

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Akumulační schopnosti vybraných hydrátů anorganických solí

Lukáš Binder

Diplomová práce

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Binder**
Osobní číslo: **C14602**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Anorganická technologie**
Název tématu: **Akumulační schopnosti vybraných hydrátů anorganických solí**
Zadávající katedra: **Katedra anorganické technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte literární rešerši v souvislosti se zadaným tématem.
2. Vybrané hydráty anorganických solí otestujte zejména s ohledem na schopnost uchovávat tepelnou energii a možný výskyt podchlazení při fázové změně pevná látka - kapalina.
3. Akumulační schopnosti otestujte během krátkých, ale i dlouhodobých měření pomocí diferenčního skenovacího kalorimetru.
4. Získané výsledky analyzujte, podrobně diskutujte a předložte formou diplomové práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavla Honcová, Ph.D.

Katedra anorganické technologie

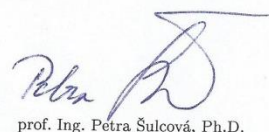
Datum zadání diplomové práce: **20. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2017**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petra Šulcová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 20. února 2017

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2017

Lukáš Binder

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Pavle Honcové, Ph.D. za trpělivost, ochotu a pomoc při řešení diplomové práce. Děkuji také všem členům katedry anorganické technologie za vytvoření příjemného pracovního prostředí.

Zvláštní poděkování pak věnuji mé rodině a blízkým za jejich podporu a trpělivost během mého studia na vysoké škole.

ANOTACE

Diplomová práce je zaměřena na problematiku akumulace tepla využívající fázové změny sloučeniny hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a hexahydrátu dusičnanu nikelnatého $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Teplotní stabilita látek byla testována během několika teplotních cyklů pomocí DSC. Kromě čistých látek byly testovány směsi s nukleačními činidly, které měly snížit pozorované podchlazení. Sledován byl vliv nukleačních činidel na teploty a změny entalpie tání a krystalizace zvolených hexahydrátů.

KLÍČOVÁ SLOVA

podchlazení, entalpie tání a krystalizace, dusičnan kobaltnatý hexahydrát, dusičnan nikelnatý hexahydrát, nukleační činidlo

TITLE

The heat storage ability of selected hydrates of inorganic salts

ANNOTATION

The thesis is focused on accumulation of heat energy using phase change materials as cobalt(II)nitrate hexahydrate $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and nickel(II)nitrate hexahydrate $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. The temperature stability of the substances has been tested over several temperature cycles using DSC. The pure salts as well as mixtures with nucleating agents were tested to prevent supercooling. The influence of nucleating agents on temperatures and enthalpy change of fusion and crystallization was analysed.

KEYWORDS

Supercooling, enthalpy change of fusion and crystallization, cobalt(II)nitrate hexahydrate, nickel(II)nitrate hexahydrate, nucleating agent

Obsah

Úvod.....	10
1. Teoretická část	11
1.1. Akumulace tepla.....	11
1.1.1. Tepelná kapacita	12
1.1.2. Akumulace citelného tepla	13
1.1.3. Akumulace latentního tepla.....	14
1.2. Materiály s fázovou změnou – PCMs	17
1.2.1. Základní dělení PCMs	18
1.3. Charakterizace PCMs.....	20
1.3.1. Základní vlastnosti PCMs	20
1.3.2. Separace fází.....	21
1.3.3. Podchlazení PCMs	26
1.3.1. Princip rentgenové difrakční analýzy.....	27
1.3.2. Diferenční skenovací kalorimetr	28
1.3.3. Termogravimetrie	29
1.3.4. Objemové T-cykly.....	30
1.4. Vlastnosti hydrátů anorganických solí	31
1.4.1. Vybrané hydráty	32
2. Experimentální část.....	34
2.1. Seznam použitých chemikálií	34
2.2. Charakterizace použitých hydrátů.....	34
2.2.1. Rentgenová difrakční analýza	34
2.2.3. Termogravimetrie	36
2.2.4. Diferenční skenovací kalorimetrie	38
3. Výsledky a diskuse	40
3.1. Dusičnan kobaltnatý hexahdrát	40

3.1.1.	Přídavek jednoho nukleačního činidla	41
3.1.2.	Pomalé cykly	51
3.1.3.	Směsi nukleačních činidel	55
3.2.	Dusičnan nikelnatý hexahydrát	61
3.2.1.	Přídavek jednoho nukleačního činidla	62
3.2.2.	Pomalé cykly	69
4.	Závěr	72
5.	Použitá literatura	73
6.	Přílohy	75

Seznam symbolů a zkratk

C	tepelná kapacita [J/K]
c	měrná tepelná kapacita (specifické teplo) [J/g·K]
C_{lp}	tepelná kapacita za konstantního tlaku pro kapalinu [J/K]
c_m	měrná tepelná kapacita tání [J/g·K]
C_p	tepelná kapacita za konstantního tlaku [J/K]
c_r	měrná tepelná kapacita reakce [J/g·K]
C_{sp}	tepelná kapacita za konstantního tlaku pro pevnou látku [J/K]
ΔH_c	entalpie tání [J/g]
ΔH_m	entalpie tání [J/g]
ΔH_r	entalpie reakce [J/g]
m	hmotnost [g]
Q	teplo [J]
q	hustota akumulace energie na jednotku hmotnosti [J/Kg]
q_v	hustota akumulace energie na jednotku objemu [J/m ³]
ΔT	změna teploty [°C]
T_c	teplota krystalizace [°C]
$T_{i,f}$	teplota ve zvoleném bodě i,f [°C]
T_k	konečná teplota [°C]
T_m	teplota tání [°C]
T_p	počáteční teplota [°C]
V	objem [m ³]
ε	je pórovitost lože
ρ	hustota [kg/m ³]

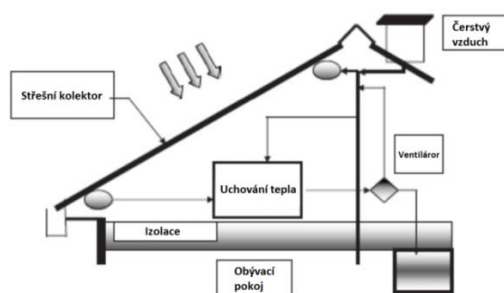
ACT akumulace citelného tepla

PCM materiál s fázovou změnou (phase change materiál)

TCM látky uchovávající citelné teplo (thermal energy storage)

Úvod

Solární energie je sezónní záležitost a proto je třeba ji uchovat. Zejména v našem podnebí je v létě solární energie mnohem víc než v zimě. Celoroční sluneční energie však stačí na poptávku energie v bytech. Abychom se však mohli plně spolehnout na tuto energii, je nutná účinná metoda skladování. Jedním z nejstarších a nejjednodušších způsobů skladování tepelné energie je ve vodě, ale tato metoda je vhodná pouze pro krátké časové intervaly. Nevýhodou je potřeba velkého množství vody, a i přes izolaci ztrácí teplo. TES (thermal energy storage – látky uchovávající citelné teplo) mají větší tepelnou kapacitu než voda. [1-3]

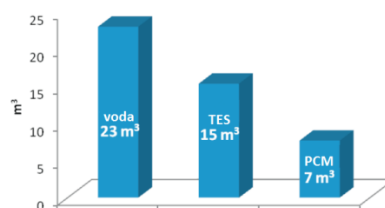


Obrázek 1: Solární panely s akumulační nádrží pro využití v rodinných domech [3]

Skladování energie se provádí do přístrojů nebo fyzických médií, které uchovávají energii k pozdějšímu využití. Zařízení, které ukládá energii, se někdy nazývá akumulátor. Praktické využití uchování energie je zobrazeno na Obrázek 1 kdy střešní kolektor umístěný na rodinném domě akumuluje tepelnou energii a uchovává ji pro pozdější využití.

Nevýhodou akumulátorů je cena a i přes snahu stabilizovat tyto látky stále trpí tepelnými ztrátami během skladování a tepelných cyklů. V materiálech s fázovou změnou (PCM z anglického phase change materials) je teplo uloženo chemickou reakcí.

PCM mají velkou tepelnou kapacitu, a proto postačuje jen malý objem pro uložení velkého množství tepla. Jakmile se teplo ukládá, probíhá chemická reakce a při skladování nedochází ke ztrátě tepla. Objemy skladovacích jednotek pro roční tepelnou spotřebu energie průměrné domácnosti uložené ve vodě, PCM a TCM jsou uvedeny na Obrázek 2. [1-3]



Obrázek 2: Objem materiálu potřebného pro roční spotřebu průměrné domácnosti se spotřebou 6,7 GJ/rok [1]

1. Teoretická část

1.1. Akumulace tepla

Výzkumníci hledají nové a obnovitelné zdroje energie pro snížení emisí CO₂ ze spalování fosilních paliv, zejména pro aplikace při nízkých teplotách. Například sluneční energie má obrovský potenciál pro vytápění budov, ohřívání užitkové vody pro domácí a průmyslové účely, ohřev skleníků pro zemědělské plodiny, atd. Nicméně solární energie je přerušovaná, velmi nepředvídatelná a je k dispozici pouze během dne. Proto její využití vyžaduje efektivní skladování tepelné energie, aby přebytečné teplo shromážděné během dne bylo uloženo pro pozdější použití během noci.

Podobné problémy řeší systémy rekuperace tepla, kde se odpadní teplo nemusí využívat ihned, proto také vyžaduje určité ukládání tepelné energie. Při skladování tepelné energie, se užitečná energie z kolektoru přenáší do paměťového media, kde se přemění na vnitřní energii.[4]

Existují různé způsoby uchovávání energie. V tomto seznamu jsou uvedeny jak komerční tak nekomerční způsoby uchování různého typu energií mezi které patří i uchování pomocí fázové změny. [5, 6]

1. Mechanický způsob
 - a. Stlačený vzduch (CAES)
 - b. Parní kotle
 - c. Setrvačníky (Flywheel)
 - d. Potenciální energie (zařízení)
 - e. Hydroakumulátory
 - f. Tekutý dusík
 - g. Přečerpávací vodní elektrárna
2. Elektrický způsob
 - a. Kondenzátory
 - b. Soustava magnetů k ukládání energie (MSP)
 - c. Biologicky
 - d. Glykogen
 - e. Škrob
3. Elektrochemický způsob
 - a. Flow baterie
 - b. Dobíjecí baterie
 - c. Superkapacitor
 - d. UltraBaterie

4. Tepelný způsob
 - a. Skladování „Brick“ ohřivač
 - b. Kryogenní kapalný vzduch nebo dusík
 - c. Eutektikum
 - d. Skladování ledu (klimatizace)
 - e. Roztavené soli
 - f. Materiály s fázovou změnou (PCM)
 - g. Sezónní skladování tepelné energie
 - h. Solární rybníky
 - i. Parní akumulátor
 - j. Tepelná akumulace energie (obecně)
5. Využití chemikálií
 - a. Biopaliva
 - b. Hydratované soli
 - c. Vodík
 - d. Peroxid vodíku
 - e. Syntéza metanu (SNG)
 - f. Oxid vanadičný

V této práci se dále budu zabývat uchováváním tepelné energie, konkrétně uchováváním pomocí látek s fázovou změnou. [5, 6]

1.1.1. Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C objektu je konstanta úměrnosti mezi teplem Q , které objekt pohlcuje nebo ztrácí při určité změně teploty ΔT objektu.

$$Q = C \cdot \Delta T = C \cdot (T_k - T_p) \quad (1)$$

V této souvislosti je slovo "kapacita" zavádějící, ve srovnání s objemem vody v kbelíku a jeho kapacitou k tomuto mediu, je tato analogie nesprávná, a neměli bychom myslet na objekt, který "obsahuje" teplo nebo je omezen ve své schopnosti absorbovat teplo. Přenos tepla může probíhat bez omezení, pokud je dosaženo potřebného teplotního rozdílu. Objekt může samozřejmě tát nebo se odpařovat v průběhu procesu.

Dva předměty vyrobené ze stejného materiálu budou mít tepelné kapacity úměrné jejich hmotnosti. Proto je vhodné definovat tepelnou kapacitu na jednotku hmotnosti m neboli měrnou tepelnou kapacitu (c), která se nevztahuje na objekt, ale na jednotku hmotnosti materiálu, kterým je objekt tvořen. Rovnici 1 pak lze upravit:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = c \cdot m \cdot (T_k - T_p) \quad (2)$$

V mnoha případech je nejvhodnější pro určení množství látky mol kde:

$$1 \text{ mol} = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ základních jednotek}$$

jakékoli látky. Proto 1 mol hliníku znamená $6,023 \cdot 10^{23}$ atomů (atom je základní jednotka) a 1 mol oxidu hlinitého znamená $6,023 \cdot 10^{23}$ molekul (molekula je základní jednotka sloučeniny). Jsou-li množství vyjádřené v molech, měrná tepla musí rovněž zahrnovat moly (častěji než jednotku hmotnosti); tyto zápisy jsou pak nazývány molární měrné tepelné kapacity (c_m).

Tabulka 1 ukazuje hodnoty různých vyjádření tepelných kapacit pro některé základní prvky při pokojové teplotě. [6-8]

Tabulka 1: Kapacita některých prvků [9]

Prvky	Měrná tepelná kapacita		Molární měrná tepelná kapacita
	cal/g·K	J/kg·K	J/mol·K
Olovo	0,0305	128	26,5
Wolfram	0,0321	134	24,8
Stříbro	0,0564	236	25,5
Měď	0,0923	386	24,5
Hliník	0,215	900	24,4

1.1.2. Akumulace citelného tepla

V systémech pro akumulaci citelného tepla (ACT) je energie uložena nebo získávána při ohřevu nebo chlazení kapaliny nebo pevné látky, během tohoto procesu se nemění fáze dané látky. Pro uchování citelného tepla může být použito velké množství látek, mezi které patří kapaliny jako voda, oleje a anorganické roztavené soli nebo pevné látky jako kameny, oblázky a žáruvzdorné cihly.

