCM pomáhají snižovat energetickou náročnost budov a zařízení, jejich výroba a časté používání může negativně ovlivňovat životní prostředí. Mezi hlavní problémy patří spotřeba neobnovitelných zdrojů, například ropných derivátů (parafíny), které jsou spojeny s nepřímými emisemi, CO₂ a přispívají ke globálnímu oteplování. [33]

5.3 Ekologická alternativa

V této oblasti se tedy přechází na využití materiálů na bázi bio. Znovu využití biobázových PCM (bPCM) jako alternativa pro enviromentální šetrnost. Látky pro biobázové materiály jsou z recyklovatelných, obnovitelných a přírodních zdrojů, jedná se o sojový olej, palmový olej, kokosový olej, živočišné tuky, odpadní kuchyňské oleje, nepotravinářské části plodin, pilinový prach (termoizolační médium) a skořápky palmových jader (aktivní uhlí).

Výhodou těchto recyklovatelných zdrojů je jejich nižší emisní stopa, snížení závislosti na fosilních palivech, podpora cirkulární ekonomiky a lokálního využití biomasy.

Výzvy tohoto odvětví jsou pro nás prozatím neřešitelné a s brilancí svých parametrů se těmito výzvami hodně zkracuje seznam jejich nynějších využití. Jedná-li se o biomasu, tak je počítáno s biodegradabilitou, která při technologických využití není žádoucí. Podobně tak i s únikem kapalné fáze bPCM, tudíž při vyšších teplotách se může kapalně-pevné PCM roztéct. Tyto problémy se zatím řeší mikrokapsulací s přidavkem stabilizačních polymerů nebo využití kompozitních matric pro udržení biodegradace a tvaru.[33]

6 METODY MĚŘENÍ

Pro charakterizaci PCM materiálů je nezbytné stanovit jejich tepelné a mechanické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že materiály připravované v rámci tohoto výzkumu mají potenciální uplatnění ve stavebnictví, byla součástí charakterizace také analýza hořlavosti. Stanovení těchto vlastností je klíčové pro posouzení vhodnosti materiálů pro praktické aplikace a pro zajištění jejich bezpečnosti v reálných podmínkách.

6.1 Diferenční skenovací kalorimetrie

Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) je termická analytická technika používaná pro detailní charakterizaci materiálů z hlediska jejich tepelných vlastností, především měření entalpie, teplot tání, krystalizace a skelného přechodu. Tato metoda je klíčová v oblasti polymerních materiálů, PCM, kovových slitin i anorganických solí, kde slouží k posouzení tepelných změn při lineárním ohřevu nebo ochlazování.[34; 35]

6.1.1 Princip měření

Princip DSC spočívá v porovnávání tepelného toku mezi dvěma oddělenými vzorky – studovaným a referenčním, které jsou zahřívány za identických podmínek. Aby bylo dosaženo rovnovážného teplotního stavu, je při endotermních dějích dodáváno více energie do zkoumaného vzorku, zatímco při exotermních dějích je více energie směřováno do referenční látky. Výsledkem je křivka tepelného toku jako funkce teploty nebo času, která poskytuje informaci o tepelných událostech probíhajících ve vzorku.

Základní stavovou funkcí měřenou při DSC je **tepelná kapacita** c_p , tj. množství tepla Q , které systém absorbuje při změně teploty o 1 K. Na základě experimentální závislosti

$c_p = (m\Delta t)/Q$ lze následně vypočítat **entalpii** (H), **entropii** (S) a **Gibbsovu volnou energii** (G), a to pro libovolnou teplotu v rámci měřeného rozsahu. DSC tak umožňuje nejen detekci fázových přechodů, ale i kvantifikaci jejich tepelných efektů. [34]

6.1.2 Typy DSC přístrojů

Existují dvě základní konstrukční varianty DSC zařízení:

DSC s kompenzací příkonu („obrácená DTA“): Využívá dvě samostatné kalorimetrické cely – jednu pro vzorek a druhou pro referenci. Každá celda je vybavena vlastním topným

tělískem a teplotním čidlem. Systém aktivně kompenzuje rozdíly v příkonu, které vznikají mezi vzorkem a referencí, aby byla zachována stejná teplota. Teplotní rozdíly jsou automaticky zaznamenávány a vyhodnocovány.

DSC s tepelným tokem: Používá jednotnou kalorimetrickou cely pro oba vzorky, přičemž výsledky jsou založeny na teplotních rozdílech, které vyvolávají změny tepelného toku skrz pasivní blok. Tento typ zařízení se skládá z pece, držáků pro vzorky, termostatické jednotky, plynového zdroje, elektroniky pro záznam a regulace teploty. Jedná se o nejčastěji používaný typ v laboratorní praxi díky robustnímu a jednoduchému uspořádání. [35]

6.1.3 Měřené veličiny

Výstupem měření je **DSC křivka**, která ukazuje tok tepla vůči teplotě. Typické tepelné přechody zaznamenané pomocí DSC zahrnují:

Teplotu tání (endotermní pík),

Teplotu krystalizace (exotermní pík),

Skelný přechod (změna sklonu křivky bez píku),

Rekrystalizace, rozklad, dehydratace,

Přechody mezi pevnými fázemi. [35]

6.1.4 Faktory ovlivňující měření

Přesnost a reprodukovatelnost výsledků DSC závisí na celé řadě faktorů, které lze rozdělit do tří kategorií:

Parametry přístroje: konstrukce kalorimetru, typ termočlánku, způsob ohřevu, citlivost měřicí elektroniky, stabilita regulace teploty.

Parametry metodiky: rychlost ohřevu (běžně 0,5–80 °C/min), typ nosné atmosféry (dusík, argon, vzduch), příprava vzorku (homogenita), velikost vzorku (typicky 1–100 mg).

Parametry materiálu: hustota, tepelná kapacita, tepelná vodivost, chemická stabilita, přítomnost aditiv či plniv. [35]

6.2 Tahové zkoušky

Tahová zkouška patří mezi nejstarší a nejrozšířenější metody hodnocení mechanických vlastností materiálů. Jde o statickou destruktivní zkoušku, při níž je zkušební těleso

vystaveno jednoosému zatížení tahem, a to podél jeho podélné osy, dokud nedojde k přetržení, nebo do okamžiku, kdy jsou dosaženy zvolené limitní parametry. Tato metoda je zásadní pro charakterizaci pružnosti, pevnosti, plasticity, tažnosti a houževnatosti široké škály technických materiálů včetně polymerů, kovů, keramik a kompozitů. [35]

6.2.1 Princip měření

Vzorek je upnut do čelistí tahového stroje a zatěžován rovnoměrně narůstající silou. Zkouška probíhá za kontrolovaných podmínek (rychlost deformace, teplota, relativní vlhkost) podle příslušných norem – zejména ČSN EN ISO 527-1 až 3 pro polymery, případně ASTM nebo DIN standardů pro jiné materiály. Měření trvá do přetržení vzorku nebo do dosažení požadované deformace. [35]

Tahové zařízení průběžně zaznamenává působící sílu F a odpovídající prodloužení vzorku, čímž vzniká charakteristická závislost napětí–deformace, z níž lze vyhodnotit následující mechanické parametry:

1. Napětí σ :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Kde F (N) je tahová síla a A (m²) je původní průřez plochy vzorku.

Jednotka: Pascal (Pa)

2. Poměrné prodloužení ε_l :

$$\varepsilon_l = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (2)$$

Kde l_0 (m) je původní délka a l (m) je délka po deformaci.

3. Tažnost $\varepsilon_{\%}$:

$$\varepsilon_{\%} = \varepsilon_l * 100\% \quad (3)$$

Vyjadřuje procentuální prodloužení vzorku při přetržení.

4. Poměrné zkrácení ε_h :

$$\varepsilon_h = \frac{h-h_0}{h_0} \quad (4)$$

Kde **h** (m) je průměr vzorku před deformací a **h₀** (m) je průměr po deformaci.

5. **Poissonův poměr ν :**

$$\nu = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_l} \quad (5)$$

Udává poměr příčného zúžení k podélnému prodloužení.

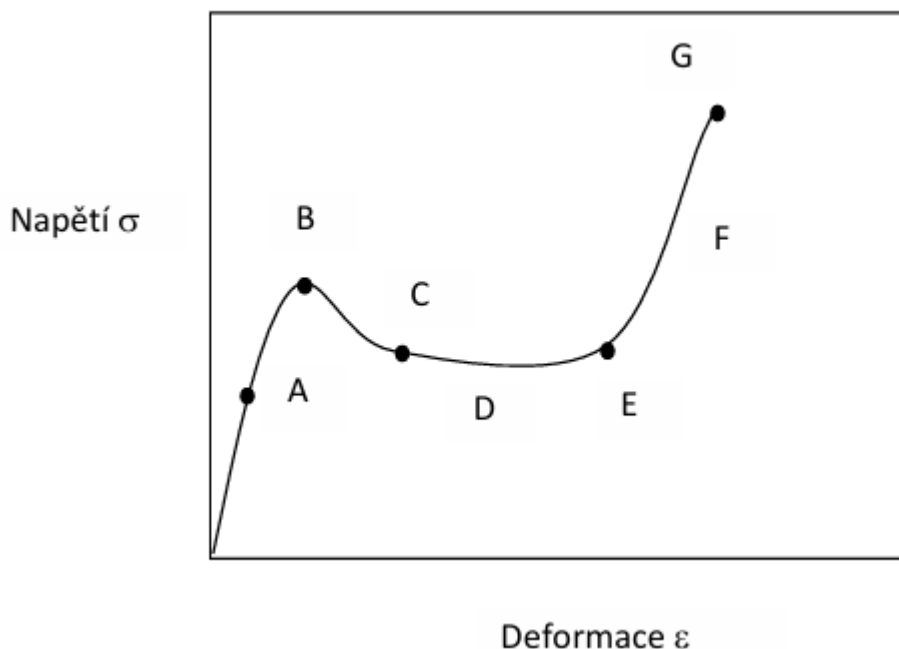
6. **Youngův modul pružnosti (E):**

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Charakterizuje tuhost materiálu v elastické oblasti.

6.2.2 Vývojová tahová křivka

Grafické znázornění průběhu tahové zkoušky – tzv. **pracovní (vývojový) diagram** – je klíčovým nástrojem pro analýzu chování materiálu, viz. Obr. 6.



Obrázek 6 Diagram tahové křivky [35]

A – Mez úměrnosti: Lineární část křivky, deformace je přímo úměrná napětí. Do této oblasti platí Hookův zákon.

B – Horní mez kluzu: Materiál začíná plasticky téct, výrazné snížení tuhosti.

C – Dolní mez kluzu: Minimální hodnota napětí v oblasti plastické deformace.

D – Přirozený dlouhící poměr: Místo, kde se zpevněný materiál začíná lokalizovaně prodlužovat.

E – Vyčerpání plasticity: Materiál postupně ztrácí schopnost plastické deformace.

F – Oblast zpevňování: Dochází ke zvýšení napětí při rostoucí deformaci díky orientaci nebo krystalizaci materiálu.

G – Přetržení: Bod, kdy dojde ke ztrátě soudržnosti a materiál se přetrhne.

6.3 Zkouška hořlavosti

Zkouška hořlavosti podle normy **ISO 5660-1** se řadí mezi kvantitativní metody hodnocení požárního chování materiálů. Tato metoda využívá konický kalorimetr (Cone Calorimeter) k měření rychlosti uvolňování tepla (HRR), produkce kouře, hromadění zplodin a dalších klíčových parametrů při řízeném tepelném namáhání vzorku. Je vhodná pro hodnocení polymerních materiálů, kompozitů, povrchových úprav, izolací a dalších technických látek, a to jak samostatně, tak i jako součást širší požární analýzy

6.3.1 Princip metody

Vzorek o definovaných rozměrech (typicky 100×100 mm, tloušťka do 50 mm) je upevněn ve vodorovné poloze pod kuželovým zářičem, který vyzařuje tepelný tok. Během testu může být vzorek vystaven zapálení plamenem, a to po dosažení předem stanoveného času nebo teploty.

Měření probíhá ve spalovací komoře napojené na systém pro sběr a analýzu plynů. Pomocí principu spotřeby kyslíku se stanovuje uvolněné množství tepla.

6.3.2 Vystupující výsledky

Hlavními výstupy měření jsou:

HRR (Heat Release Rate) – rychlost uvolňování tepla v kW, rozhodující parametr pro intenzitu požáru.

THR (Total Heat Released) – celkové množství uvolněného tepla během celého testu.

TSR (Total Smoke Released) – objemové množství vzniklého kouře.

Mass loss rate – rychlost úbytku hmotnosti vzorku.