V případě pevných látek je materiál vždy porézní a teplo je uloženo prouděním kapaliny skrz jeho póry nebo dutiny. Volba použité látky do značné míry závisí na pracovní teplotě přístroje nebo prostředí, například voda se používá pro teploty nižší než 100 °C a žáruvzdorné cihly při teplotách kolem 1000 °C.

Systémy pro akumulaci citelného tepla jsou jednoduché, ale zato velké a z tohoto důvodu je důležitým kritériem při výběru materiálu tepelná kapacita pro uchování citelného tepla. Druhá velká nevýhoda spojená s citelným teplem je, že systémy nemohou skladovat nebo dodávat energii při konstantní teplotě.

Náročnost uchování tepelné energie je charakterizováno úložnou kapacitou, tepelným příjmem a výdejem při nabíjení a vybíjení a efektivitou úložiště. Skladovací kapacita citelného tepla s pevným nebo kapalným médiem o hustotě ρ je dána vztahem:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (3)$$

Tento výraz může být použit k výpočtu hmotnosti a objemu úložného materiálu potřebného k uložení určitého množství energie. Pro náplňovou vrstvu používaného materiálu pro skladování energie je třeba vzít v úvahu pórovitost lože a zanedbat tepelnou kapacitu transportního média přivádějícího teplo do zásobníku s náplňovým ložem o pórovitosti lože ε : [6-8]

$$V = \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \Delta T} \quad (4)$$

Hustota skladování energie na jednotku hmotnosti je definována jako:

$$q = \frac{Q}{m} = c \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (5)$$

kde T_{max} je maximální možná teplota skladovaného média a T_{min} je minimální teplota skladování pod kterou by došlo k uvolnění energie a hustota akumulace energie na jednotku objemu:

$$q_V = \frac{Q}{V} = \rho \cdot c \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (6)$$

1.1.3. Akumulace latentního tepla

Latentní teplo se uchovává odlišným mechanismem oproti citelnému a to fázovou transformací bez změny chemického složení. Přičemž skladovací kapacita materiálu s fázovou změnou je dána jak příspěvkem změny tepelné kapacity s teplotou tak teplem spojeným s fázovou změnou:

$$Q = m \cdot c_m \cdot \Delta H_m + \int_i^m m \cdot C_p \cdot dt + \int_m^f m \cdot C_p \cdot dt \quad (7)$$

$$Q = m \cdot [c_m \cdot \Delta H_m + C_{sp}(t_m - T_i) + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (8)$$

Kde c_m je měrná tepelná kapacita tání, ΔH_m entalpie tání, C_p tepelná kapacita za konstantního tlaku, C_{sp} tepelná kapacita za konstantního tlaku pro pevnou látku, C_{lp} tepelná kapacita za konstantního tlaku pro kapalinu a $T_{i,f}$ teplota ve zvoleném bodě i, f.

Systémy pro uchovávání tepelné energie mají určité výhody ve srovnání s ACT systémy. Nejdůležitější je vyšší hustota energie na jednotku hmotnosti i objemu.

Termo-chemické systémy energii absorbují přerušováním nebo přeskupováním vazeb v molekule, a to zcela vratnou chemickou reakcí. Proto akumulované teplo závisí na množství akumulčního materiálu a rozsahu přeměny.

$$Q = c_r \cdot m \cdot \Delta H_r \quad (9)$$

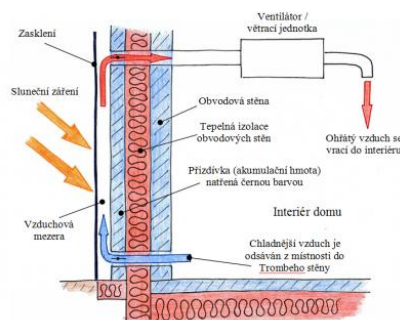
Kde c_r měrná tepelná kapacita reakce a ΔH_r entalpie reakce.

Akumulace latentního tepla je zvláště atraktivní pro svou schopnost uchovat velké množství energie na jednotku hmotnosti nebo objemu a jeho charakteristickou teplotu při ukládání tepla odpovídající fázovému přechodu látky.

Uchování latentního tepla může být dosaženo prostřednictvím fázových změn jako tuhá látka-kapalin, kapalina-plyn, pevná látka-plyn a transformace v pevné fázi - pouze dvě z těchto změn mají praktický význam - jsou to pevná látka-kapalina a transformace v pevné fázi [6]. Při transformaci pevná látka-plyn a kapalina-plyn je skupenské teplo vyšší, ale tato změna je v praxi nepoužitelná kvůli velké objemové změně. [10,11]

Transformace v pevné fázi je dosaženo, když materiál přechází z jednoho krystalického uspořádání do druhého. Tento proces má obecně menší latentní teplo i objemové změny než přechod mezi tuhou látkou a kapalinou. Tuhé materiály s fázovou změnou nejsou náročné na kontejnery (problém s korozí pro anorganické látky) pro uchování a jsou flexibilnější při navrhování zařízení. Slibné materiály jsou většinou organické pevné roztoky pentaerythritolu (teplota tání 188 °C, skupenské teplo tání 323 KJ/kg), pentaglycerine (bod tání 81 °C, skupenské teplo tání 216 KJ/kg), Li_2SO_4 (teplota tání 578 °C, skupenské teplo tání 214 KJ/kg) a KHF_2 (teplota tání 196 °C, skupenské teplo transformace 135 KJ/kg). [10, 11]

Trombeho stěna by s těmito materiály poskytovala daleko lepší vlastnosti než z betonu. Trombeho solární stěna je jednoduché zařízení pro přitápění domu slunečním zářením. Trombeho stěna v moderním provedení pak funguje jako vzduchový akumulční kolektor (Obrázek 3). [12]

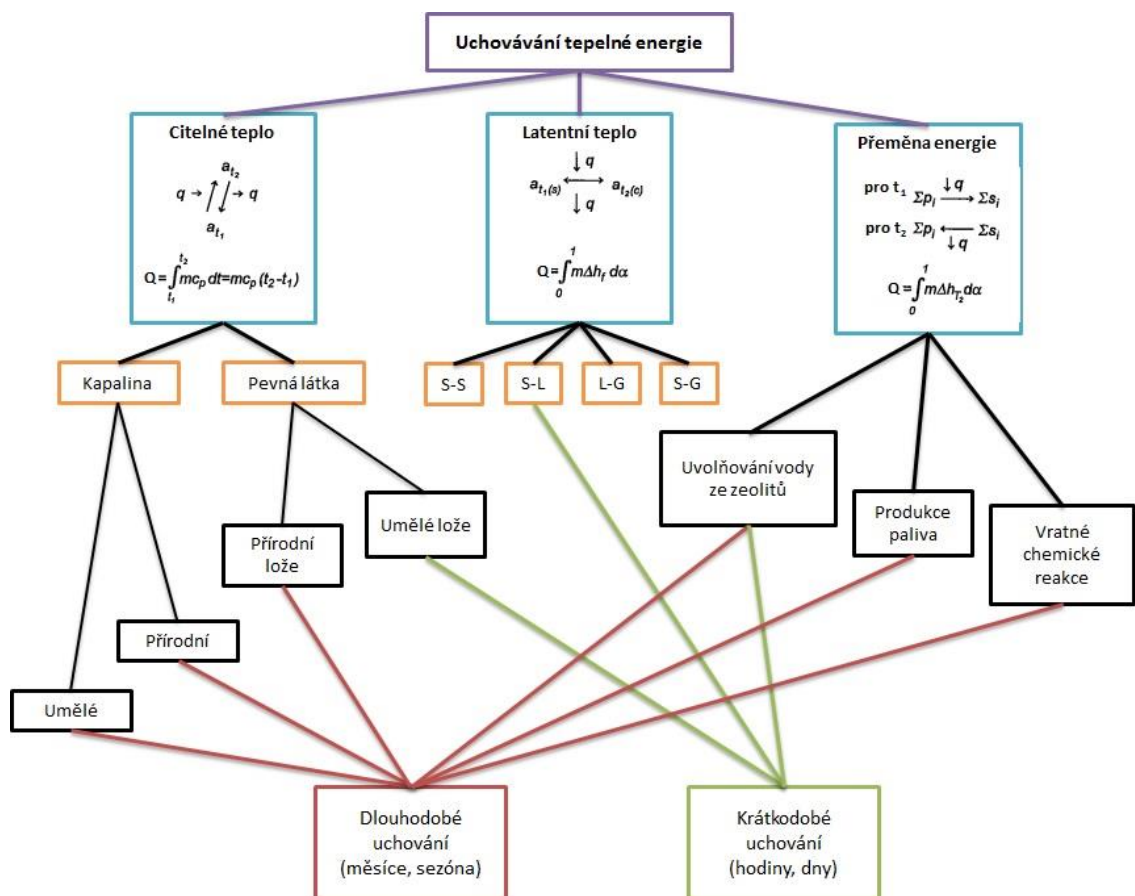


Obrázek 3: Trombeho stěna pro moderní domy[12]

Transformace mezi pevnou látkou a kapalinou mají menší skupenské teplo než mezi kapalinou a plynem. Nicméně tyto transformace zahrnují jen malou změnu v objemu (<10%). Tání a krystalizace se ukázaly být ekonomicky atraktivní pro systémy uchovávající tepelnou energii. Materiál s fázovou změnou nemůže sám o sobě sloužit jako teplonosné médium. Teplosměnné médium a výměník tepla slouží k přenosu energie mezi PCM a zdrojem tepla a mezi PCM a místem využití tepla. Z tohoto důvodu při projektování systému pro uchování tepla je nezbytné myslet na výměník tepla a dopravní médium. Dále materiály s fázovou změnou při tání zvětšují svůj objem, proto je nezbytné počítat s touto změnou při konstrukci. Proto při konstrukci každého systému pro uchování latentního tepla musíme volit [10,11]:

- vhodný materiál s fázovou změnou s bodem tání v požadovaném teplotním rozsahu
- vhodnou teplosměnnou plochu
- vhodnou nádobu kompatibilní (odolávající) s materiálem s fázovou změnou

Uchování tepelné energie lze rozdělit podle druhu uchované energie do tří základních skupin uchování citelného a latentního tepla nebo přeměna tepla na energii viz. Obrázek 4.



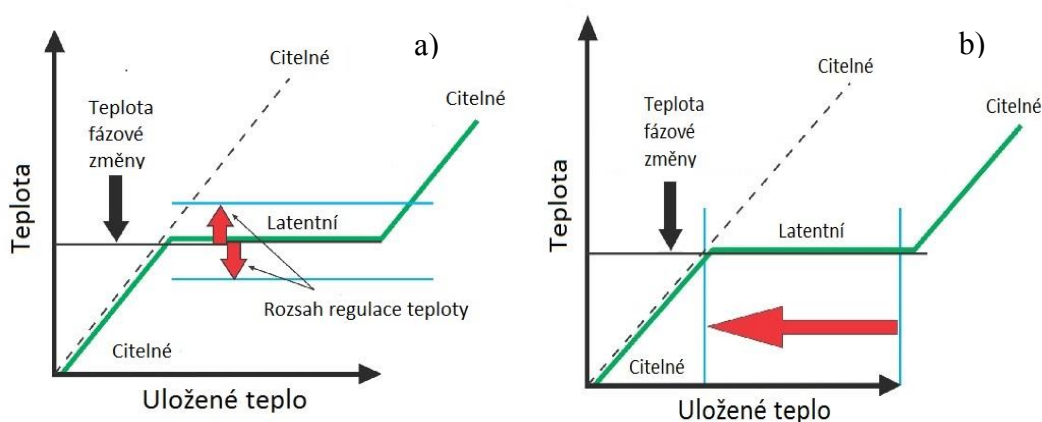
• Obrázek 4: Dělení způsobu uchování tepelné energie [13]

1.2. Materiály s fázovou změnou – PCMs

Jednou z nevýhod moderních lehkých konstrukcí je nedostatek hmoty schopné udržet teplo - v takovémto objektu bude v létě docházet k přehřátí a v zimě nebude schopen udržet teplo. Často se zavádějí topné a chladicí systémy pro udržování teploty v komfortní zóně, avšak je možné vynahradit tepelné vlastnosti budov pomocí materiálu s fázovou změnou.

Ukládáním tepelné energie pomocí PCM je možné dosáhnout uchování velkého množství energie. Systém je závislý na změně fáze látky. Procesy jako je tání a tuhnutí vyžadují velké množství energie. Tudiž teplo se absorbuje nebo uvolní, když dojde ke změně z pevného do kapalného stavu a naopak. Díky tomuto jevu lze snadno a předvídatelně měnit fáze materiálů a měřit vstupní energii, kterou materiál uvolní v pozdější době. [14]

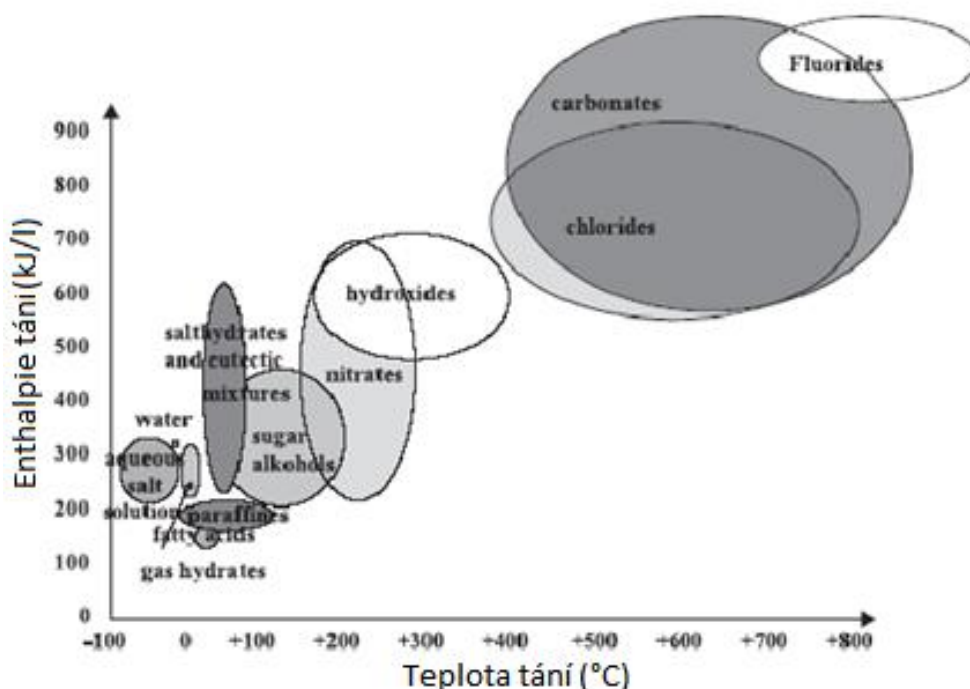
Pokud se materiál taví, nebo odpařuje viz. Obrázek 5 a), absorbuje teplo, naopak když se mění v pevný (krystalizace) nebo kapalný (kondenzace) uvolňuje teplo. Tyto děje jsou podstatou PCMs. Typickými PCMs jsou voda/led, hydráty solí a určité polymery. Teplota se během fázové změny nemění. Obrázek 5 b) zobrazuje PCM, který je schopen uchovat velké množství tepla či chladu při malé změně teploty.



Obrázek 5: Změna teploty materiálu s fázovou změnou s množstvím uloženého tepla [15]

1.2.1. Základní dělení PCMů

Zdaleka nejznámější PCM je voda. Vyskytuje se v přírodě a byla použita pro chladírenské skladování po dobu více než 2000 let. Obrázek 6 ukazuje typický rozsah entalpie tání při odpovídající teplotě pro nejslibnější třídy materiálů, které lze použít jako PCM. [8]



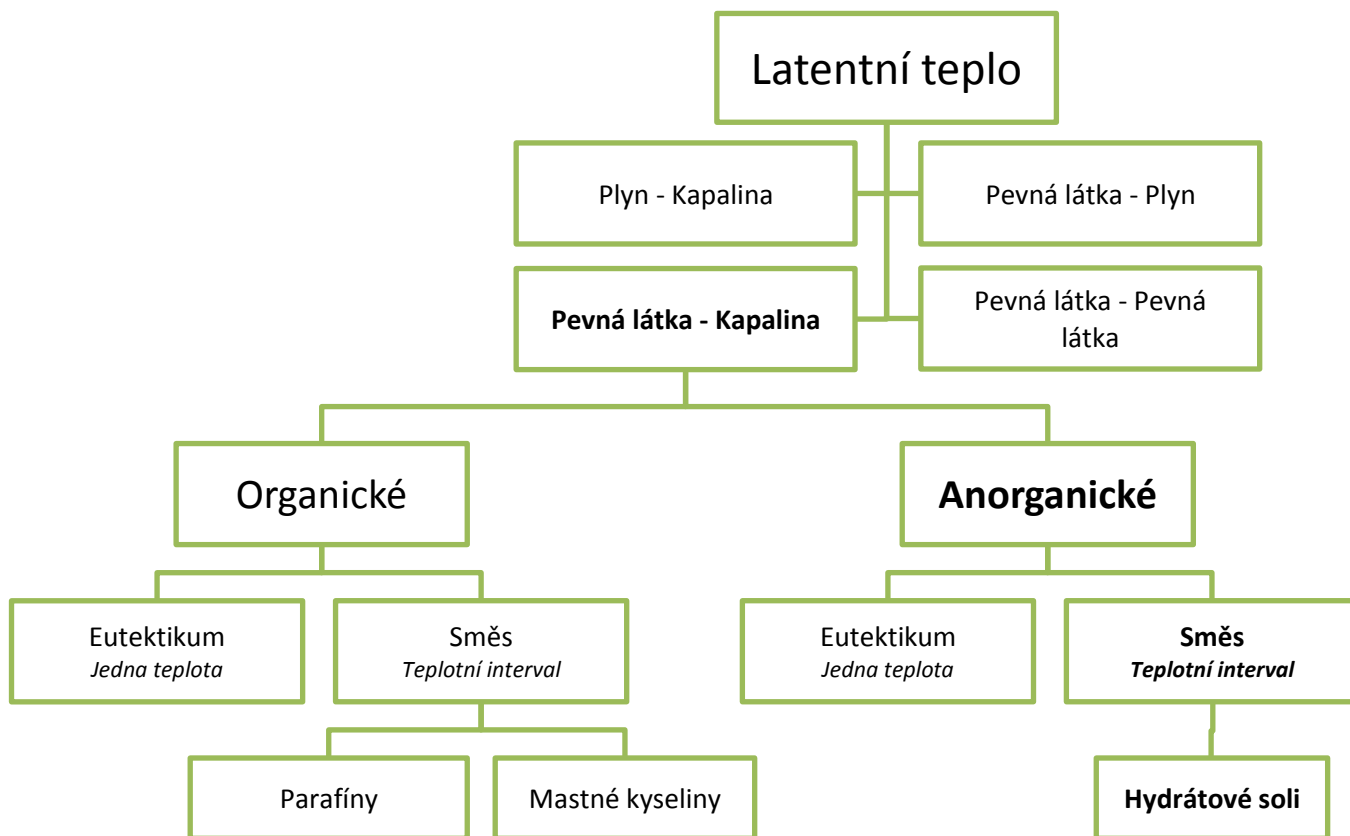
Obrázek 6: Závislost entalpie tání na teplotě tání pro materiály s fázovou změnou [8]

Hydráty solí jsou nejdůležitější skupinou PCMů, díky této skutečnosti jsou hydrátové soli intenzivně studovány pro jejich schopnost uchovávat latentní teplo. Nejatraktivnějšími vlastnostmi jsou:

1. Velké skupenské latentní teplo na jednotku objemu
2. Relativně vysoká tepelná vodivost (téměř dvojnásobek oproti parafínům)
3. Drobné objemové změny při tání
4. Jsou jen málo žíravé, mírně toxické a nepoškozují plasty
5. Mnoho hydrátů je velmi levných pro uchovávání tepelné energie

Látky schopné uchovávat latentní teplo se dále dělí podle změny fáze, ke které dochází při akumulaci tepla. V této práci se zabývám fázovou změnou pevná látka – kapalina.

Obrázek 8 proto ukazuje pouze tuto skupinu látek. Jak je vidět na obrázku, organické látky můžeme dělit na sloučeniny s parafíny a na sloučeniny bez parafínů. Velkou výhodou těchto sloučenin je jejich vlastní nukleace. Díky této vlastnosti téměř nedochází k problémům s podchlazováním.



Obrázek 7: Dělení látek uchovávajících latentní teplo [16]

1.3. Charakterizace PCMs

U PCM je třeba stanovit jeho charakteristické hodnoty, jako jsou jeho změna entalpie fázové změny, teploty tání, chování látky po několika cyklech (chlazení – ohřev) zejména s ohledem na podchlazení a fázovou separaci, chování látky v objemu, vliv na látku po přidání určitých nukleačních činidel a další. K tomuto stanovení nám slouží metody jako diferenční skenovací kalorimetrie, termogravimetrie, rentgenové prášková difrakce, zahřívání v objemu.

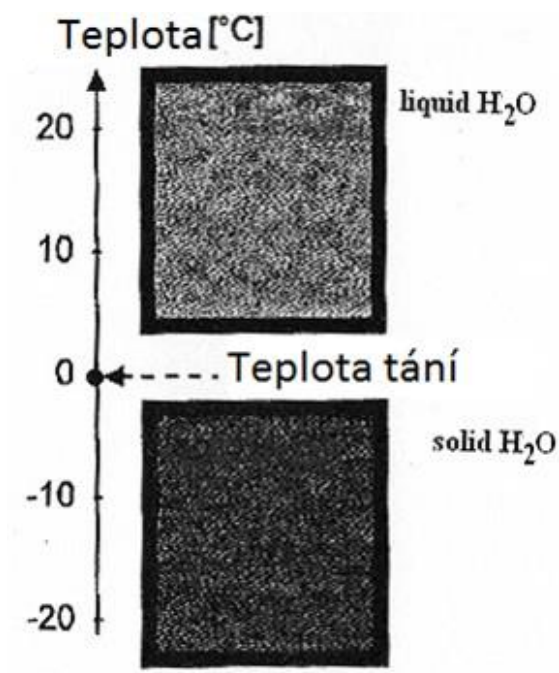
1.3.1. Základní vlastnosti PCMs

Pro praktické aplikace materiálů s fázovou změnou a jejich efektivní využití k uchování tepla je důležitá celá řada vlastností. Mezi základní charakteristiky patří termodynamické a kinetické vlastnosti spojené s fázovou změnou, dále pak základní chemické vlastnosti a neméně důležité jsou také ekonomické aspekty. Stručný přehled těchto vlastností zahrnuje [17]:

- 1) Termodynamické vlastnosti
 - a) Teplota tání v požadovaném rozsahu provozních teplot
 - b) Velké skupenské teplo tání na jednotku objemu
 - c) Velké měrné teplo, vysoká hustota a vysoká tepelná vodivost
 - d) Malé objemové změny fázové přeměny a malý tlak par při provozní teplotě ke snížení všech rizik
 - e) Shodné tání
- 2) Kinetické vlastnosti
 - a) Velká nukleační rychlost, aby nedošlo k podchlazení kapalné fáze
 - b) Velká rychlost růstu krystalů, takže systém může splnit požadavky na obnovu tepla z úložného systému
- 3) Chemické vlastnosti
 - a) Chemická stabilita
 - b) Zcela reverzibilní cyklus tuhnutí/tání
 - c) Bez degradace po velkém počtu cyklů
 - d) Nežiravé, netoxické, nehořlavé a nevýbušné materiály
- 4) Ekonomické vlastnosti
 - a) Nízké náklady
 - b) Snadná dostupnost

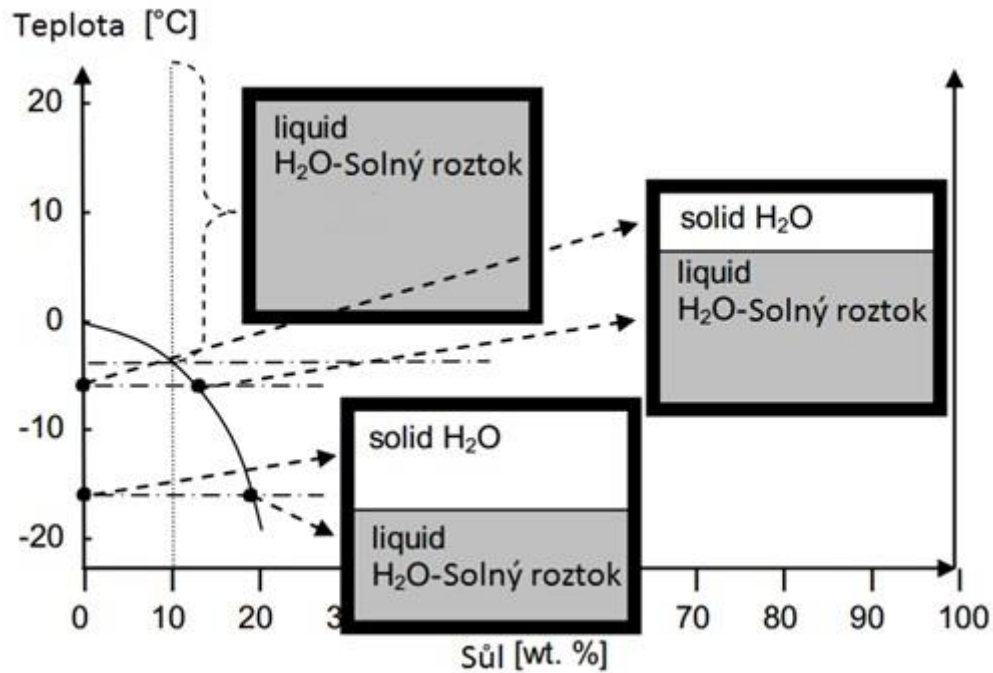
1.3.2. Separace fází

Pokud má čistá látka pouze jednu složku, například voda, po zahřátí nad teplotu tání látka roztaje a bude mít totéž homogenní složení v kapalině, jako předtím v pevné látce, viz. Obrázek 8. Takovou látku můžeme nazývat homogenní.



Obrázek 8: Skupenství vody v závislosti na teplotě [18]

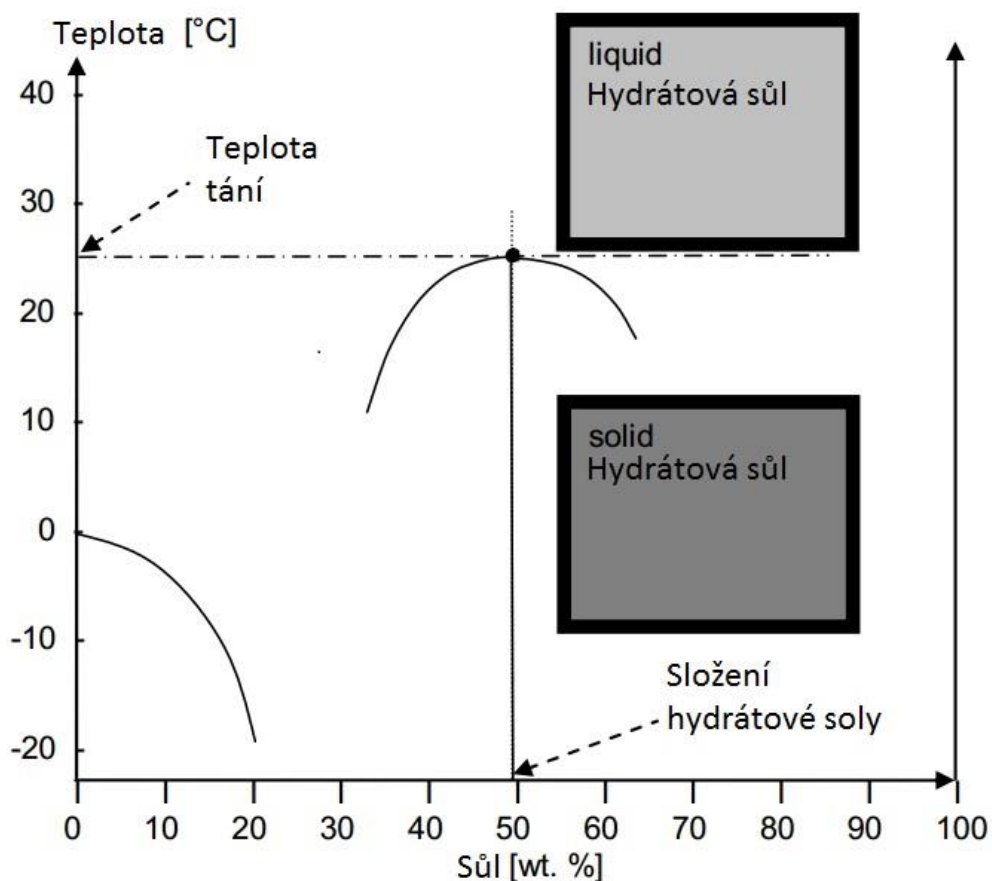
Pokud je látka složena ze dvou nebo více složek dochází k rozšíření fázového diagramu. Například v případě vodného roztoku solanky pro sůl musíme do diagramu přidat další osu, která určuje hmotnostní zlomek. [18].