CO a CO₂ produkce – kvantifikace uvolněných toxických plynů.

Time to ignition (TTI) – čas do zapálení materiálu při daném tepelném toku.

Data se zaznamenávají v reálném čase a poskytují detailní průběh spalovacího chování materiálu.

6.4 DMA

Dynamická mechanická analýza (DMA) je termická analytická technika využívající ke studiu viskoelastických vlastností materiálů, zejména polymerů, kompozitů a elastomerů. Umožňuje detailní charakterizaci mechanického chování v závislosti na teplotě, frekvenci a čase. Tato metoda hraje klíčovou roli při hodnocení zpracovatelnosti, stárnutí, přechodových jevů a dalších vlastností, které souvisí s provozní životností materiálů.

6.4.1 Princip metody

Princip DMA spočívá v měření odezvy materiálu na periodické oscilační zatížení. Vzorek je podroben malým harmonickým deformacím, přičemž je sledována fázová diference mezi aplikovaným zatížením a vzniklou deformací. Na základě tohoto měření lze rozložit mechanickou odezvu do dvou složek:

Elastická složka (E') – vyjadřuje schopnost materiálu uchovávat energii, odpovídá pružnému (reverzibilnímu) chování,

Viskózní složka (E'') – vyjadřuje schopnost materiálu energii disipovat, souvisí s vnitřním třením a ztrátami.

6.4.2 Typy DMA

Základní konfigurace DMA přístrojů je založena na principu mechanické oscilace vzorku v různých režimech deformace. Existuje několik variant dle typu namáhání:

Režim ohybu (tříbodový, dvojbodový),

Režim tahu nebo tlaku,

Režim smyku.

Zařízení je tvořeno mechanickým systémem s torzními pružinami nebo elektromagnetickými pohony, měřicím systémem pro registraci deformace a sil, a temperační jednotkou. Měření je prováděno v řízené atmosféře a teplotním rozsahu typicky od -150 °C do 500 °C , což umožňuje sledovat chování materiálu ve velmi širokém spektru podmínek. [35]

6.4.3 Měřené veličiny

Výstupem měření je záznam viskoelastických parametrů jako funkce teploty, času nebo frekvence. Z těchto dat lze získat:

- Teplotu skelného přechodu (T_g) – nárůst E'' a $\tan \delta$,
- Bod měknutí a tání,
- Krystalizační nebo zesíťovací přechody,
- Mechanické ztráty,
- Creep a relaxaci napětí,
- Stárnutí a degradační procesy,
- Sekundární relaxace (β , γ přechody).

6.5 Úbytek hmotnosti

Zkouška úbytku hmotnosti je jednoduchá metoda pro stanovení **úbytek hmotnosti vosku v materiálu**. Vosk má nízkou teplotu tání a má tendenci unikat, touto metodou je zjištěno kolik vosku se uvolňuje při vyšší teplotě v čase.

II PRAKTICKÁ ČÁST

7 EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP

7.1 Materiály

Pro tvorbu PCM směsí byl hlavním prvkem vosk RT 28HC (Rubitherm® Technologies GmbH, Německo). Stejný účel měl RT 35HC (Rubitherm® Technologies GmbH, Německo) s odlišnou teplotou tání. Druhým prvkem bylo LDPE FE3000 (Muntajat, Qatar). Aktivním plnivem byl expandovaný grafit (100 μm) ES 100 C10 (Qingdao Kropfmuehl, Čína) (EG)

7.2 Příprava PCM směsí

Příprava se skládala ze dvou kroků. Smíchání směsí v přístroji Brabender, který směs homogenizoval. Dále lisování destiček za tepla. Směsi se rozdělili do několika odlišných vzorků s obsahem 40, 50, 60 hmot. % vosku a 0,2; 0,1; 0,05 hmot. % EG. Pro srovnávací účely se provedli vzorky bez/s EG a i bez/s vosku.

7.3 Míchání

Technologická operace probíhala na přístroji Brabender s objemem komory 50 cm^3 , při teplotě 120 °C. Při 50 ot/min se tavilo 2 minuty navážené množství LDPE. Po uplynulé době bylo vloženo navážené množství vosku s případným naváženým množstvím grafitu. Zvýšila se rychlost otáček na 112 za minutu. Po 5 minutách se přístroj zastavil a vzorek se vyškrábal z komory.

7.4 Lisování za tepla

Po ztuhnutí vzorku při míchání se PCM směs vložila do lisovací formy pro ruční lis. Operace probíhala při 140 °C a lisovalo se 5 minut pod topnými deskami. Poté byla forma schlazena na dalším ručním lisu, pod chladicími deskami vytemperované pomocí vody na 12 °C po dobu 5 minut.

8 CHARAKTERIZACE

V této kapitole se charakterizovali vzorky podle odlišných metod. Popis metod určuje metodu a parametry měření, při kterých se daná zkouška prováděla.

8.1 DSC

Dle metody DSC se u vzorků měřila tepelná entalpie tání a krystalizace společně s teplotou tání a krystalizace a jejich časový interval ve fázové přeměně. Využit byl program ohřevu a následném chlazení v rozmezí teplot $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ při rychlosti $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ za minutu a dusíkové atmosféře $N = 20\text{ ml/min}$. Měření bylo provedeno na přístroji DSC Star Systém (Mettler Toledo).

8.2 Mechanické zkoušky

Dle metody mechanických zkoušek se zjišťovaly u vzorků tyto parametry: Youngův modul, pevnost v tahu a protažení. Pro tuto zkoušku byli využity vysekávací nože dle normy ČSN EN ISO 527-2 Typ 5A, viz Obr. 7. Vysekané vzorky byli zkoušeny na Trhacím zkušebním stroji (M350-5CT). Parametry zkoušek byli při maximální síle 500 kN.



Obrázek 7 Vyseknuté vzorky

8.3 Stabilita směsi

Stabilitní zkouška byla prováděna na přístroji (Accelerated Weathering Tester, Mode QUV/spray; QLab). Celková zkouška se prováděla 77 dní, což je ekvivalent stárnutí po dobu 1 roku, při povětrnostních podmínkách v Dubaji. Simulace globálního záření bylo 2100 kWh/m² při těchto denních cyklech. Typ lampy byl UVA-340, pro simulaci globálního slunečního záření. Při vlnových délkách 300 nm do 340 nm. Cykly:

1. Den, 14 hodin, 60 °C, intenzita záření 0,83 W/m²
2. Noc, 10 hodin, 30 °C.
3. Opakující se oba cykly dokola.

8.4 DMA

Dle metody DMA se měřily jednostranným vetknutím moduly ztrátové a elastický.. Rozsah teplot činil od -60–50 °C a rozsah konkrétních frekvencí byl 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz. Zkouška byla prováděna vysekaných vzorcích o tloušťce 1 mm a podle vysekávacího nože ISO 37 typ 3. Metoda se měřila na přístroji DMA 1 Star Systém (Mettler Toledo)

8.5 Hořlavost

Hořlavost byla zkoušena v programu Fire Testing Technology ConeCalc v6.5a software podle normy ISO 5660-1. Počáteční podmínky pro testování byli, teplota 20 °C a tlak 97.55 kPa při 55 % vlhkosti a tepelným tokem 25 kW/m².

8.6 Úbytek hmotnosti materiálu

Zkouška úbytku hmotnosti byla prováděna pro zjištění uvolňujících látek z kompozitu. Sušení bylo prováděno v peci za konstantní teploty 60 °C po dobu 2 týdnů.

9 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole jsou vyhodnoceny měření různých metod. V první řadě byly připraveny vzorky s různým hmotnostním zastoupení složek vosku a EG (viz. Tab. 1) pro zjištění jejich vlivu na vlastnosti připravených kompozitů.

Tabulka 1 Kompletace vzorků

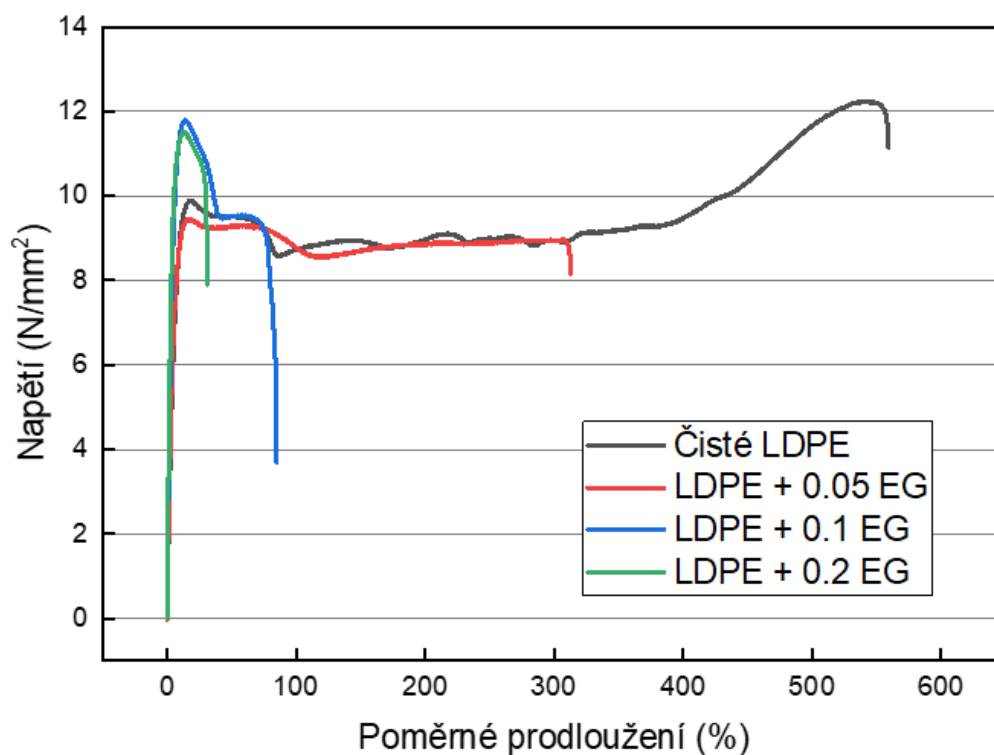
Vzorek	LDPE Qatar [hmot. %]	Vosk (R28) [hmot. %]	Vosk (R35) [hmot. %]	EG (100 μ m) [hmot. %]
LDPE	100			0
0.05 EG + LDPE	95			5
0.1 EG + LDPE	90			10
0.2 EG + LDPE	80			20
LDPE + Vosk R28 50/50	50	50		0
LDPE + Vosk R28 40/60	40	60		0
LDPE + Vosk R28 + EG 45/50/5	45	50		5
LDPE + Vosk R28 + EG 40/50/10	40	50		10
LDPE + Vosk R28 + EG 30/50/20	30	50		20
LDPE + Vosk R35 50/50	50		50	0
LDPE + Vosk R35 40/60	40		60	0
LDPE + Vosk R35 60/40	60		40	0
LDPE + Vosk R35 + EG 45/50/5	45		50	5
LDPE + Vosk R35 + EG 55/40/5	55		40	5
LDPE + Vosk R35 + EG 50/40/10	50		40	10

9.1 Mechanické zkoušky

Zkoušky tahu definují tažnost a pevnost materiálu. Tímto můžeme definovat jejich použitelnost v různých specifických aplikacích. Polovina zkušebních tělísek byla vyseknutá vysekávacím nožem a ty se pak 7 dní temperovali při teplotě 70 °C. Poté se měřili a hodnotili a byl sledován vliv této kondicionace.