Obrázek 9: Fázový diagram závislosti teploty na hmotnostním zlomku soli, v heterogenní oblasti dochází k separaci fází [18].

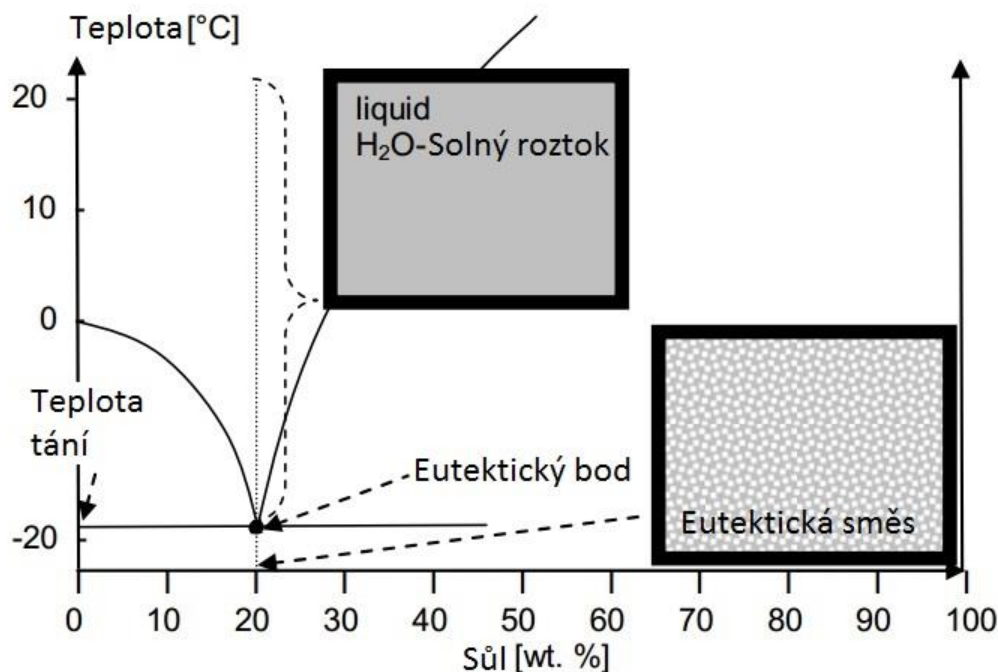
Dvousložkový systému 10% soli a 90% vody je při teplotě nad -4°C homogenní roztok, ale při ochlazování pod tuto teplotu se začne dělit na dvě fáze, viz. Obrázek 9, vodnou fází, která se bude měnit na pevnou a kapalnou fází, v níž se bude zvyšovat koncentrace soli. Díky tomuto jevu, který zaručí rozdílné hustoty a gravitaci, dojde k separaci fází. Pokud se teplota bude dále snižovat, bude docházet k tuhnutí dalšího podílu vody a koncentrace soli, ve zbývajícím roztoku se bude zvyšovat jak je tomu na obrázku. Teplota tuhnutí je závislá i na počátečním složení roztoku.

Další energeticky stabilní jsou hydráty, které se při striktně daném složení $S\ddot{u}l \cdot n H_2O$ budou chovat jako látky s pouze jednou fází a nedojde k žádnému rozdělení na zamrzlou vodu a sůl. Na Obrázek 10 je složení 50% soli a 50% vody a dochází k tuhnutí či tání celého hydrátu. [18].



Obrázek 10: Fázový diagram závislosti teploty na hmotnostním zlomku soli, kdy nedochází k separaci fází [18].

Když se křivky tání vody s přidavkem soli a hydratované soli s menším obsahem vody protnou v bodě, tento bod nazýváme eutektickým, viz Obrázek 11. V eutektickém bodě přechází kapalina na pevnou látku, která se skládá ze dvou nebo více pevných fází s jiným složením, nicméně složení je stále stejné jako v kapalině. [18].

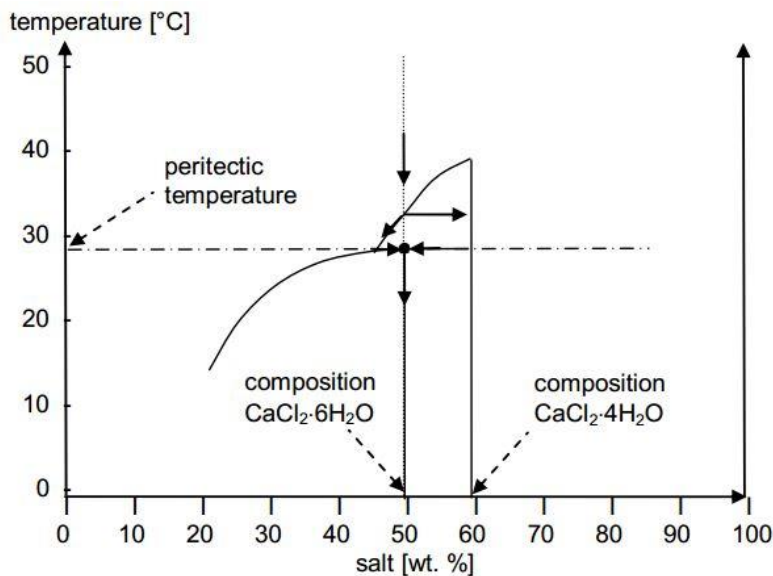


Obrázek 11: Fázový diagram závislosti teploty na hmotnostním zlomku soli - eutektická směs [18].

Eutektické směsi jsou směsi dvou nebo více složek, které tuhnou současně v minimu bodu tuhnutí, který se také nazývá eutektický bod. V eutektickém bodě, se kapalina přeměňuje na pevnou látku, která se skládá ze dvou nebo více dalších pevných fází s různým složením, ale celková kompozice je stále stejná jako v kapalině. Z tohoto důvodu eutektické směsi nevykazují známky separace fází. A právě proto lze slanou vodu použít jako PCM (Obrázek 11). Pokud nastane podchlazení, může dojít k separaci fází, nicméně toto není obvyklé.

Ne vždy však mohou být hydratované soli popsány fázovým diagramem, který je uveden na Obrázek 11. Hydráty solí se mohou často vyskytovat s různými počty molů H_2O , což může způsobit překrytí křivek tání. Celý fázový diagram je poté pozměněn a odlišovat se mohou i vlastnosti látky během jejího tání.

Příkladem je $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, který taje z poloviny shodně. Podle schematického znázornění na fázovém diagramu Obrázek 12, $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ má složení asi 50% hmot. $CaCl_2$ a 50% hmot. vody. Ochlazení kapaliny z tohoto složení je vyznačeno šipkami. Je-li kapalina ochlazená, pevný $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ se netvoří přímo, místo toho jsou vytvořeny dvě fáze - pevná má složení $CaCl_2 \cdot 4H_2O$ a kapalná s vyšším obsahem vody než $CaCl_2 \cdot 6H_2O$. Důvodem tohoto chování je, že křivka kapalného $CaCl_2 \cdot 4H_2O$ prolíná jednu z křivek $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ v nižších koncentracích soli. [18].

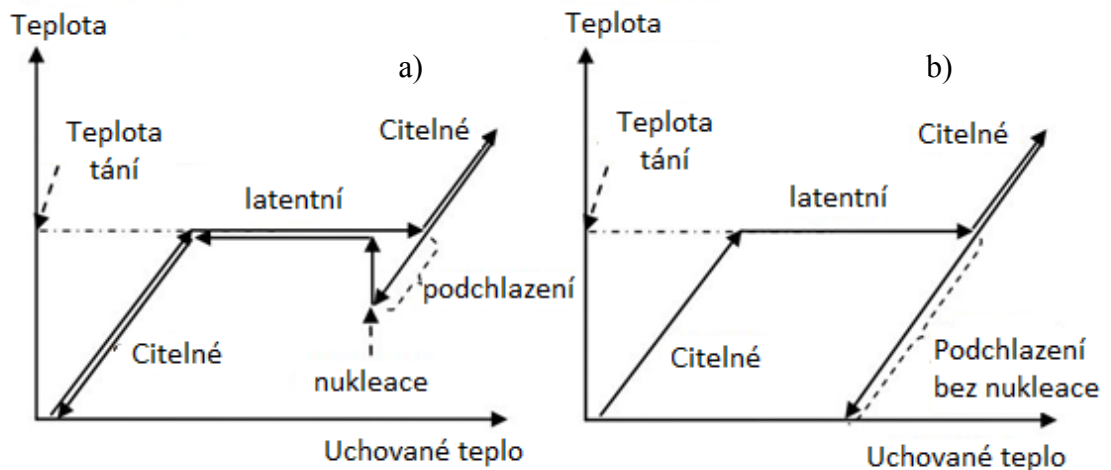


Obrázek 12: Fázový diagram závislosti teploty na hmotnostním zlomku soli s podchlazením hydrátu CaCl₂ [18].

Po dosažení teploty asi 28 ° C, pevná látka $CaCl_2 \cdot 4H_2O$ a kapalný roztok soli reagují za konstantní teploty na jednu pevnou fázi $CaCl_2 \cdot 6H_2O$. Tato transformace z pevné látky a kapaliny na pevnou látku se nazývá peritektická přeměna, na rozdíl od eutektické transformace, kde se kapalina dělí na dvě nebo více pevných fází. Odpovídající teplota peritektické transformace se nazývá peritektická teplota. Při zpětném přechodu $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ se látka ohřívá nad peritektickou teplotu, nejprve se opět vytvoří pevný $CaCl_2 \cdot 4H_2O$ a kapalný roztok soli a až několik stupňů nad peritektickou teplotou začne opět vznikat homogenní kapalina. Problém peritektické transformace je, že v mezistupni vznikají fáze s různou hustotou. V tomto případě pevná fáze $CaCl_2 \cdot 4H_2O$ klesá dolů. Pokud se chlazení provádí pomalu, mohou vznikat různé fáze a znovu dochází k separaci. Je-li chlazení prováděno dostatečně rychle nebo v případě, že makroskopickému oddělení těchto dvou fází je zabráněno separaci fází, pevná látka $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ se může tvořit opět z kapaliny a dojde k uvolnění entalpie fázové změny. [18].

1.3.3. Podchlazení PCMs

Mnoho materiálů s fázovou změnou netuhne bezprostředně po ochlazení těsně pod teplotu tání, ale krystalizace začíná až výrazně pod teplotou tání. Tento efekt se nazývá podchlazení. Nejběžnějším příkladem je voda, která může být ochlazená na teploty pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; v případě vysoce čisté vody a v malém množství i pod $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obrázek 13 ukazuje vliv podchlazení na akumulaci tepla.



Obrázek 13: Vliv podchlazení na akumulaci tepla: a) s malým podchlazením a nukleací; b) velké podchlazení bez nukleace [18]

Během ohřevu a uchování tepla není rozhodující, zda PCM vykazuje podchlazení nebo ne. Při uvolňování tepla je však podchlazení rozhodující, jelikož se latentní teplo neuvolní, dokud není podchlazení překonáno. Účinek podchlazení se dá překonat snížením teploty na teplotu výrazně nižší než je teplota fázové změny, aby mohla začít krystalizace a uvolnit se latentní teplo uložené v materiálu. Pokud nukleace nenastane vůbec, latentní teplo se z materiálu neuvolní a materiál ukládá pouze citelné teplo. V technických aplikacích PCM je proto podchlazení vážný problém. Zvláště v případě, kdy chceme využít PCM k udržení přesné teploty. [19]

Nejběžnější postup jak se zbavit podchlazení u PCM je přidat zvláštní přísadu (nukleační činidlo), a tak vyvolat heterogenní nukleaci. Nukleační činidla byla vyvinuta pro většinu nejpoužívanějších PCM a snižují podchlazení nejčastěji o několik K.

Většina nukleačních činidel jsou materiály s podobnou krystalickou strukturou jako pevné PCM, což umožňuje pevné fázi PCM růst na stejném povrchu. V případě použití nukleačních činidel je důležité, aby měly vyšší teplotu tání než PCM. Avšak problémem je, že obvykle podobná krystalová struktura má také podobnou teplotu tání. Z tohoto důvodu je mnoho nukleačních činidel stabilních pouze 10 K až 20 K nad teplotu tání PCM. K dispozici jsou také další nukleační činidla, kde jsou mechanismy zcela neznámé. A právě tato skutečnost, že stále neexistuje spolehlivá teorie, způsobuje hledání nového nukleačního činidla časově náročným. [19]

1.3.1. Princip rentgenové difrakční analýzy

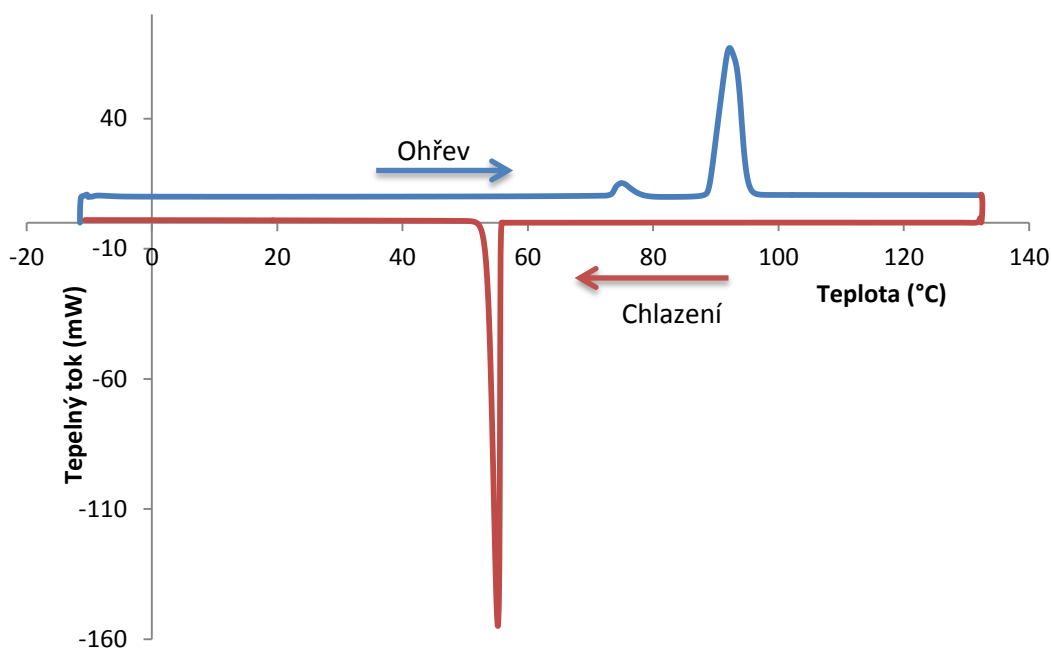
Při rentgenové analýze dochází k interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bez fotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. [20] Ze změřeného úhlu lze vypočítat vzdálenost mřížkových rovin krystalu dosazením vlnové délky prošlého rentgenového záření do Braggovy rovnice. Z hodnoty mřížkových vzdáleností se vypočítá délka hran základní buňky, tj. mřížková konstanta, která charakterizuje krystalovou soustavou [21]

$$2d_{hkl} \sin \vartheta = n \cdot \lambda$$

kde d je mezivětrinná vzdálenost, ϑ difrakční úhel (Braggův úhel), n je reflexe, λ je vlnová délka a hkl jsou Millerovi indexy.

1.3.2. Diferenční skenovací kalorimetr

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je technika, která v sobě spojuje jednoduchost měření ohřevu a chlazení jak je zobrazeno viz. Obrázek 14 s kvantitativními znaky kalorimetru. Teplota se měří nepřetržitě a difference se uplatňuje k vyrovnání tepelného toku vzorku a pro vyrovnání tepelných zisků a ztrát mezi referencí a vzorkem.

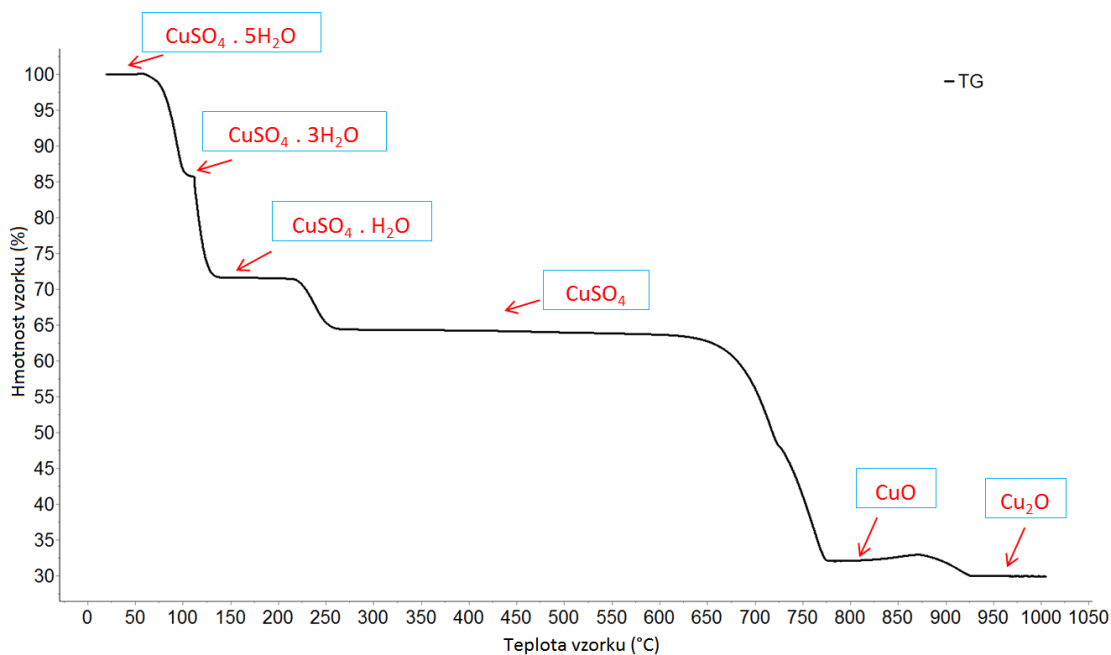


Obrázek 14: Teplotní cyklus DSC - ohřev a chlazení

Výstupním signálem je tepelný tok v závislosti na teplotě. Teplota tání či krystalizace se stanovuje jako onset jednotlivých píků. Lze určit také změnu entalpie pomocí plochy pod píkem ve srovnání se standardy. Z píků lze dále odečíst charakteristické teploty jako je začátek či konec děje nebo jeho maximum Tento typ zařízení se dá použít také ke stanovení tepelné kapacity.[22-23]

1.3.3. Termogravimetrie

Termogravimetrie (TG) je základní metoda termické analýzy, studuje změny hmotnosti, které probíhají v měřeném systému v závislosti na teplotě. Výsledkem je termogravimetrická křivka, která znázorňuje závislost hmotnosti na teplotě nebo na čase, (Obrázek 15: TG křivka modré skalice) lze z ní odečíst teploty a množství hmotnostních změn. [24]



Obrázek 15: TG křivka modré skalice [25]

Přístroje pro TG se skládají z elektrické pece, analytických vah, nosičů vzorků, zařízení pro měření a řízení teploty a registračního zařízení - počítače. Vlastní termogravimetrická analýza probíhá na termovahách. Měřený vzorek je v kelímku umístěném na termočlátku, který snímá aktuální teplotu. Materiálem kelímku je nejčastěji platina, korund popř. oxidová keramika (ZrO_2 apod.). Vždy je potřeba zvážit oblast stability materiálu nosiče.

Termogravimetrickou analýzu ovlivňuje řada faktorů, které je nutné před spuštěním experimentu zvážit. Volba těchto parametrů má zásadní vliv na výsledek analýzy resp. na tvar TG- křivky. Jde o [26]:

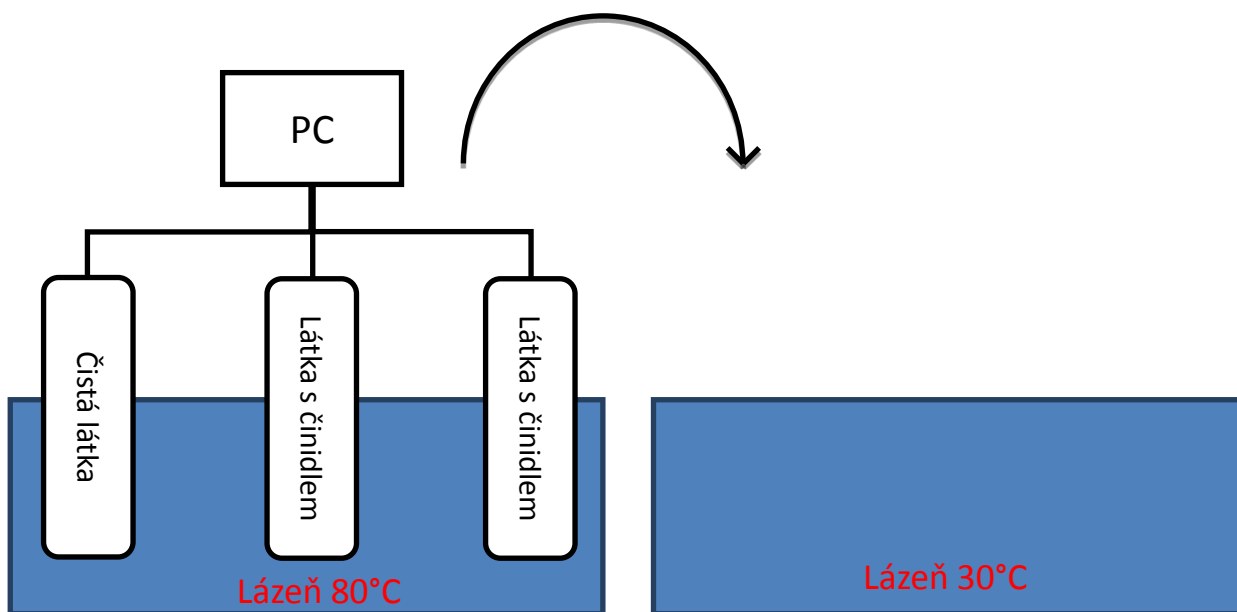
- přípravu vzorku (navážka, velikost částic, homogenita, napěchování vzorku),
- tvar a velikost nosiče (kelímku),
- pecní atmosféra,
- pecní tlak a vlhkost,
- teplotní režim.

1.3.4. Objemové T-cykly

Kromě termoanalytických zařízení lze schopnost látky vratně akumulovat teplo testovat také pomocí jednoduchého postupu – látky umístíme do nádoby s termočlánkem a sledujeme teplotní odezvu během nabíjení a vybíjení. Látky se ve větším objemu (gramy, kilogramy) mohou chovat jinak než v malém kelímku (např. 10 mg pro DSC měření). V takovémto objemu může docházet k separaci fází, dochází k postupnému snižování tepla, látka nemusí znovu vázat vodu, může docházet k separaci díky špatné smáčivosti činidla, apod.

Vybavením pro tuto charakterizaci jsou obvykle skleněné nádoby s teplotními čidly a počítačem pro záznam hodnot. Teplotní čidlo je umístěno uprostřed měřené látky a postupným vkládáním do lázní o různých teplotách, Obrázek 16: Schéma průběhu stanovení, lze získat křivku vybíjení/nabíjení látky v celém jejím objemu.

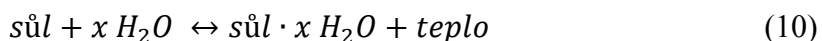
Po takto provedených cyklech je na látce vidět, zda došlo k separaci fází nebo zůstala slinutá se svým činidlem, případně můžeme odebírat části vzorku a analyzovat jejich složení.



Obrázek 16: Schéma průběhu stanovení pro objemové T - cykly

1.4. Vlastnosti hydrátů anorganických solí

Nejčastěji používané PCM jsou hydráty solí, ve kterých je tepelná energie skladována pomocí hydrátové vody. Reverzibilním dějem hydratací nebo dehydratací se energie z hydrátu uvolní nebo spotřebuje, děj lze popsat rovnicí:



Hydrátové soli mají minimální hustotu tepelné energie 1 GJ/m^3 (v závislosti na provozních podmínkách) a při skladování nedochází ke ztrátě tepla. Použitím hydrátů by byl skladovací objem $4 - 8 \text{ m}^3$ dostatečný pro zásobení průměrné domácnosti po dobu jednoho roku. Díky základním vlastnostem PCM se dá určit přesný objem, náklady a kapacita úložného systému. [27]

Tabulka 2: Vlastnosti některých materiálů s fázovou změnou při určitém počtu cyklů[28]

Materiál s fázovou změnou	Teplota tání (°C)	Latentní teplo (J/g)	Počet cyklů
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29,8	190,8	1000
	28	86	1000
	27	–	5650
	23,26	125,4	1000
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32,4	238	320
	32	–	–
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	111,5	155,11	5650
	110,8	138	500
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	–	–	1000
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 1/2\text{NaCl} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	20	–	5650
$\text{NaOH} \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$	15	–	5650
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	230	500
	58	252	100
$\text{CCl}_3\text{F} \cdot 17\text{H}_2\text{O}$	8,5	210	100

V Tabulka 2 jsou uvedeny hodnoty teploty tání a latentního tepla některých běžnějších čistých hydrátů po provedení cyklů (ohřev – chlazení).

V přílohách I – XXVII jsou seznamy stabilní i nestabilní hydrátů různých solí. Jsou zde uvedeny molární hmotnosti jednotlivých solí. Pro některé soli jsou zde i teploty tání, entalpie a tepelné kapacity.

V praxi se ale hojně využívají eutektické směsi s mnohem lepšími vlastnostmi jako je reprodukovatelnější teplota tání nebo stabilnější hodnota změny entalpie. Také tyto směsi bývají stabilní i po velkém množství cyklů. Příklad takovéhoto směsí je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3: Eutektické směsi různých látek pro zlepšení jejich vlastností po určitých cyklech[28]

Materiál s fázovou změnou	Teplota tání (°C)	Změna entalpie (J/g)	Počet cyklů
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (80 mol%) + $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (20 mol%)	20	117	1000
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (93 hm%) + $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (5 hm%) + $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (2 hm%)	24	125	1000
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (96 hm%) + KNO_3 (2 hm%) + KBr (2 hm%)	23	138	1000
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (96 hm%) + NH_4NO_3 (2 hm%) + NH_4Br (2 hm%)	20	141	1000
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (90 hm%) + $\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (10 hm%)	51	175	1000
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (85 hm%) + $\text{NaHCOO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (15 hm%)	49	170	1000
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (93 hm%) + $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (7 hm%)	78	152,4	1000

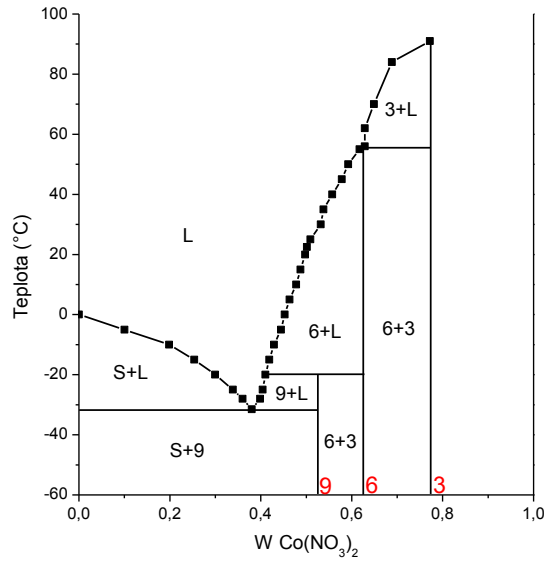
1.4.1. Vybrané hydráty

V této práci věnuji zvýšenou pozornost dusičnanům, zvláště pak dvěma hydrátům – hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého a hexahydrátu dusičnanu nikelnatého.