Vzorky bez vosku

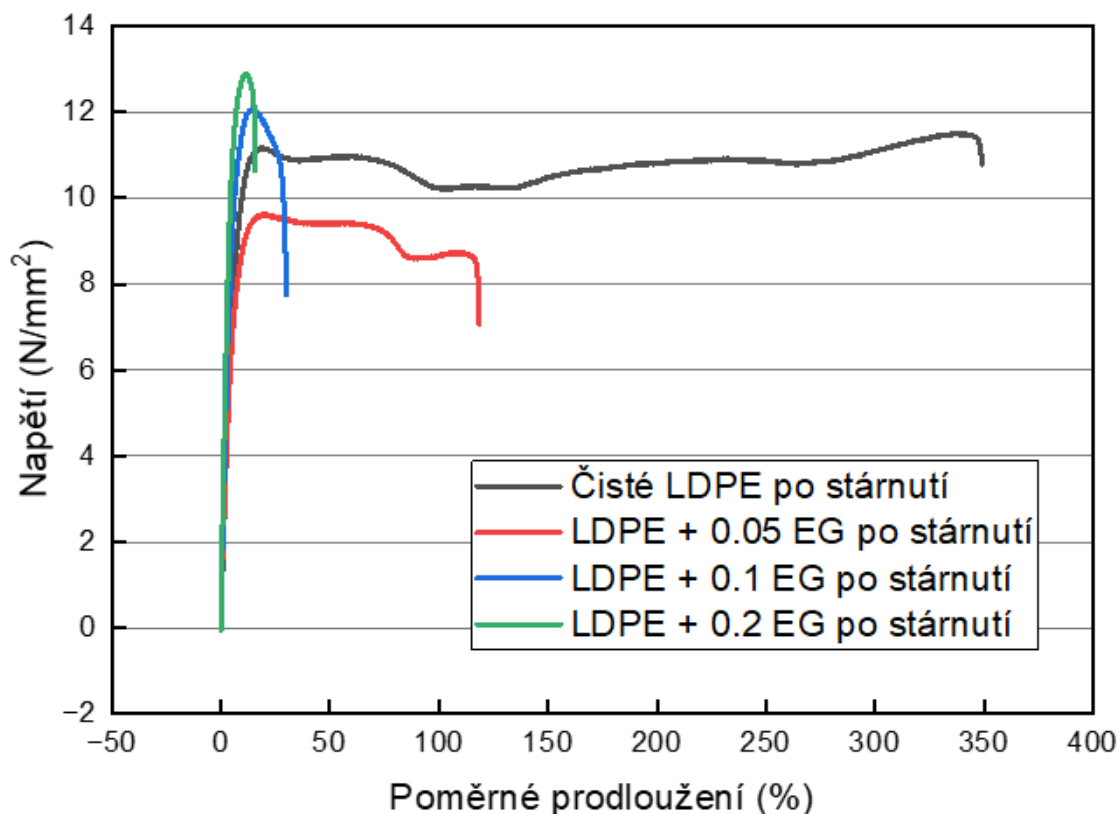
S přidavkem EG do čistého LDPE se testovalo, jaký vliv má EG na mechanické vlastnosti. S větším množstvím EG, rostlo kompozitu tahové napětí, přičemž jeho poměrné prodloužení (Obrázek 8) se zmenšovala. Z obrázku 8 je zřejmé, že kompozity se staly přidavkem EG křehčí.



Obrázek 8 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky LDPE plněné expandovaným grafitem

Na obrázku 9 jsou znázorněny tahové vlastnosti materiálů, které byly vystaveny urychlenému stárnutí. Složení materiálů na obrázku 8 a 9 je identické. Vzorky podrobené

stárnutí vykazovaly podobné vlastnosti jako vzorky původní. Srovnání Youngova Modulu, napětí při přetržení a prodloužení při přetržení je uvedeno v Tabulce 2.



Obrázek 9 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky LDPE plněné expandovaným grafitem, stárnuté

Tabulka 2 Vyhodnocené hodnoty pro vzorky bez vosku

Parametry pro LDPE vzorky	Youngův Modul (N/mm ²) Před/Po		Napětí při přetržení (N/mm ²) Před/Po		Prodloužení při přetržení (%) Před/Po	
Čisté LDPE	191±31	200±58	12.1±1.6	9.1±3.3	585±66	299±176
0.05 EG + LDPE	213±35	222±35	6.8±1.6	6.9±2.5	203±118	123±116
0.1 EG + LDPE	313±31	301±33	5.8±2.1	7.1±1.1	101±26	37±16
0.2 EG + LDPE	413±22	387±51	6.5±2.4	10.1±1.3	28±14	15±5

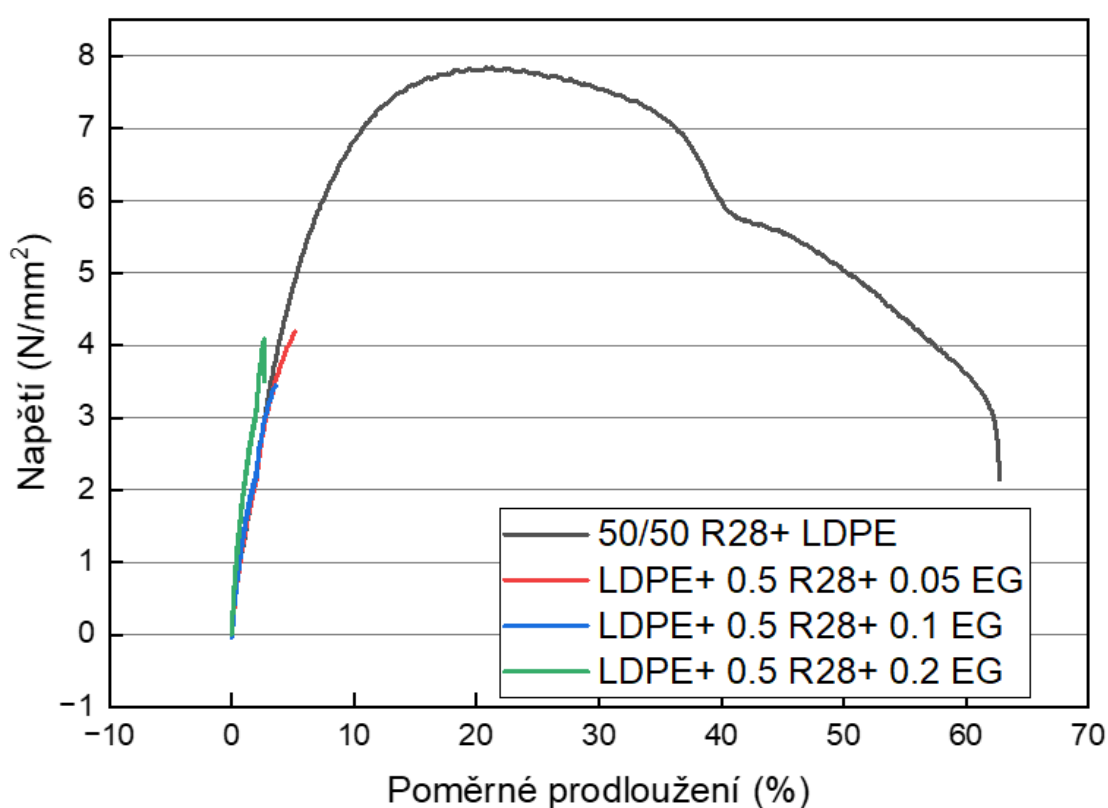
V tabulce 2 jsou maximální hodnoty napětí při přetržení společně s hodnotami modulu pružnosti a také prodloužení při přetržení. Youngův modul s rostoucím plněním roste. Hodnoty nejsou ovlivněny stárnutím. Napětí při přetržení s přidavkem EG klesá, stárnutí

tento parametr též významně nezměnilo. Významný rozdíl je patrný u poměrného prodloužení při přetržení. Srovnáním čistého LDPE s kompozity LDPE a EG je vidět, že s rostoucí koncentrací plniva klesá tažnost, v tabulce je uvedena hodnota prodloužení při přetržení, která v případě čistého LDPE dosahuje hodnoty 580 %, zatímco pouhé 2 hm % způsobily pokles na 28 %. Stárnutím vzorků tento parametr ještě více snížil, čisté LDPE vykazalo prodloužení při přetržení 300 %, ale přídavek 2 hm.% EG způsobil pokles na 5 %.

Vzorky R28

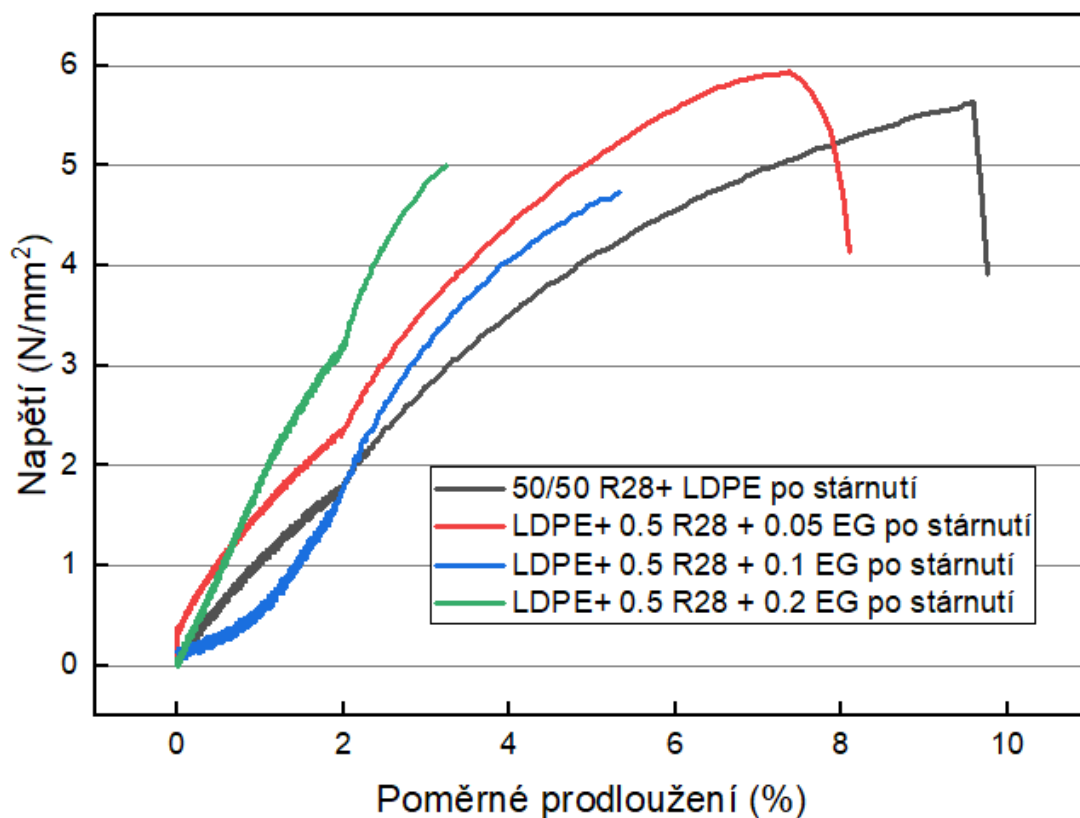
Kompozity LDPE s expandovaným grafitem byly dále obohaceny voskem. V této kapitole jsou popsány tahové vlastnosti systémů obsahujících 50 hm. % vosku R28. Samotný vosk je ve své krystalické fázi křehký. Na Obrázku 10 jsou zobrazeny výsledky tahových zkoušek. Přídavkem 50 hm % se rapidně zhoršili tahové vlastnosti všech materiálů.

V porovnání s čistým LDPE došlo k výrazné ztrátě prodloužení i napětí, jak je shrnuto v Tabulce 3.



Obrázek 10 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R28

Stejně materiály byly podrobeny urychlenému stárnutí. Na obrázku 11 jsou zobrazeny výsledky takových zkoušek těchto vzorků. V tabulce 3 jsou porovnány hodnoty Youngova modulu, napětí při přetržení a poměrné prodloužení při přetržení.



Obrázek 11 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R28, stárnuté

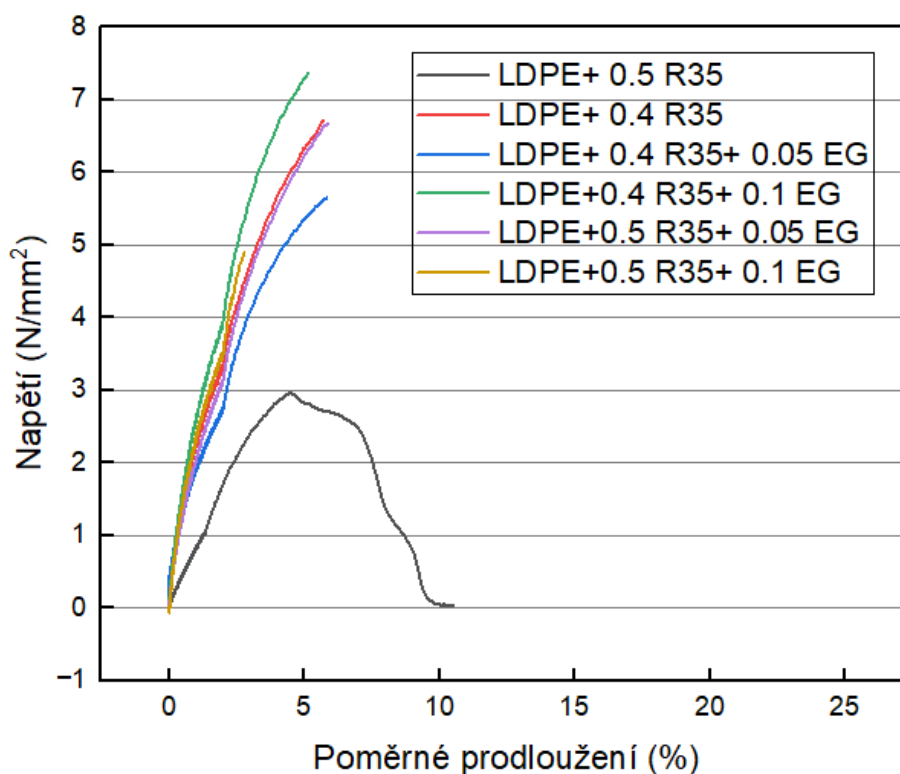
Vzorky podrobené stárnutí vykazují menší Youngův modul. Nicméně hodnoty napětí a prodloužení při přetržení jsou srovnatelné. Vliv stárnutí neměl na tyto parametry významný vliv.

Tabulka 3 Vyhodnocené hodnoty pro vzorky s voskem R28

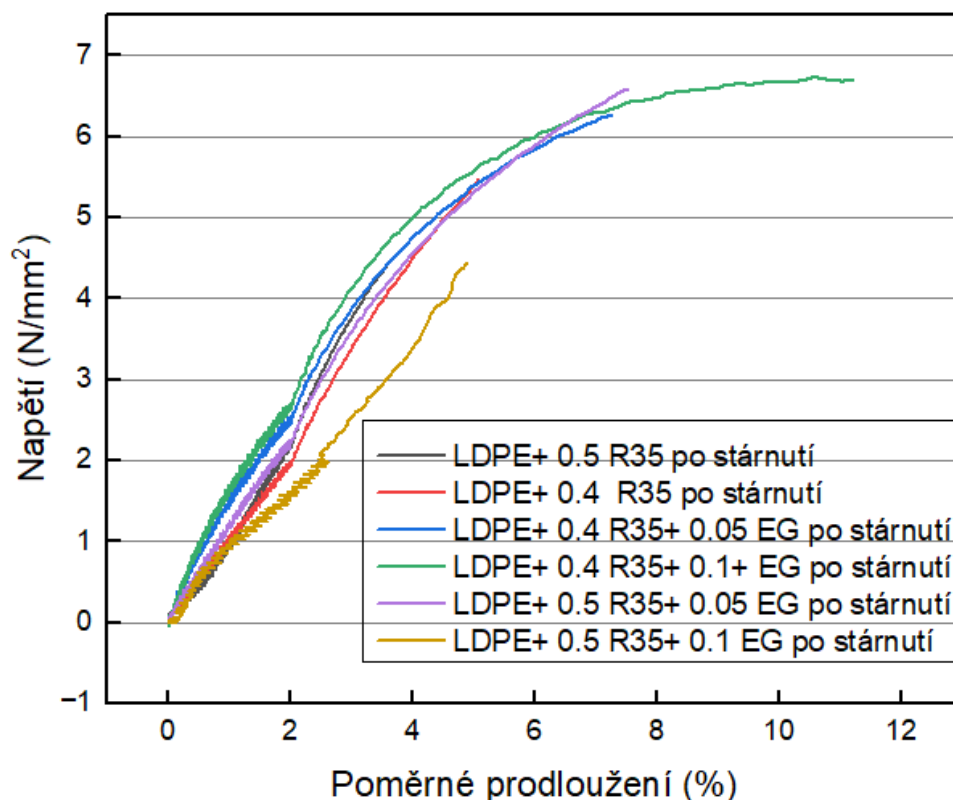
Parametry pro vzorky R28	Youngův Modul (N/mm ²)		Napětí při přetržení (N/mm ²)		Prodloužení při přetržení (%)	
	Před/Po	Před/Po	Před/Po	Před/Po	Před/Po	Před/Po
Čisté LDPE	191±31	200±58	12.1±1.6	9.1±3.3	585±66	299±176
50/50 Vosk + LDPE	125±14	92±34	3.4±2.8	3.9±0.7	6.2±4.1	9.1±1.8
0.5 Vosk +0.05 EG +LDPE	156±45	117±31	3.7±1.6	4.2±1.5	5.0±2.4	6.2±1.9
0.5 Vosk +0.1 EG +LDPE	181±67	120±50	3.7±1.1	4.4±1.5	3.6±1.1	4.8±1.8
0.5 Vosk +0.2 EG +LDPE	241±102	165±60	3.3±1.6	4.1±1.5	2.9±0.9	3.1±1.0

Vzorky R35

Z pohledu potenciálních aplikací bylo provedeno hodnocení vzorků s obsahem vosku R35, který se od vosku R28 liší teplotou tání, která je součástí názvu tohoto vzorku. Výsledky tahových zkoušek jsou na Obrázku 12. Kromě kompozitů plněných 50 hm. % vosku byla připravena série s 40 hm % vosku.



Obrázek 12 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R35,



Obrázek 13 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R35, stárnuté

V tabulce 4 se vzorky s přidavkem vosku R35 se kompozitní změny mechanických vlastností před a po temperaci moc nelišili, jelikož jejich prodloužení při přetržení nepřesáhlo 12 % a změny tahového napětí byly v rámci statistické chyby.

Tabulka 4 Vyhodnocení pro vzorky s voskem R35

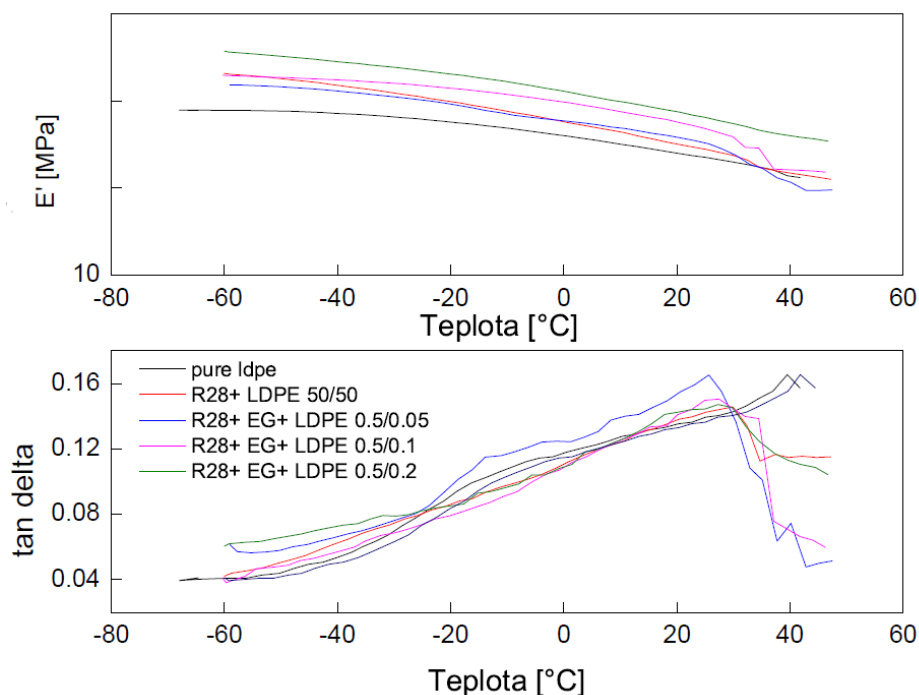
Parametry pro vzorky R35	Youngův Modul (N/mm ²)		Napětí při přetržení (N/mm ²)		Prodloužení při přetržení (%)	
	Před/Po	Před/Po	Před/Po	Před/Po	Před/Po	Před/Po
Čisté LDPE	191±31	200±58	12.1±1.6	9.1±3.3	585±66	299±176
50/50 Vosk + LDPE	296±71	166±40	5.3±0.9	4.4±0.9	4.5±3.3	3.8±0.7
40/60 Vosk + LDPE	252±55	141±42	6.4±0.9	5.1±0.9	6.9±1.7	4.7±1.0
0.5 Vosk + 0.05 EG + LDPE	251±52	138±44	5.4±1.2	5.0±2.0	4.4±1.6	7.4±3.6
0.5 Vosk + 0.1 EG + LDPE	353±46	162±123	4.6±0.8	4.3±1.5	2.5±0.5	3.3±0.8
0.4 Vosk + 0.05 EG + LDPE	235±82	207±63	6.2±1.0	6.1±1.1	6.2±1.7	7.0±3.1
0.4 Vosk + 0.1 EG + LDPE	361±78	222±47	7.0±1.0	6.6±1.2	5.2±1.3	6.4±2.2

9.2 Dynamická mechanická analýza

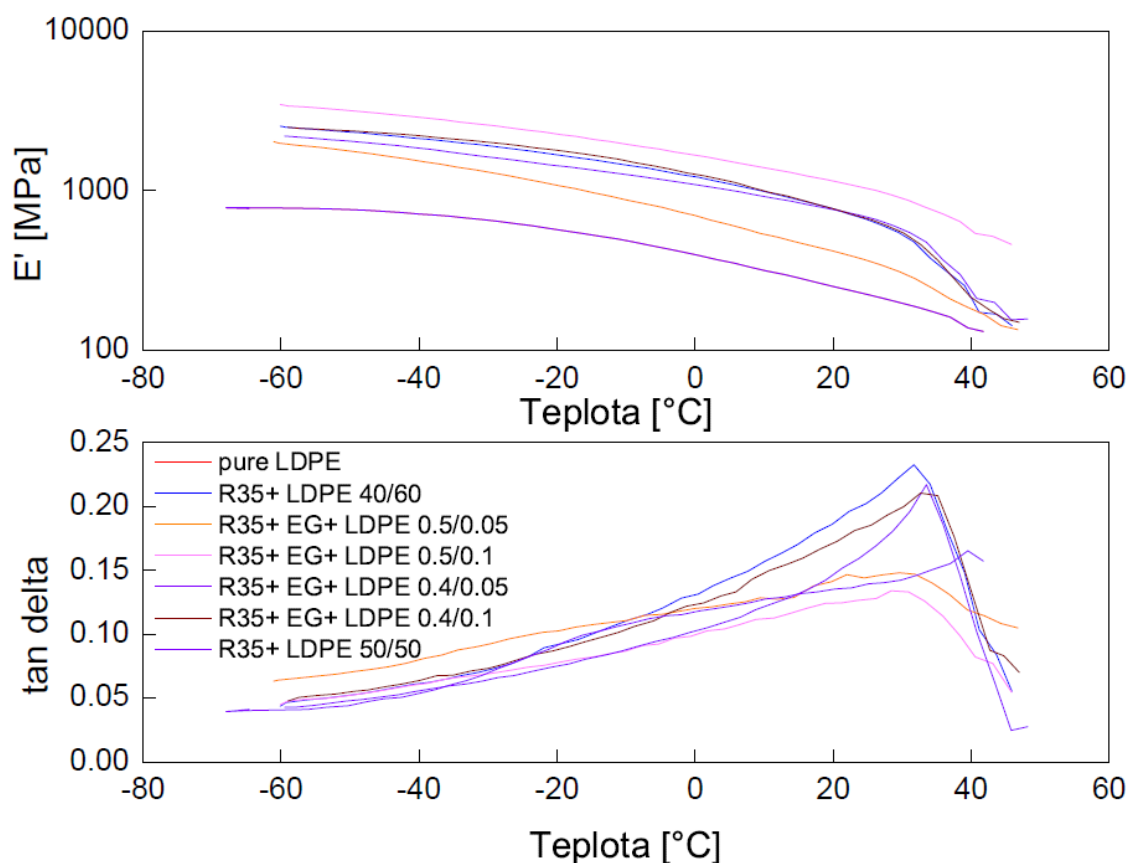
Dynamická mechanická analýza (DMA) je citlivá metoda používaná ke sledování viskoelastického chování materiálů v závislosti na teplotě, čase nebo frekvenci zatěžování. V rámci této práce byla metoda DMA využita ke zjištění mechanické odezvy vzorků v závislosti na teplotě a ke zjištění teploty fázové přeměny. Fázová přeměna je patrná z teplotní závislosti tan delta jako pík, v závislosti soufázového modulu na teplotě je patrná jako oblast inflexního bodu.

Z měření na Obrázcích 14 a 15 jde vidět fázová přeměna ukazující oblast tání vosku a jeho vliv na mechanické vlastnosti připravených kompozitů. Pro vzorky s voskem R28 se projevila fázová přeměna už při 25 °C, zatímco u R35 se fázová přeměna projevuje při 35 °C, viz Obr. 14 a 15.