Některé důležité vlastnosti těchto hydrátů jsou uvedeny v Tabulka 4, kde je viditelná velká podobnost těchto hydrátů.

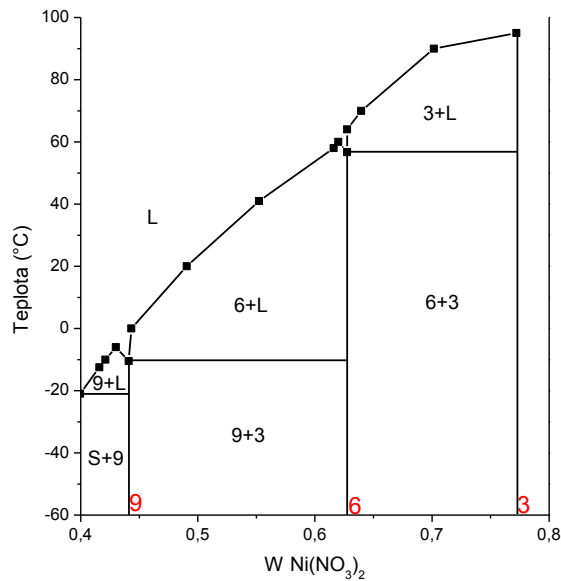
Tabulka 4: Vybrané vlastnosti dusičnanu kobaltnatého a dusičnanu nikelnatého [29]

Látka	$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
CAS #	10026-22-9	13478-00-7
Molární hmotnost	291,03 g/mol	290,81 g/mol
Vzhled	Červené krystaly	Zelené krystaly
Forma	Krystalická	Vločky
Hustota při 20°C	1,87 g/cm ³	2,05 g/cm ³
Teplota tání	55-56 °C	56,7 °C
Bezpeč. informace	Nebezpečný	Nebezpečný
Rozpustnost	133,8g/100g H ₂ O při 0°C	238g/100g H ₂ O při 20°C
Stabilita	Stabilní	Stabilní



Obrázek 17: Fázový diagram dusičnanu kobaltnatého L označuje kapalinu, S pevnou látku $9 \text{ Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $6 \text{ Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a $3 \text{ Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [30]

Jednou z nejdůležitějších vlastností pro předpověď chování, vytváření eutektických směsí a míchání s nukleačními činidly jsou fázové diagramy (viz. Obrázek 17, Obrázek 18)



Obrázek 18: Fázový diagram dusičnanu nikelnatého L označuje kapalinu, S pevnou látku $9 \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $6 \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a $3 \text{ Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [31]

Jak u dusičnanu nikelnatého, tak u dusičnanu kobaltnatého vznikají nonahydrát, hexahydrát i trihydrát. Pokud se zaměříme na hexahydráty jednotlivých dusičnanů, tak tání kobaltnaté soli je mezi 55 a 56°C a jak je viditelné z grafu (Obrázek 17) dochází k inkongruentnímu tání u nonahydrátu kdežto nikelnatá sůl taje pouze kongruentně (Obrázek 18) a tání hexahydrátu odpovídá 56,7°C

2. Experimentální část

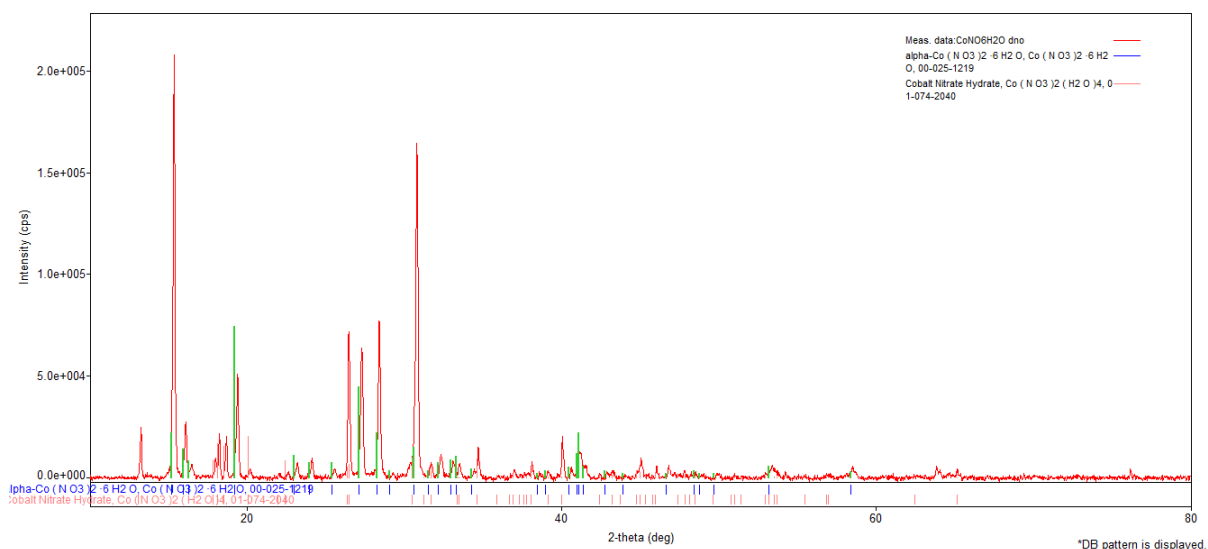
2.1. Seznam použitých chemikálií

$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	–	p.a. Sigma – Aldrich, Praha
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	–	p.a. Penta, Chrudim
CaO	–	p.a. Lachema, Brno
CaCO ₃	–	p.a. Lachema, Brno
MgO	–	p.a. Penta, Chrudim
MgCO ₃	–	p.a. Lachema, Brno
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$	–	p.a. Penta, Chrudim
BaCO ₃	–	p.a. Lach – Ner sr.o.
AlO(OH) Böhmite	–	obsah ~ 75% Al ₂ O ₃ Sasol. Hamburg
Grafit	–	obsah 98% UF, Čína
Grafen	–	HQ, Graphene epoxies Inc
BaO	–	Starý SSSR, na rentgenu v pořádku
Ca(OH) ₂	–	p.a. Eluka
α -celullosa	–	Sigma – Aldrich, Praha
SrCO ₃	–	obsah 91,2%, J.T.Baker, U.S.A.
Sr(OH) ₂	–	obsah 95% Sigma – Aldrich, Praha
Mg(OH) ₂	–	obsah 95% Fisher Scientist

2.2. Charakterizace použitých hydrátů

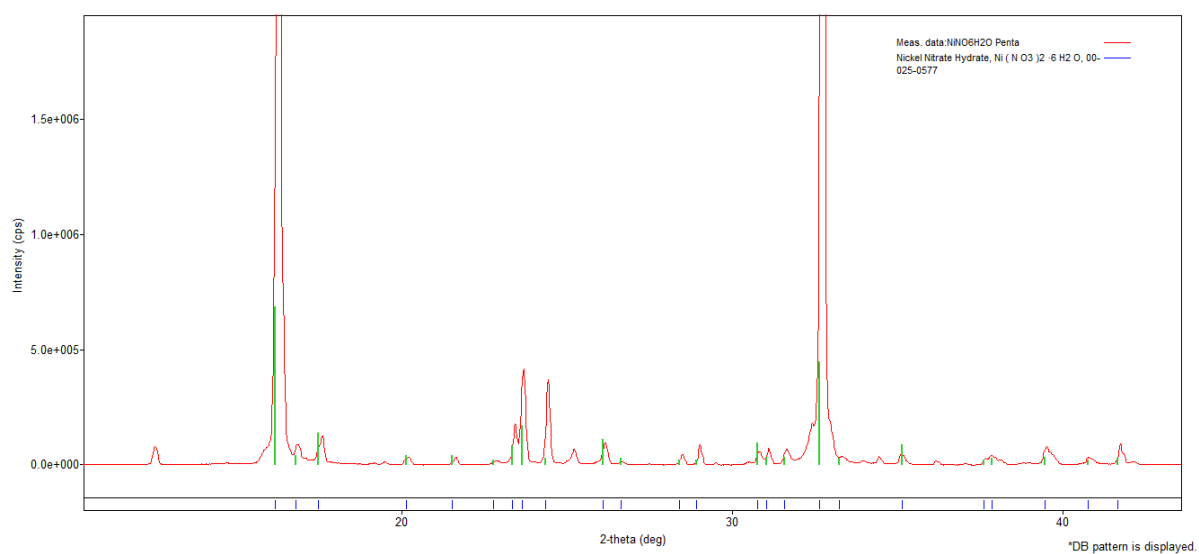
2.2.1. Rentgenová difrakční analýza

Oba studované hexahydráty dusičnanu nikelnatého (dále označovaného jako NiNHH) i kobaltnatého (dále označovaného jako CoNHH) byly podrobeny rentgenové analýze, aby bylo potvrzeno jejich složení. Vzorek byl připraven rozetřením v achátové třecí misce a nanesením na tenké sklíčko, na kterém byl měřen. Měření bylo provedeno na stolním difraktometru MiniFlex600, pro práškovou rentgenovou difrakci (fázovou analýzu), vybaven databází PDF 2 (Rigaku, Japonsko). Porovnání difrakčních linií databáze a získaných rentgenových spekter z experimentu (Obrázek 19 a Obrázek 20) vyplývá, že CoNHH (Obrázek 19) není čistý hexahydrát, ale jsou zde přítomny i linie tetrahydrátu. Ve vzorku je však přítomna převážná část hexahydrátu.



Obrázek 19: rentgenové difrakční spektrum hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého. Modré čáry označují pozice tabelovaných difrakčních linií pro $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, červené $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ a zelené teoretické intenzity píků pro $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

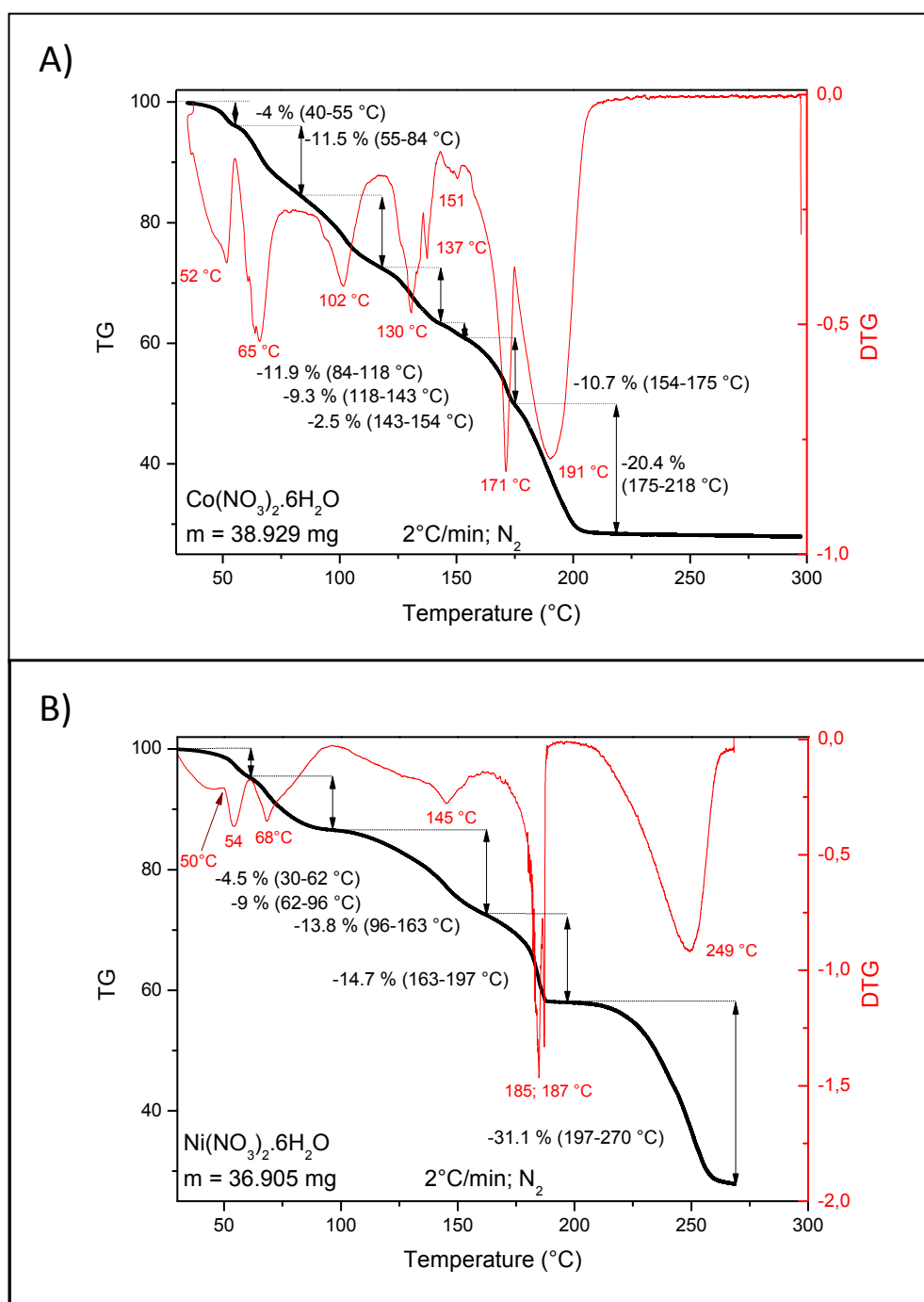
Na difrakčním spektru pro NiNHH (Obrázek 20) je čistý hexahydrát s malými píky, které však neodpovídají ani tetra- a ani dihydrátu dusičnanu nikelnatého. Tyto píky jsou však zanedbatelné, proto můžeme mluvit o čistém hexahydrátu.