U vzorků s voskem R28 se mechanické vlastnosti kompozitu mění rapidně po fázové přeměně. Při přidavku 50 hm. % kompozity významně mění mechanické vlastnosti. Tento je může souviset s únikem vosku během měření. Vzorek R28+ EG+ LDPE 0.5/0.05 se soufázový modul při fázové přeměně moc nemění a jeho mechanické vlastnosti jsou y měřených vzorků nejstabilnější viz Obr. 14. Proto byl dále tedy zkoumán v rozdílných frekvenčních měření Obr. 16.

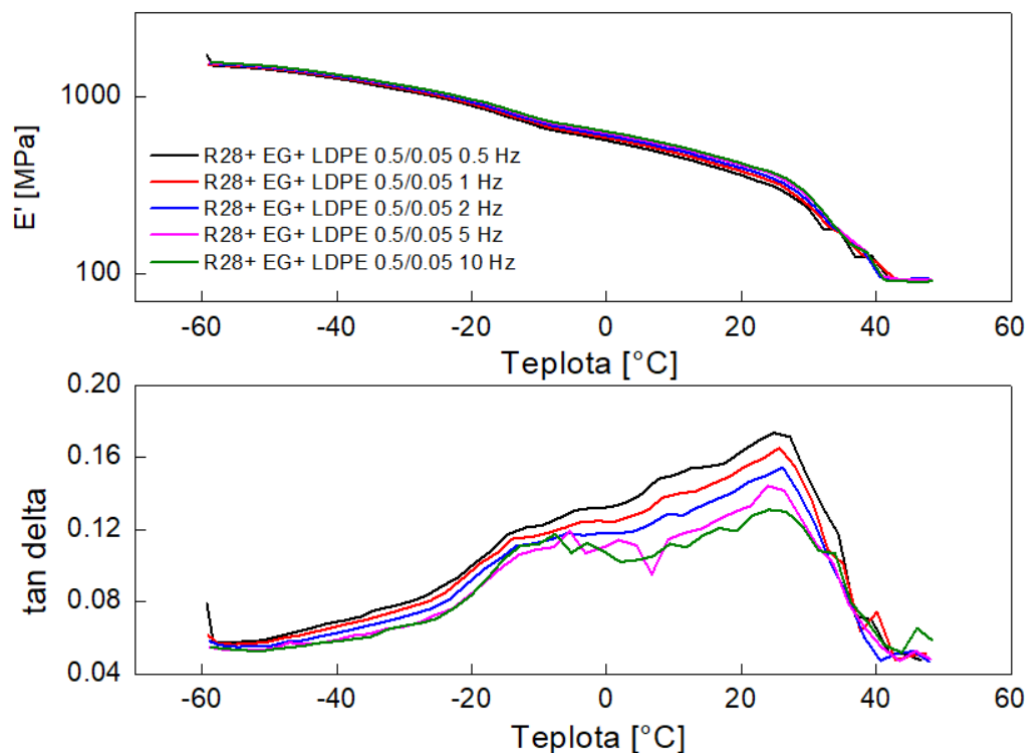


Obrázek 14 Závislost tan delta a soufázového modulu na teplotě pro různé připravené kompozity s voskem R28

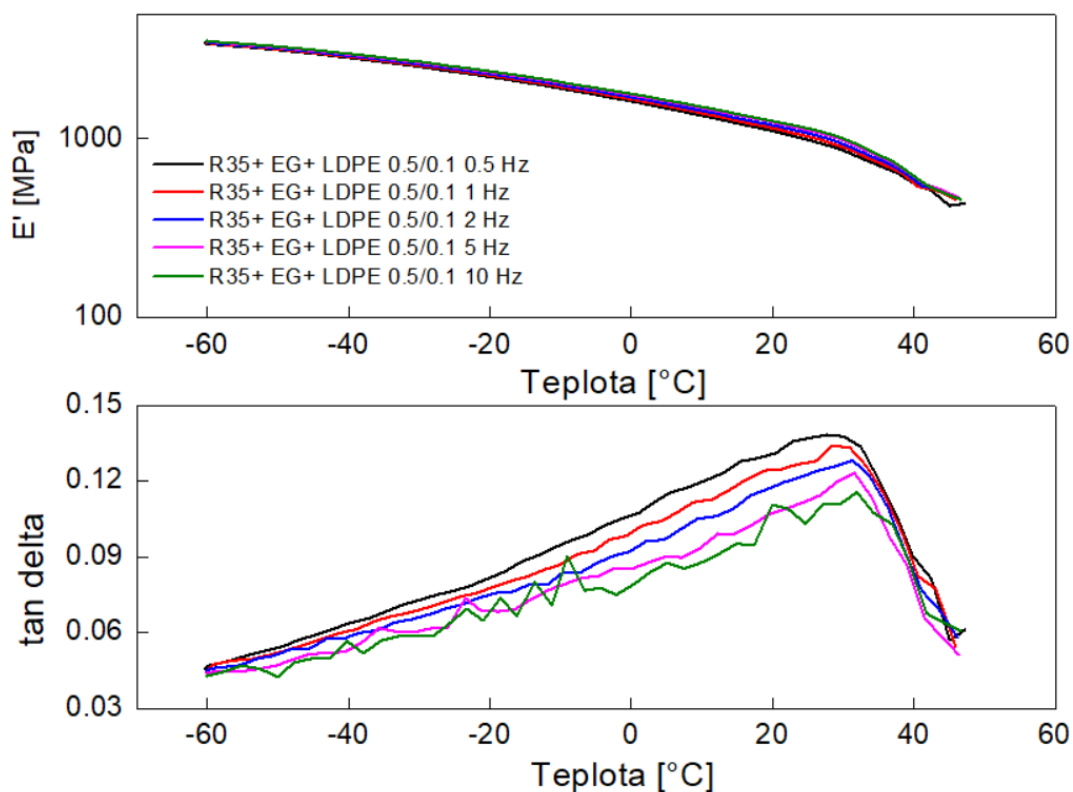


Obrázek 15 Závislost $\tan \delta$ a souřazového modulu na teplotě pro různé připravené kompozity s voskem R35

Vzorky vosku R35 se chovají při dynamickém mechanickém zatížení podobně jako vzorky s R28. Při fázové přeměně se vzorky začínají bortit a neudrží si svůj tvar, pozorováno během měření DMA. U vzorku R35+ EG+ LDPE 0.5/0.1 se udržel tvar, a tudíž byl také vybrán pro následné měření mechanických vlastností za různých frekvencí dynamického namáhání. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 17. Ze závislosti modulu je patrné, že vliv frekvence namáhání na vlastnosti připravených vzorků nebyl významný.



Obrázek 16 Závislost $\tan \delta$ a soufázového modulu na teplotě pro vzorek R28+ EG+ LDPE 0.5/0.05 pro různé frekvence.



Obrázek 17 Závislost $\tan \delta$ a soufázového modulu na teplotě pro vzorek R35+ EG+ LDPE 0.5/0.01 pro různé frekvence

9.3 Stabilita kompozitů

V rámci hodnocení dlouhodobé stability kompozitů, se prováděla zkouška stárnutí, jejímž cílem bylo ověřit stabilitu materiálů při náročných klimatických podmínkách. Vzorky se zvážili před vložením do klimatizační komory, kde byly definovány podmínky zvýšené teploty a vlhkosti.

Po 77 dnech zkoušky stárnutí se vzorky zvážili znovu. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 5. Nejvyšší úbytek hmotnosti vykazovaly vzorky obsahující vosk R28, kde relativní ztrátová hmotnost dosáhla téměř 60 % u vzorku LDPE s 50 hm. % vosku. Hodnota klesla na 40 % po přidavku EG. U vzorků s voskem R35 činila se relativní ztrátová hmotnost pohybovala mezi 20 a 30 hm. % bez jasného trendu.

Tabulka 5 Hmotnostní ztráty při zkoušce stability

LDPE vzorky	Hmotnosti		Relativní ztráta hmotnosti [%]
	m ₀ [g]	m ₁ [g]	
Čistě LDPE	18.2378	18.1692	0.38
0.05 EG + LDPE	21.4932	21.4932	0.00
0.1 EG + LDPE	25.5382	25.5736	0.14
0.2 EG + LDPE	19.5408	19.4934	0.24
Vzorky R28			
50/50 Vosk + LDPE	12.2691	5.1358	58
0.5 Vosk +0.05 EG +LDPE	13.0550	7.9628	39
0.5 Vosk +0.1 EG +LDPE	13.6602	8.2377	40
0.5 Vosk +0.2 EG +LDPE	11.5088	7.0386	39
Vzorky R35			
50/50 Vosk + LDPE	17.0109	11.5949	32
40/60 Vosk + LDPE	20.494	16.2775	21
0.5 Vosk + 0.05 EG + LDPE	15.998	10.6814	33
0.4 Vosk + 0.05 EG + LDPE	21.9706	16.0504	27
0.4 Vosk + 0.1 EG + LDPE	16.4438	12.7657	22
0.5 Vosk + 0.1 EG + LDPE	13.4149	10.5717	21

Ze zkoušky stárnutí se ukázala ztrátová hmotnost. Na obr. 19 je však znázorněna i změna struktury kompozitů. Z rovných destiček se kompozit zkroutil. U vzorků s EG se udržela čtvercová struktura destičky. Zatímco u kompozitů pouze vosk a LDPE se směs roztavila, praskala, zežloutla.



Obrázek 18 Fotka vzorků po urychleném stárnutí, (R35+EG+LDPE 0.5/0.1 Vlevo; Vpravo R35+ EG+ LDPE 0.4/0.05)

9.4 Hořlavost

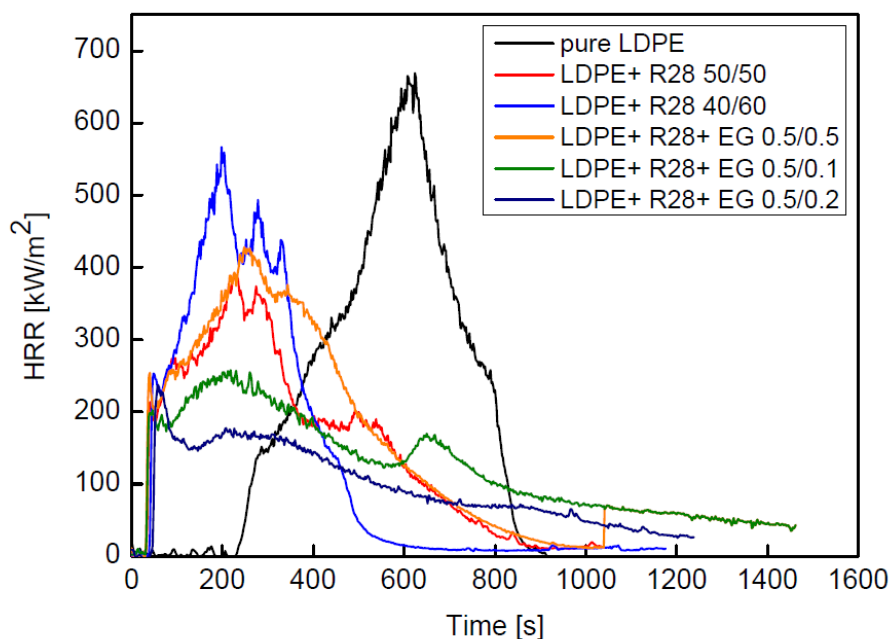
V rámci hodnocení bezpečnosti kompozitů se prováděla zkouška hořlavosti. Z měření se vyjádřilo uvolňující se teplo během času spalování společně s emisí tepelné energie. Z těchto hodnot se konstatuje bezpečnost při případném vzplanutí materiálu v souladu s množstvím uvolněného kouře.

9.4.1 Rychlost uvolňování tepla

Z naměřených dat zobrazených na obrázku 19-21 vyplývá že přidání grafitu významně snižují rychlost uvolňování tepla. Čisté LDPE má sice delší dobu do vzplanutí, nicméně rychlost uvolňování tepla je nejvyšší ze všech měřených vzorků. U vzorků obsahujících vosk R28, viz Obr. 19, se čas vzplanutí zkrátí, což je zapříčiněno právě přítomností vosku, naproti tomu se celkové uvolněné teplo snížilo.

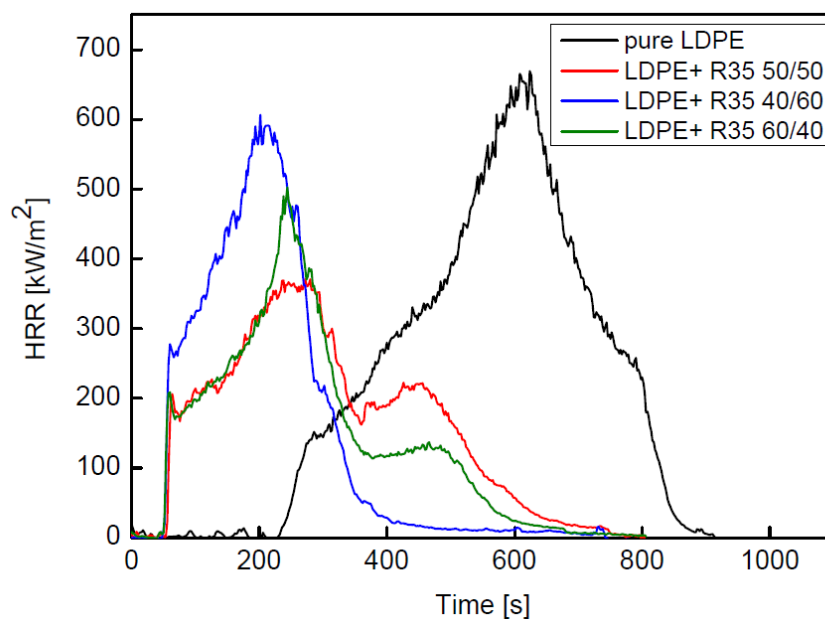
Přídavkem 10 a 20 hm. % EG došlo k utlumení rychlosti uvolněného tepla (HRR), při čemž dohasnutí vzorků trvalo déle. Zde je důležité si uvědomit, že intenzita hoření je zde významně nižší, protože celkové teplo je produkováno materiálem po delší dobu a hoření je méně intenzivní.

Nakonec je tedy možné shrnout, že jak přídavek vosku R28, tak přídavek grafitu zkracují dobu do vzplanutí oproti čistému LDPE, dále pak významně snižují celkové uvolněné teplo, rychlost uvolňování tepla a celkovou dobu hoření.

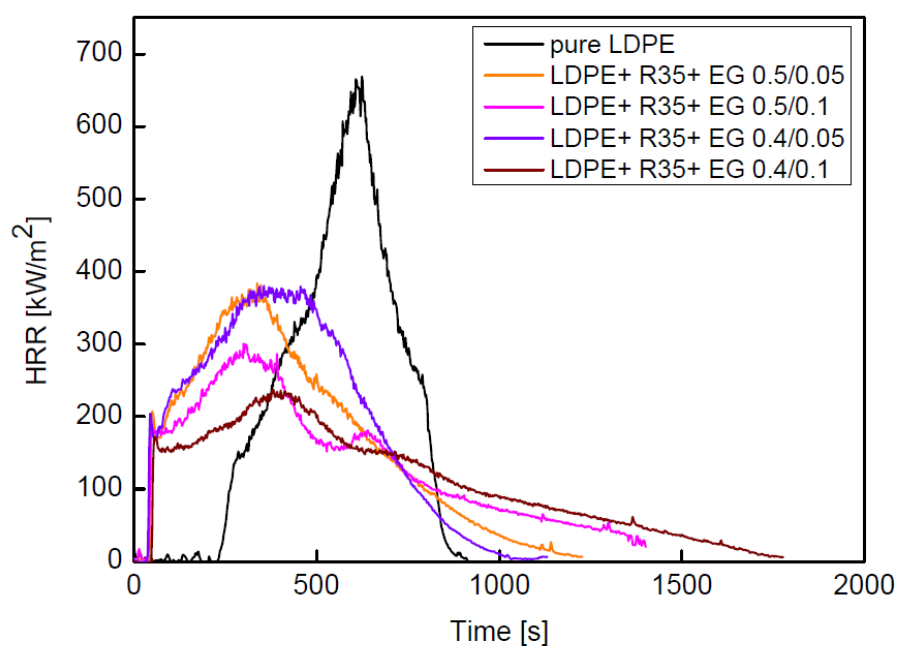


Obrázek 19 Závislost rychlosti uvolňování tepla na čase pro vzorky s obsahem vosku R28

Z obrázku 20 a 21 a z hodnot v tabulce 6 je zjevné, že přidavek vosku R35 významně snižuje celkové uvolněné teplo, ale neprodlužuje čas hoření. Po přidavku EG v různých hmot.% spolu s voskem se množství tepla v určitém přidaném poměru zvyšuje. Z tohoto pohledu tedy nedochází k synergickému efektu přidavku těchto materiálů jako je tomu v případě R28 a EG.



Obrázek 20 Závislost rychlosti uvolňování tepla na čase pro vzorky s obsahem vosku R35 bez EG



Obrázek 21 Závislost rychlosti uvolňování tepla na čase pro vzorky s obsahem vosku R35 s EG

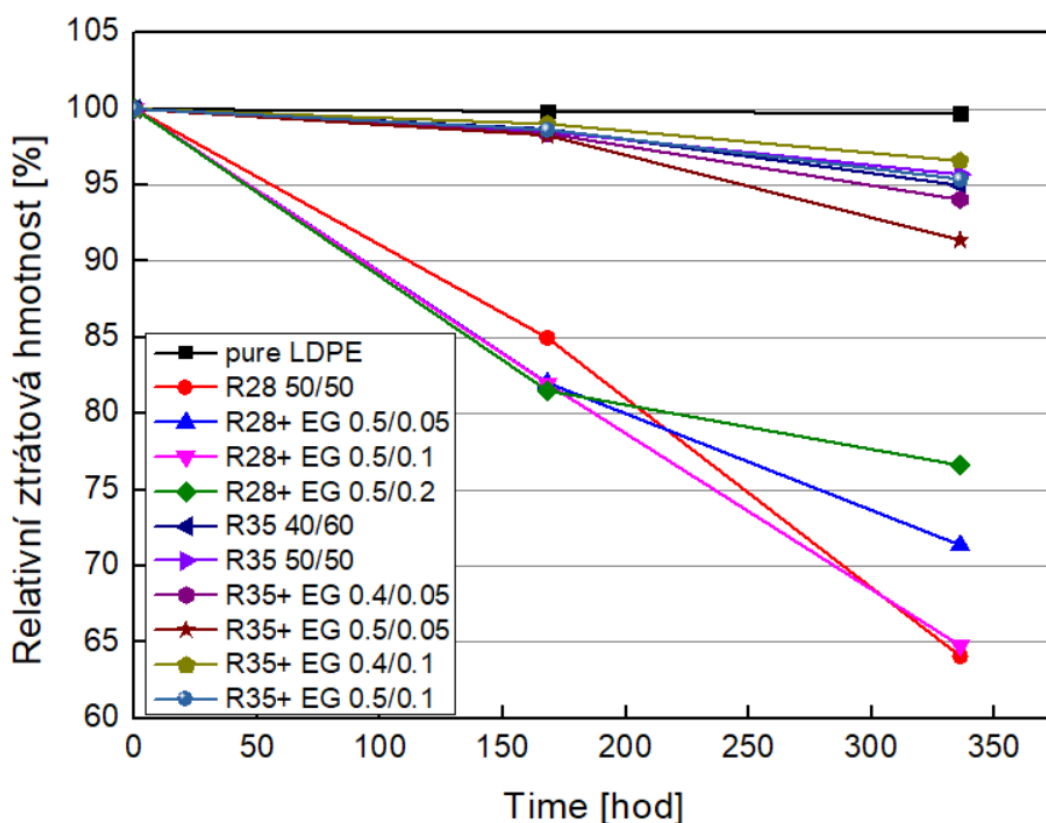
Další velmi důležité parametry znázorněné v Tabulce 6 jsou MARHE a celková produkce kouře. Obecně lze říct, že čím menší hodnota MARHE byla dosažena, tím lepší byla retardace hoření. Přídavek jak vosku R28, tak R35 tento parametr spíše navyšovali, naproti tomu přídavek EG kromě vzorku LDPE+ R28+ EG 0.5/0.05 hodnotu MARHE snižoval, a to významně převážně pro vzorky s voskem R28. Celková produkce kouře byla ve všech směsích potlačena oproti čistému LDPE, což je z pohledu potenciální aplikace velmi důležité.

Tabulka 6 Parametry hoření získané ze zkoušky na kónickém kalorimetru.

Vzorek	Celkové uvolnění tepla [MJ/m ²]	MAHRE [kW/m ²]	Čas do vzplanutí [s]	Čas do uhasnutí [s]	Celková produkce kouře [m ²]
Čisté LDPE	201.5	244.3	120	891	16.2
LDPE + R28 50/50	155.5	266.8	39	883	9.2
LDPE + R28 40/60	153.7	347.2	46	1070	6.9
LDPE+ R28+ EG 0.5/0.05	182.6	302.2	38	936	7.8
LDPE+ R28+ EG 0.5/0.1	176.6	198.8	38	1355	4.9
LDPE+ R28+ EG 0.5/0.2	116.4	145.9	53	1126	2.0
LDPE+ R35 50/50	122.7	230.0	62	810	7.0
LDPE+ R35 40/60	113.6	345.9	59	743	4
LDPE+ R35 60/40	108.8	243.6	58	668	5
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.05	264.9	199.4	49	1139	10.2
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.1	187.7	214.6	47	1294	4
LDPE+ R35+ EG 0.4/0.05	210.7	286.9	46	1019	10.8
LDPE+ R35+ EG 0.4/0.1	190.1	174.4	56	1623	7.3

9.5 Úbytek hmotnosti

Při hodnocení úbytku hmotnosti na čase při konstantních 60 °C se projevilo velmi významné unikání vosku R28 ze vzorků. Výsledky jsou uvedeny na Obrázku 22. Vzorky obsahující vosk R28 už po týdnu (168 hodin) ztratili až 20 % své hmotnosti. V případě vzorků s voskem R35 byly tyto ztráty po týdnu ztráty kolem 2 %. U vzorků s voskem R28 se tento rozdíl dále významně liší na konci testu, kdy s rostoucím množstvím EG klesá úbytek hmotnosti pro vzorky s obsahem 5 a 20 hm. % EG. Více stabilní jsou z tohoto pohledu vzorky s voskem R35, které měly všechny na konci testu přes 90 % své původní hmotnosti.

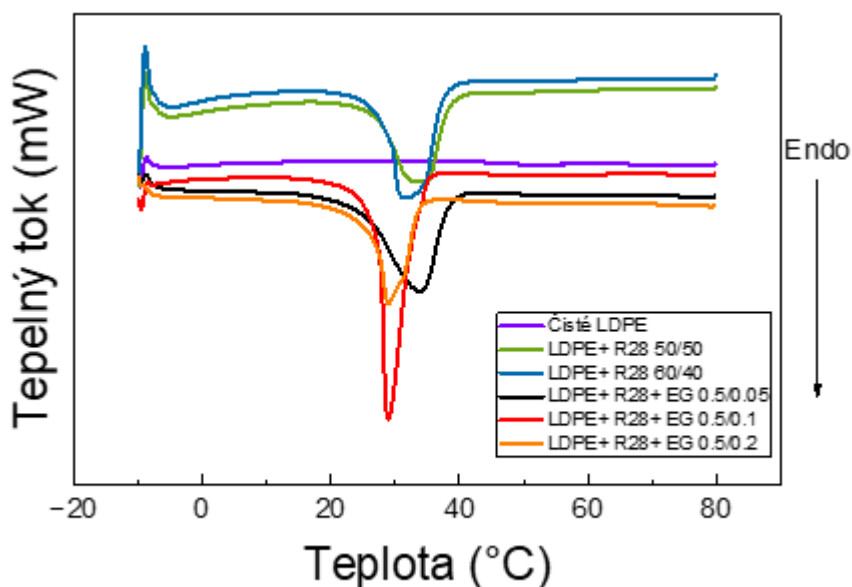


Obrázek 22 Závislost množství úbytku hmotnosti na čase pro různé připravené kompozity.

9.6 Diferenciální skenovací kalorimetr

DSC je klíčovou analytickou metodou pro charakterizaci termických vlastností. V rámci zkoušky se analyzovaly tepelné přechody, teplota tání a teplota krystalizace.

Na obrázku 23 je zobrazena závislost tepelného toku na teplotě, integrací plochy endotermního píku byly zjištěny hodnoty entalpie připravených vzorků po zamíchání a lisování. Hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 8. Vzorky připravené mícháním vosku R28 a LDPE vykazují poměrně nízké hodnoty entalpií tání, což je způsobeno převážně ztrátou vosku během míchání při teplotě zpracování a následném lisování. Z tabulky 8 je hodnota entalpie tání (ΔH_m) přídavek EG tuto hodnotu zvýšil, čili úbytek vosku během zpracování byl z důvodu interakce EG a R28 významně nižší. Tyto hodnoty jsou blízko 100 J/g což je považované za velmi dobré hodnoty. Komerční PCM mají obvykle kolem 40-50 J/g.