Obrázek 20: rentgenové difrakční spektrum hexahydrátu dusičnanu nikelnatého. Modré čáry označují pozice tabelovaných difrakčních linií pro $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a zelené teoretické intenzity píků

2.2.3. Termogravimetrie

Termogravimetrické měření bylo provedeno na přístroji Pyris 1 TGA HT, Perkin Elmer, navážka vzorku byla 38,929 mg pro hexahydrát dusičnanu kobaltnatého a 36,905 mg pro hexahydrát dusičnanu nikelnatého, konstantní rychlost ohřevu 2°C/min do teploty 300 °C (měření provedla Ing. Zuzana Olmrová Zmrhalová, Ph.D. dne 27. 3. 2017 v platinovém kelímku s korundovou vložkou).



Obrázek 21: Termogravimetrické křivky A: dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu a B dusičnanu nikelnatého hexahydrátu

Získaná experimentální data jsou uvedena v příslušných grafech. U hexahydrátu dusičnanu nikelnatého (Obrázek 21) jsou hmotnostní změny dál od sebe a jsou zřetelnější kdežto u CoNHH (Obrázek 20) jsou velmi blízko u sebe a některé na sebe navazují. První dva výrazné píky mají oba hydráty stejné, což by mělo odpovídat stejnému chování obou hydrátů. Dále se jednotlivé hydráty rozkládají odlišně podle vlastních mechanismů.

Termogravimetrické stanovení vzorků (Tabulka 5 a Tabulka 6) obou hexahydrátů ne zcela odpovídá teoretickým hodnotám nalezeným v literatuře. Nejprve drobný úbytek 4% hmotnosti, který nejspíš odpovídá navázané vzdušné vlhkosti, ale probíhá při teplotách velmi blízkých teplotám tání čistých hexahydrátů pro CoNHH 52°C kdy tabelovaná hodnota je 55-56°C a pro NiNHH 54°C kdy tabelovaná hodnota tání je 56,7°C. Hexahydráty byly od pohledu vlhké a ne zcela sypké.

Jak u CoNHH tak u NiNHH je výrazný druhý pík který odpovídá rozkladu hexahydrátů které byli předmětem této práce. Pro CoNHH je to hodnota teploty rozkladu 65°C a pro NiNHH je to teplota 68°C.

Teploty z literatury ne zcela odpovídají teplotám naměřeným, jelikož v literatuře rozklad probíhal v redukční vodíkové atmosféře ve směsi s dusíkem a při změně hmotnosti se vzorek přestal zahřívat, než efekt skončil. Proto děje probíhali později oproti hodnotám z literatury.

Tabulka 5: Termogravimetrické hodnoty hexahydrátu dusičnanu nikelnatého naměřené v porovnání s teoreticky vypočítanými úbytky a teplotami z literatury [32]

Reakce	T (°C)	T lit. (°C)	Úbytek %	Úbytek teor. %
Nejspíš volná voda odpovídala by 1 H ₂ O	30-62	x	4,5	6,18
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	62-96	43	9	12,38
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	96-163	80	13,8	12,38
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ni}(\text{NO}_3)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2$	163-197	145	14,7	15,81
$\text{Ni}(\text{NO}_3)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ni}(\text{NO}_3)(\text{OH})_{1,5}\text{O}_{0,25} \cdot \text{H}_2\text{O} + 0,25\text{H}_2\text{O}$		190		1,54
$\text{Ni}(\text{NO}_3)(\text{OH})_{1,5}\text{O}_{0,25} \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow 0,5\text{Ni}_2\text{O}_3 + \text{HNO}_3 + 1,25\text{H}_2\text{O}$	197-270	250	31,1	29,4
$3\text{Ni}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Ni}_3\text{O}_4 + 0,5\text{O}_2$		250		2,75

Tabulka 6: Termogravimetrické hodnoty hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého naměřené v porovnání s teoreticky vypočítanými úbytky a teplotami z literatury [33]

Reakce	T (°C)	T lit. (°C)	Úbytek %	Úbytek teor. %
Vzdušná vlhkost vázána ve vzorku	40-55	x	4	6
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	55-84	35	15,5	12,38
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	84-118	67	27,4	24,75
$2\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow [\text{Co}(\text{NO}_3)_2]_2\text{O} + \text{H}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	118-143	110	36,7	34,37
$[\text{Co}(\text{NO}_3)_2]_2\text{O} \rightarrow 2\text{Co}(\text{NO}_3)_2 + 1/2\text{O}_2$	143-154	112	39,2	37,12
	154-175	125	49,9	x
$2\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{Co}_2\text{O}_3 + \text{N}_2\text{O}_4 + \text{N}_2\text{O}_5$	175-218	185	70,3	71,5
$3\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4 + \text{N}_2\text{O}_4 + 2\text{N}_2\text{O}_5$			x	72,2

2.2.4. Diferenční skenovací kalorimetrie

Před měřením byl přístroj DSC Pyris 1 (Perkin – Elmer, USA) nakalibrován vedoucí práce pomocí teplot tání a entalpických změn tání čistých kovů jako Hg, Ga, In, Sn, Pb a Zn. U každého z uvedených kovů byla změřena neizotermní DSC křivka pro rychlost ohřevu $\beta = 10 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro vlastní kalibraci byly použity experimentální (exp) a tabelované (tab) teploty tání čistých kovů a experimentální a tabelovaná změna entalpie tání india, jejíž hodnota činí: $\Delta H_{\text{exp}} = 27,55 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ a $\Delta H_{\text{tab}} = 28,43 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$. [34]

Tabulka 7: Směsi nukleačních činidel měřených pro hexahydrát dusičnanu kobaltnatého v uvedených hmotnostních procentech

Směs nukleačních činidel	Hmotnostní procenta
BaO 1:1 MgO	0,5% 1% 2%
BaO 1:1 Mg(OH) ₂	0,5% 1%
CaO 1:1 Mg(OH) ₂	1%
Ba(OH) ₂ 1:1 Mg(OH) ₂	1%
Grafit 1:1 Mg(OH) ₂	1%
BaO 1:2 Mg(OH) ₂	1%
Ba(OH) ₂ 1:2 Mg(OH) ₂	1%
Ba(OH) ₂ 1:2 BaO	1% 2%
Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	1:1

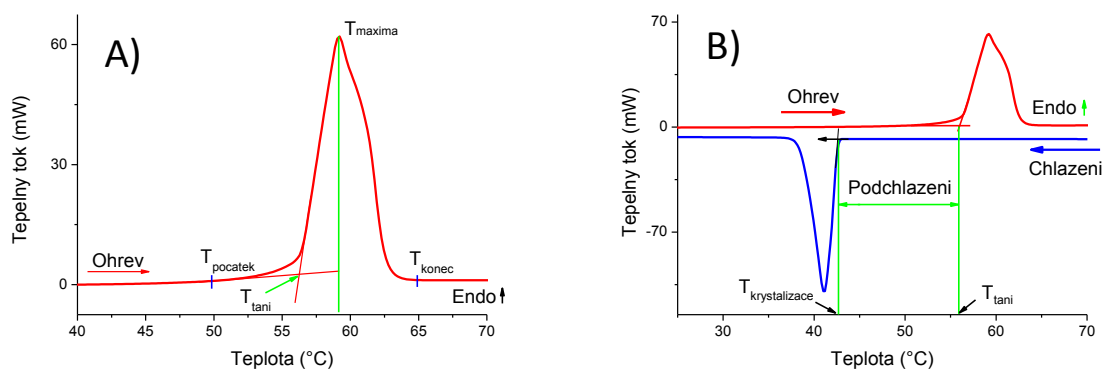
Látky byly měřeny v hliníkových kelímcích pod inertní atmosférou (N₂, 20 ml·min⁻¹). Kromě čistých hydrátů byly připraveny i směsi s vybraným nukleačním činidlem nebo jejich

směsí (viz. Tabulka 7).

Směs hydrátu s nukleačním činidlem byla připravena navážením daných látek do achátové misky, homogenizací směsi ručním mícháním po dobu minimálně dvou minut. Takto připravené směsi byly navažovány do kelímků na DSC měření.

Teplotní cykly hydrátů byly stanoveny v rozmezí teplot $-20 - 80$ °C rychlostí 10 °C/min – u všech sledovaných směsí byly provedeny 4 cykly ohřevu/chlazení, ze kterých byly stanoveny průměrné hodnoty změn entalpií a podchlazení. U vybraných směsí bylo provedeno testování rychlostí 10 °C/min, ale v počtu 50 cyklů ohřevu/chlazení. Nejlepší směsi byly testovány také pomalými cykly, tj. rychlostí ohřevu 2 °C/min v počtu deseti cyklů ale pro srovnání s pomalými cykly jsou ve výsledcích a diskuzi uvedeny hodnoty pouze prvních čtyř cyklů.

Pro stanovení entalpií tání se nejprve ve zvoleném teplotním intervalu proměří prázdný srovnávací a měrný kelímek pro získání základní linie. Poté vzorek o známé hmotnosti ($10 - 20$ mg) se vloží do měrného kelímku, srovnávací zůstává prázdný, a provede se měření za stejných podmínek jako srovnávací. Poté se základní linie odečte od linie vzorku. Z integrálu plochy pod píkem tání a známé hmotnosti vzorku byla vypočtena entalpie tání látky, což přímo umožňuje ovládací software přístroje. Teplota tání látky byla odečtena jako teplota onsetu píku ohřevu a analogicky pro chlazení viz. Obrázek 22 A



Obrázek 22: Grafy A) vyhodnocení jednoho píku B) celý teplotní cyklus s podchlazením

Onsety byly odečteny z celého cyklu jak pro ohřev (teplota tání) tak pro chlazení (krystalizace) viz. Obrázek 22 B. Z těchto hodnot je možné vypočítat podchlazení jako ΔT , které by v ideálním případě mělo být nulové.

3. Výsledky a diskuse

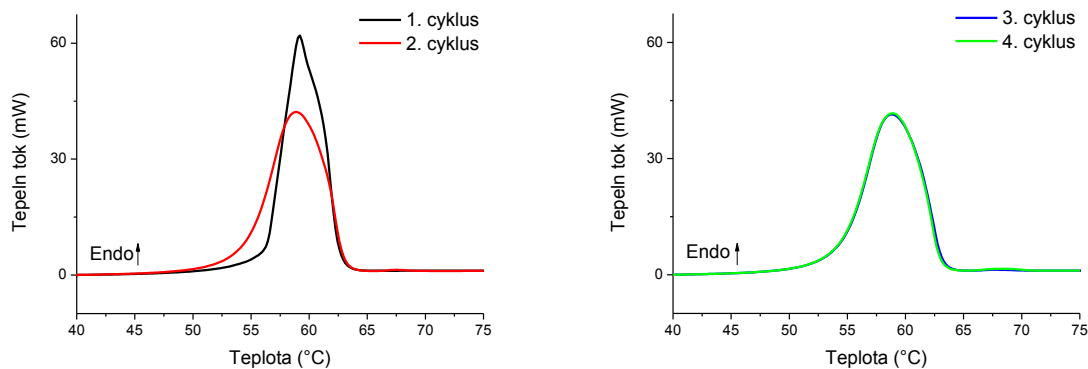
Tato práce je zaměřena na studium vlastností hexahydrátů dusičnanů kobaltnatého a nikelnatého, a jejich možnou aplikaci v oblasti akumulace tepla. Studium obou látek je převážně soustředěno na DSC měření teplotních cyklů ohřevu a chlazení a potlačení sledovaného podchlazení pomocí vybraných nukleačních činidel či směsí vybraných nukleačních činidel.

3.1. Dusičnan kobaltnatý hexahydrát

Zda je hexahydrát dusičnanu kobaltnatého vhodný pro akumulaci tepla bylo studováno opakováním cyklů ohřevu a chlazení. Ukázka získaných křivek ohřevu v jednotlivých krocích je uvedena na Obrázek 23. Jak je patrné, a platí to i u všech dalších vzorků, první cyklus ohřevu se vždy lišil od všech následujících. Tento rozdíl je dán rozdílným vedením tepla ve vzorku, protože připravený vzorek je volně sypaný, kdežto po prvním cyklu ohřevu/chlazení vznikne kompaktní vrstva materiálu v DSC kelímku. Z tohoto důvodu nebyly do průměrných hodnot teplot a změn entalpií (tání i krystalizace) započítány hodnoty pro první cyklus.

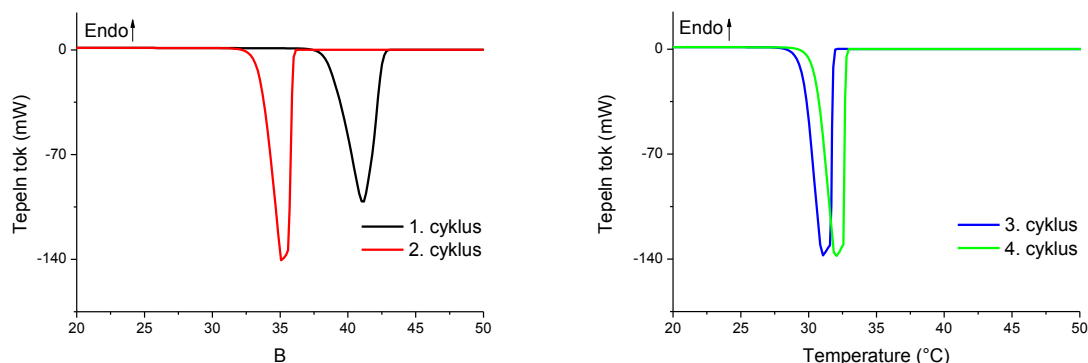
Po provedení DSC cyklů byla vždy vyhodnocena změna entalpie po odečtení od základní linie přístroje, což je prázdný kelímek měřený za stejných podmínek jako stanovovaná látka. Entalpie byla stanovována jako plocha pod píkem, kde byla zohledněna navážka vzorku a kalibrace DSC. Dále z DSC cyklů byly vyhodnoceny teploty tání z křivky ohřevu a krystalizace z křivky chlazení jako onsets píku (viz. Obrázek 22). Z rozdílu teplot tání a krystalizace byla stanovena velikost podchlazení.