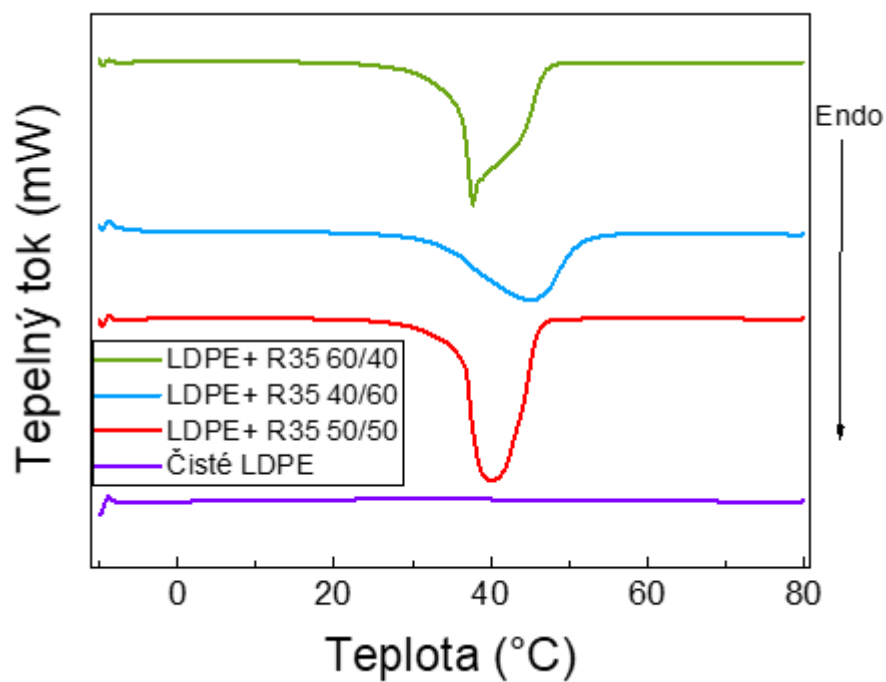


Obrázek 23 Závislost tepelného toku na teplotě, ohřev vzorků s obsahem vosku R28

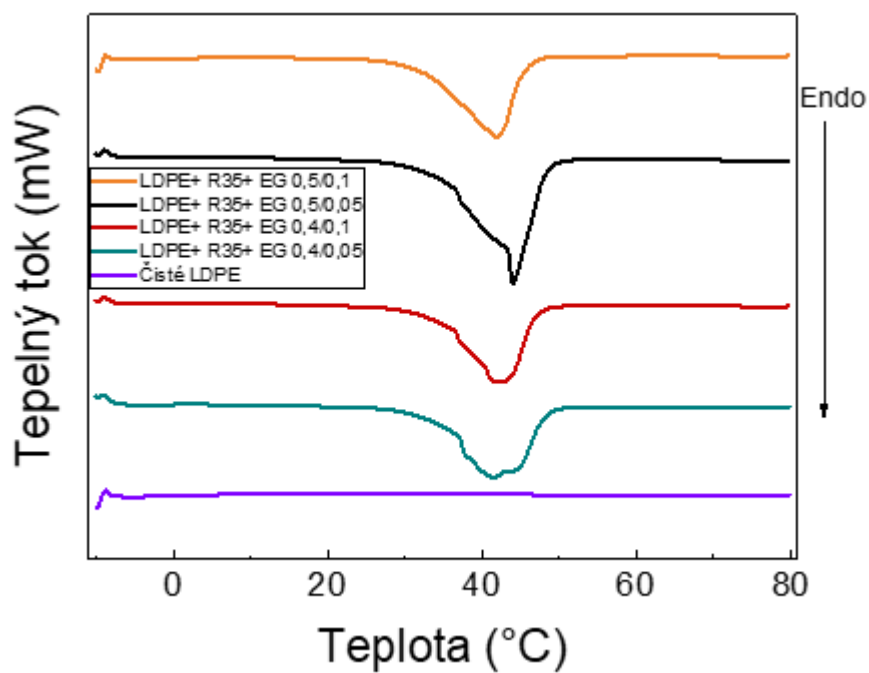
Tabulka 7 Naměřené hodnoty pro vzorky s voskem R28

Vzorky R28	Parametry			
	T_m [°C]	ΔH_m [J*g ⁻¹]	T_c [°C]	ΔH_c [J*g ⁻¹]
LDPE+ R35 50/50	33,82	- 69,38	16,17	66,38
LDPE+ R35 60/40	31,64	- 81,18	17,02	76,96
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.05	33,78	- 81,98	16,17	72,59
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.1	28,95	-99,84	22,95	94,29
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.2	28,40	- 55,72	18,86	51,92

V případě vzorků obsahující vosk R35 jsou entalpie tání významně vyšší, než pro vzorky s voskem R28 jak je vidět v tabulce 9. Hlavní důvod je ten, že vosk R35 má lepší tepelnou stabilitu a jeho úbytek během zpracování je nižší. Přídavek EG do materiálů dále nezvyšuje entalpie tání, ale posouvá teplotu tání do vyšších teplot, což umožňuje dle množství EG nastavit teplotu fázového přechodu. viz Obr. 24-25.



Obrázek 24 Závislost tepelného toku na teplotě, ohřev vzorků s obsahem vosku R35



Obrázek 25 Závislost tepelného toku na teplotě, ohřev vzorků s obsahem vosku R35 s EG

Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro R35 vzorky

Vzorky R35	Parametry			
	T_m [°C]	ΔH_m [J*g ⁻¹]	T_c [°C]	ΔH_c [J*g ⁻¹]
LDPE+ R35 50/50	39,45	- 189,37	27,95	192,55
LDPE+ R35 60/40	37,10	- 159,62	27,38	173,77
LDPE+ R35 40/60	44,86	- 117,01	24,41	126,94
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.05	43,93	- 143,61	28,25	144,47
LDPE+ R35+ EG 0.4/0.05	41,02	- 112,31	27,79	115,20
LDPE+ R35+ EG 0.4/0.1	42,10	- 103,43	28,04	95,57
LDPE+ R35+ EG 0.5/0.1	41,92	- 112,36	27,73	115,57

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala studiem vlivu různých podílů parafinových vosků a EG na vlastnosti kompozitů na bázi LDPE. Cílem bylo vyhodnotit, jak tyto přísady ovlivňují mechanické vlastnosti, tepelnou stabilitu a hořlavost výsledného materiálu.

V rámci experimentální části byly připraveny vzorky s různým zastoupením vosků (R28 a R35) a EG, přičemž byla provedena řada zkoušek včetně mechanického testování (tahová zkouška), dynamicko-mechanické analýzy (DMA), diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC), analýza hořlavosti, zkouška stárnutí a stability a zkouška úbytku hmotnosti.

Z mechanických tahových zkoušek vyplynulo, že přidavek expandovaného grafitu zvyšuje tuhost materiálu, což se projevilo vyšším Youngovým modulem, avšak výrazně snižuje tažnost a zvyšuje křehkost, zejména po stárnutí. Kombinace LDPE s voskem R28 vedla k výraznému zhoršení mechanických vlastností, které bylo částečně kompenzováno přidavkem EG, jenž zlepšil stabilitu po fázové přeměně, ale celková tažnost zůstala velmi nízká. Vzorky s voskem R35 měly podobné chování jako R28, ale díky vyšší teplotě tání vykazovaly lepší stabilitu mechanických vlastností při vyšších teplotách. Kombinace LDPE, R35 a EG vedla k vyšší pevnosti a tuhosti než u R28, přičemž nízké prodloužení zůstávalo víceméně neměnné i po stárnutí, což naznačuje stabilitu mechanických parametrů.

Zkoušky pomocí DMA potvrdily výskyt fázových přechodů u kompozitů obsahující vosky – R28 s přechodem $\sim 25^\circ\text{C}$, zatímco R35 $\sim 35^\circ\text{C}$. Po překročení těchto teplot docházelo k výraznému poklesu modulu, zejména u vzorků s vyšším obsahem vosků. Vybrané vzorky s obsahem EG (zejména kombinace 0.5 vosku a 0.05–0.1 EG) si dokázaly částečně zachovat dostatečnou hodnotu soufázového modulu i po fázové přeměně, a proto byly dále analyzovány i v měřeních při více frekvencích.

Z výsledků DSC měření vyplývá, že vzorky s voskem R28 vykazují nižší hodnoty entalpie tání než u vzorků s voskem R35, což je pravděpodobně způsobeno částečnou ztrátou vosku během zpracování při vyšších teplotách. Přídavek expandovaného grafitu však tento úbytek výrazně omezil, pravděpodobně díky interakci mezi EG a voskem, což vedlo ke zvýšení entalpie tání na hodnoty blízké 100 J/g . Tyto hodnoty jsou výrazně vyšší než u běžně dostupných komerčních PCM, které dosahují pouze $40\text{--}50\text{ J/g}$, a naznačují velmi dobrou schopnost akumulace tepla. Vzorky s voskem R35 vykazují obecně vyšší entalpie tání než ty s R28, vosk R35 dosahuje $\sim 150\text{ J/g}$, což je dáno vyšší tepelnou stabilitou vosku R35 a jeho menším úbytkem během zpracování. Přídavek EG u těchto vzorků již entalpii tání

významně nezvyšuje, ale umožňuje posun teploty tání směrem k vyšším hodnotám, čímž lze dle množství EG upravovat teplotu fázového přechodu materiálu.

Pomocí zkoušky úbytku hmotnosti byla zkoumána odolnost kompozitu udržet vosk ve struktuře. Kompozity s obsahem vosku R28 se vykazovaly vysokou relativní ztrátovou hmotnost ~40 %. Z kompozitů s přidavkem vosku R35 byla patrná jejich menší relativní ztrátová hmotnost ~5 %, vosk tedy z kompozitů méně uniká.

Vzorky, které byly podrobeny stárnutí, ukazovaly stejné trendy jako čerstvě připravené vzorky. Stárnuté kompozity s obsahem vosku R28 vykazovaly relativní hmotností ztrátu ~60 %, až po přidání EG klesla hodnota na ~40 %. U přidavku vosku R35 byla ztrátová hmotnost ~25 %.

Z výsledků měření parametrů hoření vyplývá, že přidavek EG výrazně snižuje rychlost uvolňování tepla, a zároveň prodlužuje dobu hoření, čímž dochází k tlumení intenzity hoření. Přítomnost vosků R28 i R35 snižuje celkové uvolněné teplo, ačkoliv zkracuje dobu do vzplanutí. U kombinací R28 a EG dochází k synergickému efektu, který zajišťuje nižší intenzitu hoření i nižší hodnoty MARHE, což značí lepší retardaci hoření. Oproti tomu kombinace vosku R35 a EG tento efekt nevykazuje. Celková produkce kouře byla u všech kompozitních vzorků nižší než u čistého LDPE, což představuje pozitivní aspekt z hlediska požární bezpečnosti.

Z hlediska vyhodnocení se bere na vědomí zamýšlené uplatnění kompozitů ve stavebním průmyslu. Ve zpracovatelnosti a aplikaci materiálů se ukázali dva kandidáti pro své udržení mechanických vlastností při vysokých teplotách, LDPE s obsahem 50 hm. % vosku R28 a 5 hm. % expandovaného grafitu (R28+ EG+ LDPE 0.5/0.05) a vzorek LDPE s obsahem 50 hm. % vosku R35 a 10 hm. % expandovaného grafitu (R35+ EG+ LDPE 0.5/0.1).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MUTHUKUMAR, P. a NIYAS, H. Materials, Design and Development of Latent Heat Storage Systems for Medium and Large-Scale Applications: Issues and Challenges. Online. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020, s. 417-437. ISBN 9780128131961. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11154-3>. [cit. 2025-04-28].
- [2] PIELICHOWSKA, K. a PIELICHOWSKI, K. Phase change materials for thermal energy storage. Online. *Progress in Materials Science*. 2014, roč. 65, s. 67-123. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>. [cit. 2025-02-17].
- [3] CHANDRA, D.; CHELLAPPA, R. a CHIEN, W. Thermodynamic assessment of binary solid-state thermal storage materials. Online. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2005, roč. 66, č. 2-4, s. 235-240. ISSN 00223697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2004.08.047>. [cit. 2025-02-17].
- [4] BOŠNIAK HORDOV, J.; NIŽETIĆ, S.; JURČEVIĆ, M.; ČOKO, D.; ĆOSIĆ, M. et al. Review of organic and inorganic waste-based phase change composites in latent thermal energy storage: Thermal properties and applications. Online. *Energy*. 2024, roč. 306, s. 67-123. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132421>. [cit. 2025-03-24].
- [5] ZHI, M.; YUE, S.; ZHENG, L.; SU, B.; FU, J. et al. Recent developments in solid-solid phase change materials for thermal energy storage applications. Online. *Journal of Energy Storage*. 2024, roč. 89. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111570>. [cit. 2025-03-24].
- [6] HOSHI, A.; MILLS, D.R.; BITTAR, A. a SAITOH, T.S. Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR. Online. *Solar Energy*. 2005, roč. 79, č. 3, s. 332-339. ISSN 0038092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.023>. [cit. 2025-03-12].
- [7] ZHAO, C.Y.; LU, W. a TIAN, Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). Online. *Solar Energy*. 2010, roč. 84, č. 8, s. 1402-1412. ISSN 0038092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.022>. [cit. 2025-03-12].
- [8] MARÍN, J.M.; ZALBA, B.; CABEZA, L.F. a MEHLING, H. Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite. Online. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005, roč. 48, č. 12, s. 2561-2570. ISSN 00179310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.11.027>. [cit. 2025-03-12].
- [9] ZALBA, B.; MARÍN, J.M.; CABEZA, L.F. a MEHLING, H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2003, roč. 23, č. 3, s. 251-283. ISSN 13594311. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8). [cit. 2025-03-12].
- [10] ZHI, M.; FAN, R.; ZHENG, L.; YUE, S.; PAN, Z. et al. Experimental investigation on hydrated salt phase change material for lithium-ion battery thermal management and thermal runaway mitigation. Online. *Energy*. 2024, roč. 307. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132685>. [cit. 2025-03-24].
- [11] LIU, M.; SAMAN, W. a BRUNO, F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, roč. 16,

- č. 4, s. 2118-2132. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.020>. [cit. 2025-03-24].
- [12] TAN, C.; ZHANG, M.; YANG, J.; WANG, X.; ZHAO, W. et al. Ultra-high performance Cu-Al-Ni as phase change material for thermal management of high-power electronic devices. Online. *Journal of Energy Storage*. 2025, roč. 113. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115635>. [cit. 2025-03-23].
- [13] QIN, M.; SHEN, Z.; XIONG, F.; HAN, S. a ZOU, R. Toward High-Power and High-Density Thermal Storage: Dynamic Phase Change Materials. Online. *ACS Energy Letters*. 2023, roč. 8, č. 8, s. 3552-3557. ISSN 2380-8195. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.3c01222>. [cit. 2025-02-17].
- [14] LONG, P.; CHENG, J.; WEI, J.; ZHOU, Y.; LI, H. et al. Poly(vinyl alcohol) aerogels based on amino modified boron nitride nanosheets and phosphorus containing PEG for shape-stable phase change composites with enhanced thermal conductivity and flame-retardant properties. Online. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025, roč. 707. ISSN 09277757. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135957>. [cit. 2025-03-24].
- [15] KARAMAN, S.; KARAIPEKLI, A.; SARI, A. a BIÇER, A. Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage. Online. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, roč. 95, č. 7, s. 1647-1653. ISSN 09270248. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.022>. [cit. 2025-03-23].
- [16] DURAN, M.; SERRANO, A.; NIKULIN, A.; DAUVERGNE, J. L.; LABIDI, J. et al. Polyvinylidene fluoride supported phase change material fibers fabricated via emulsion jet injection method. Online. *Journal of Energy Storage*. 2024, roč. 85. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111032>. [cit. 2025-03-23].
- [17] ZUO, C.; ZHENG, L.; YANG, S.; LI, B. a ZHANG, H. Thermal storage properties of NiTiCu shape memory alloys with different phase transition behaviors. Online. *Next Materials*. 2025, roč. 8. ISSN 29498228. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100577>. [cit. 2025-03-24].
- [18] BOSCH TERMOTECHNIKA S.R.O. - OBCHODNÍ DIVIZE BOSCH JUNKERS. *JUNKERS Tipy pro topenáře (XII) - Teoretické základy kondenzační techniky*. Online. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/7912-junkers-tipy-pro-topenare-xii-teoreticke-zaklady-kondenzacni-techniky>. [cit. 2025-04-22].
- [19] WONDU, E.; LEE, W.; KIM, M.; PARK, D. a KIM, J. Phase Change Materials for Energy Storage Applications from PEG and PBAT with AlN and CNT as Fillers. Online. *ACS Omega*. 2024, roč. 9, č. 50, s. 49557-49565. ISSN 2470-1343. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07480>. [cit. 2025-04-22].
- [20] OYA, T.; NOMURA, T.; TSUBOTA, M.; OKINAKA, N. a AKIYAMA, T. Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2013, roč. 61, č. 2, s. 825-828. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.05.033>. [cit. 2025-04-22].
- [21] LIU, D.; YANG, F.; LIU, Y.; MU, Y.; MENG, F. et al. Anchoring Carbon Nanotubes onto Polyimide-Derived Vertical Carbon as Supporter of Paraffin for Thermal Interface Materials with High Thermal Conductivity. Online. *Journal of Electronic Materials*. 2024, roč. 53, č. 2, s. 743-752. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10872-2>. [cit. 2025-04-22].
- [22] LI, Z.; GE, C.; FENG, D.; ZHOU, L. a ZHANG, X. Flexible phase change sensors with improved heat dissipation for wearable thermal management. Online. *Applied*

- Surface Science*. 2025, roč. 690. ISSN 01694332. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162632>. [cit. 2025-04-22].
- [23] HU, J.; YAO, Z.; CHEN, A.; XIAO, C.; ZHANG, G. et al. High thermal-conductive phase change material by carbon fiber orientation for thermal management and energy conversion application. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2025, roč. 265. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125566>. [cit. 2025-04-22].
- [24] LUO, D.; JIANG, L.; WU, Z.; GENG, L. a CHEN, H. Realizing cyclic utilization of phase change materials in the thermoelectric-based battery thermal management system under real discharge-charge conditions. Online. *Journal of Energy Storage*. 2025, roč. 114. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115682>. [cit. 2025-04-24].
- [25] ZHANG, K.; HU, C.; HUANG, H.; LI, B.; HUANG, C. et al. Achieving efficient energy utilization by PCM in the food supply chain: Encapsulation technologies, current applications, and future prospects. Online. *Journal of Energy Storage*. 2024, roč. 79. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110214>. [cit. 2025-04-25].
- [26] HU, Z.; YANG, X. a QIU, Y. Tandem radiative cooling with latent thermal energy storage for enhanced passive cooling and thermal shock resistance. Online. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2025, roč. 286. ISSN 09270248. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113565>. [cit. 2025-04-24].
- [27] KANDASAMY, R.; WANG, X. a MUJUMDAR, A. S. Application of phase change materials in thermal management of electronics. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2007, roč. 27, č. 17-18, s. 2822-2832. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.013>. [cit. 2025-04-24].
- [28] SHARSHIR, S. W.; JOSEPH, A.; ELSHARKAWY, M.; HAMADA, M. A.; KANDEAL, A. W. et al. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. Online. *Energy and Buildings*. 2023, roč. 285. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112908>. [cit. 2025-04-24].
- [29] KHAN, J. a SINGH, P. Review on phase change materials for spacecraft avionics thermal management. Online. *Journal of Energy Storage*. 2024, roč. 87. ISSN 2352152X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111369>. [cit. 2025-04-24].
- [30] HU, J.; FENG, D.; LI, W.; MIAO, J. a FENG, Y. Constructing hierarchical porous SiC/SiO₂ ceramics-based phase change composites with low thermal conductivity and high strength for aircraft thermal protection. Online. *Ceramics International*. 2025, roč. 51, č. 10, s. 12408-12419. ISSN 02728842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.01.084>. [cit. 2025-04-24].
- [31] LIU, J.; ZHU, X.; DAI, J.; YANG, K.; WANG, S. et al. Integration of sustainable polymers with phase change materials. Online. *Progress in Materials Science*. 2025, roč. 151. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101447>. [cit. 2025-04-25].
- [32] SONI, K. a PANWAR, N. L. Revolutionizing thermal energy storage: An overview of porous support materials for advanced composite Phase Change Materials (PCMs). Online. *Progress in Engineering Science*. 2024, roč. 1, č. 4. ISSN 29504252. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100023>. [cit. 2025-04-25].
- [33] JUNAID, M. F.; REHMAN, Z.; IJAZ, N.; ČEKON, M.; ČURPEK, J. et al. Biobased phase change materials from a perspective of recycling, resources conservation and

- green buildings. Online. *Energy and Buildings*. 2022, roč. 270. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112280>. [cit. 2025-04-25].
- [34] WUNDERLICH, B. *Thermal Analysis*. Online. Academic Press, 1990. ISBN 978-0-12-765605-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01687-0>. [cit. 2025-04-22].
- [35] KALEDOVÁ, A. *Charakterizace polymerů – sylabus: Podklad k předmětu charakterizace polymerů*. 2025.
- [36] INFINITY LAB INC. *Thermogravimetry/Evolved Gas Analysis (TG-EGA)*. Online. INFINITY LAB INC. Infinity Lab. Bez data. Dostupné z: <https://infinitalab.com/>. [cit. 2025-04-22].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Typy PCM [2]	16
Obrázek 2 Využití organických a anorganických odpadů [4]	19
Obrázek 3 Grafické znázornění latentního tepla na příkladu vody [18]	21
Obrázek 4 Uhlíková plniva pod mikroskopem [23]	24
Obrázek 5 Mikroskopická struktura slitiny hliníku, mědi a niklu [12]	24
Obrázek 6 Diagram tahové křivky [35]	35
Obrázek 7 Vyseknuté vzorky.....	41
Obrázek 8 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky LDPE plněné expandovaným grafitem.....	44
Obrázek 9 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky LDPE plněné expandovaným grafitem, stárnuté	45
Obrázek 10 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R28.....	47
Obrázek 11 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R28, stárnuté ..	48
Obrázek 12 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R35,.....	49
Obrázek 13 Závislost tahového napětí na deformaci pro vzorky s voskem R35, stárnuté ..	50
Obrázek 14 Závislost tan delta a soufázového modulu na teplotě pro různé připravené kompozity s voskem R28.....	51
Obrázek 15 Závislost tan delta a soufázového modulu na teplotě pro různé připravené kompozity s voskem R35.....	52
Obrázek 16 Závislost tan delta a soufázového modulu na teplotě pro vzorek R28+ EG+ LDPE 0.5/0.05 pro různé frekvence.	53
Obrázek 17 Závislost tan delta a soufázového modulu na teplotě pro vzorek R35+ EG+ LDPE 0.5/0.01 pro různé frekvence	53
Obrázek 18 Fotka vzorků po urychleném stárnutí, (R35+EG+LDPE 0.5/0.1 Vlevo; Vpravo R35+ EG+ LDPE 0.4/0.05)	55
Obrázek 19 Závislost rychlosti uvolňování tepla na čase pro vzorky s obsahem vosku R28	56
Obrázek 20 Závislost rychlosti uvolňování tepla na čase pro vzorky s obsahem vosku R35 bez EG.....	57
Obrázek 21 Závislost rychlosti uvolňování tepla na čase pro vzorky s obsahem vosku R35 s EG.....	57
Obrázek 22 Závislost množství úbytku hmotnosti na čase pro různé připravené kompozity.	59
Obrázek 23 Závislost tepelného toku na teplotě, ohřev vzorků s obsahem vosku R28.....	60
Obrázek 24 Závislost tepelného toku na teplotě, ohřev vzorků s obsahem vosku R35.....	62
Obrázek 25 Závislost tepelného toku na teplotě, ohřev vzorků s obsahem vosku R35 s EG	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Kompletace vzorků	43
Tabulka 2 Vyhodnocené hodnoty pro vzorky bez vosku.....	45
Tabulka 3 Vyhodnocené hodnoty pro vzorky s voskem R28	48
Tabulka 4 Vyhodnocení pro vzorky s voskem R35	50
Tabulka 5 Hmotnostní ztráty při zkoušce stability	54
Tabulka 6 Parametry hoření získané ze zkoušky na kónickém kalorimetru.....	58
Tabulka 8 Naměřené hodnoty pro vzorky s voskem R28	60
Tabulka 9 Naměřené hodnoty pro R35 vzorky	63

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PCM	Materiály s fázovou přeměnou
SHTES	Sensibilní termální energetické úložiště
LHTES	Latentně termální energetické úložiště
EG	Expandovatelný grafit
LHS	Latentní tepelné úložiště
PEG	Polyethylen glykol
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
PBAT	Poly(butylen-adipát-tereftalát)
bPCM	Biobázové materiály s fázovou přeměnou
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
DTA	Diferenční termická analýza
R28/R35	Parafínový vosk RT28HC/RT35HC