Z testu teplotních cyklů $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ na přístroji DSC (Obrázek 23) lze odečíst teplotu tání čistého hydrátu, která odpovídá $54,58^\circ\text{C}$ a je zřejmé, že při ohřevu dochází ke vzniku dalšího endotermního píku, který vzniká až za píkem tání hydrátu. Tento pík by v dalších teplotních cyklech mohl mít negativní vliv na hlavní pík tání.



Obrázek 23: Teplotní cykly ohřevu čistého hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého

Naměřené křivky pro chlazení čistého hexahydrátu (Obrázek 24) se po prvním cyklu, který nezapočítáváme do měření, ustálili okolo teploty krystalizace $33,54^{\circ}\text{C}$, čemuž odpovídá podchlazení $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\Delta T = 21,04 \pm 1,77^{\circ}\text{C}$. Dále je z grafu chlazení zřejmé, že se nejedná pouze o jednoduchý pík, což se projevuje vznikem „plošky“ okolo maxima píku.



Obrázek 24: Teplotní cykly chlazení čistého hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého

Po studiu čistého hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého byly testovány směsi s vybranými nukleačními činidly, nebo se směsí nukleačních činidel. Všechny připravené směsi byly podrobeny pouze 4 cyklům ohřevu a chlazení. Vybrané směsi pak byly podrobeny ještě cyklům s nízkou rychlostí ohřevu/chlazení a v počtu 10 cyklů. V následujících kapitolách jsou podrobně uvedeny výsledky pro nejzajímavější složení a výsledné hodnoty důležitých parametrů pro všechny testované směsi jsou shrnuty v tabulkách a sloupcových grafech.

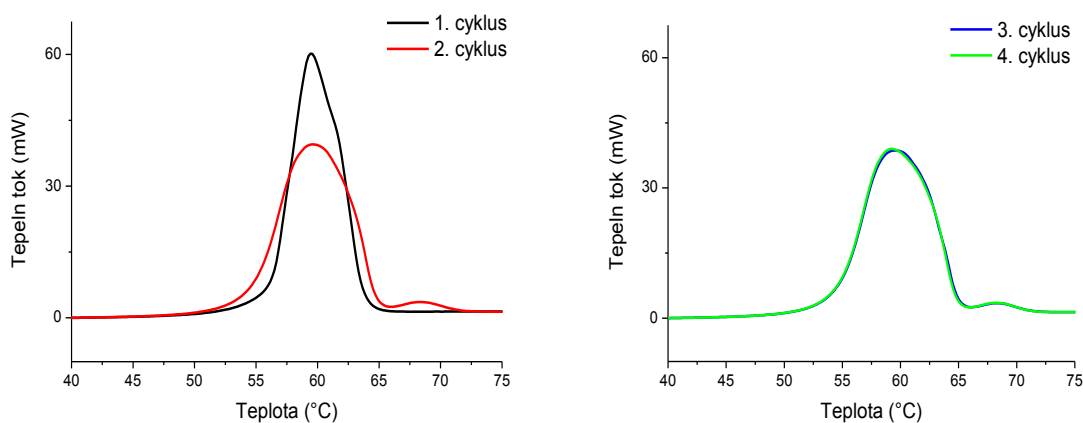
3.1.1. Přídavek jednoho nukleačního činidla

K čistému dusičnanu kobaltnatému o hmotnosti okolo 3g bylo přidáno 1hm% nukleačního činidla. Takto vytvořená směs byla homogenizována v malé achátové třecí misce

pomocí tloučku po dobu nejméně 2 min. U některých látek byla homogenizace delší z důvodu malého objemu nukleačního činidla či nabalování výsledné směsi do shluků, které musely být co nejlépe homogenizovány.

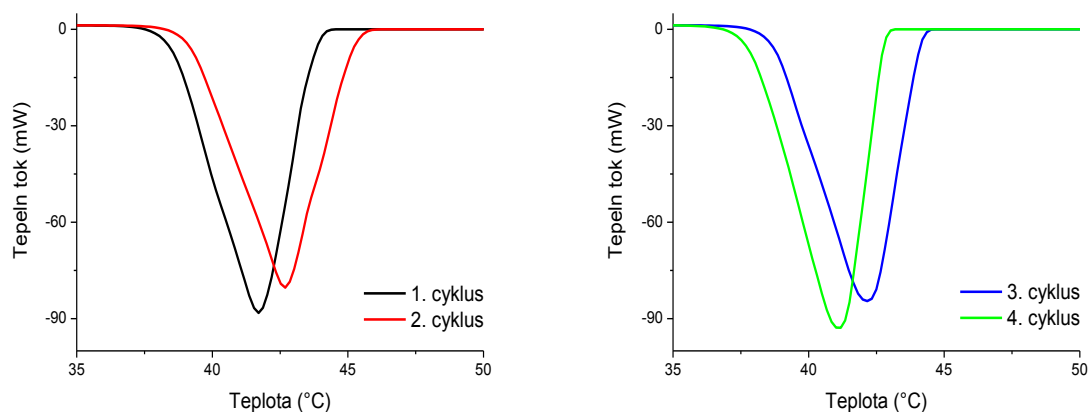
Grafit

Grafit má malou hustotu, proto 1hm% bylo objemově velké množství a v achátové misce došlo k dokonalému promísení, směs byla sypká a nelepivá. Takto vytvořená směs byla vystavena teplotním cyklům v DSC a získané křivky jsou uvedeny v grafech (Obrázek 25 a Obrázek 26). Při ohřevu (Obrázek 25) je zřejmé, že dochází k postupnému zvyšování malého píku za hlavním píkem tání. Tento jev se již projevil u čisté látky (Obrázek 23), ale zde je zřetelnější. Teplota tání směsi je 54,72°C, zato teplota malého efektu 66,32°C. Efekt je sice malý, ale změni teplotu tání o více než 11°C, čímž ještě zvýší podchlazení.



Obrázek 25: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% grafitu

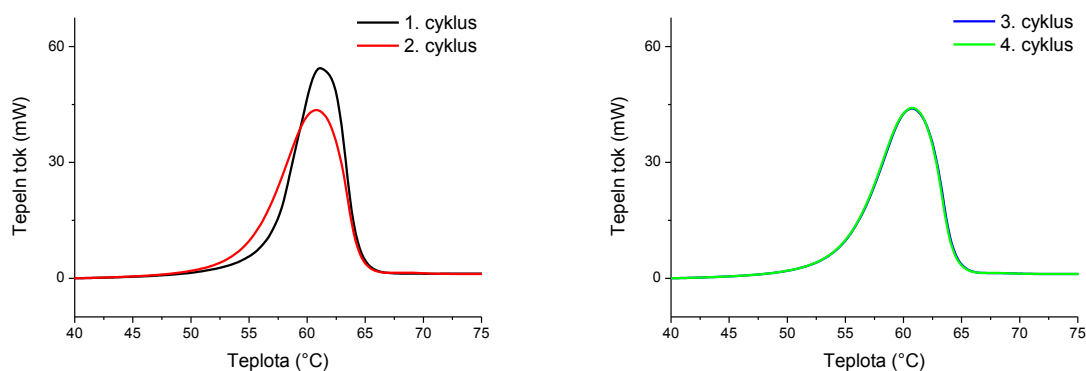
Pro teplotní cykly chlazení (Obrázek 26) směsi se teplota krystalizace jeví jako relativně vysoká 43,99°C, čemuž by odpovídalo podchlazení 10,74°C. Tato hodnota je poloviční oproti hexahydrátu bez nukleačního činidla, ale není konečná, jak je zřejmé z grafu (Obrázek 26) se vzrůstajícím počtem cyklů se pík chlazení posouvá k nižším hodnotám teplot. Už mezi druhým a čtvrtým cyklem je rozdíl v teplotě 2,1°C, tento jev je nejspíš způsoben separací fází, kterou může podpořit nesmáčivost grafitu.



Obrázek 26: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% grafitu

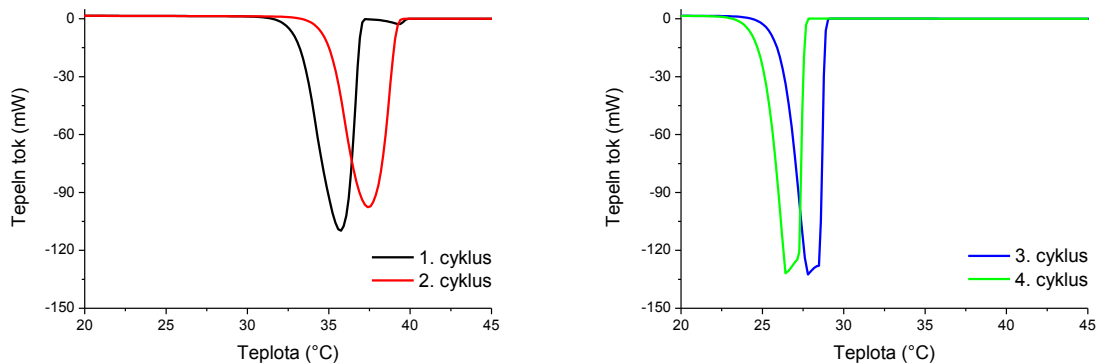
Grafen

Grafen, stejně jako grafit, má relativně nízkou hustotu, proto při míchání 1hm% s hexahydrátem dusičnanu kobaltnatého v achátové třecí misce došlo k dokonalému promísení, směs byla sypká a nelepivá. Při cyklech ohřevu směsi s grafenem (Obrázek 27) nevznikal další pík, jako u grafitu (Obrázek 26). Pík s teplotou tání 54,81°C vypadá stabilně a s dalšími cykly se nejspíš nebude měnit.



Obrázek 27: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% grafenu

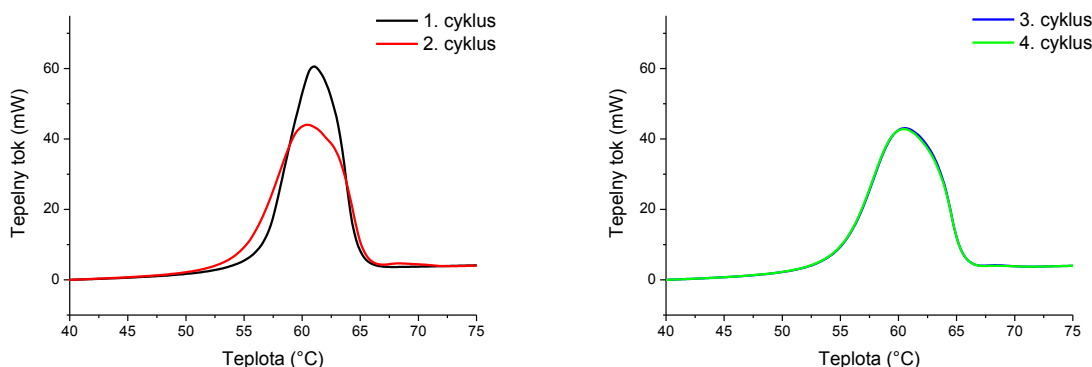
Na křivce chlazení (Obrázek 28) je znát nesourodost látky a separace grafenu. Z počátku (1. a 2. cyklus) je látka kompaktní a teplota krystalizace relativně velká, ale s dalšími cykly (3. a 4. cyklus) se grafen nejspíš separuje a teplota krystalizace se sníží o 11°C, čímž vzroste podchlazení.



Obrázek 28: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% grafenu

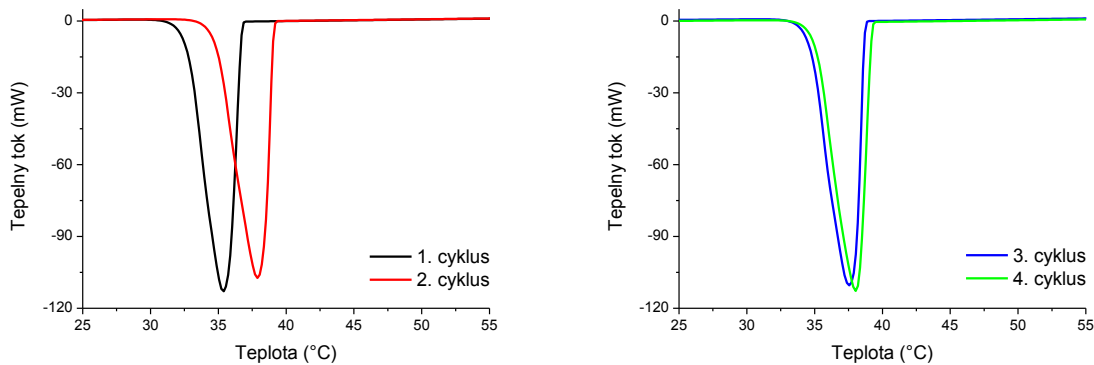
Oxid barnatý

Oxid barnatý je jemný bílý prášek s relativně vysokou hustotou. Proto při míchání 1hm% tohoto prášku, v achátové misce, s hexahydrátem musel být čas homogenizace okolo pěti minut, aby došlo k co nejlepšímu promísení. Po proměření jednotlivých cyklů, se směs při ohřevu (Obrázek 29) projevila jako velmi stabilní, s teplotou tání 54,95°C.



Obrázek 29: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu barnatého

Při cyklech chlazení této směsi (Obrázek 30), se pík rychle ustálil okolo teploty krystalizace 38,03°C. Těmto hodnotám tání a krystalizace odpovídá podchlazení 15,94°C. Tato hodnota je horší než u grafitu, ale nedochází k posunu píku při chlazení, jako u grafitu (Obrázek 26) a ani k separaci fází, jako u grafenu (Obrázek 28).

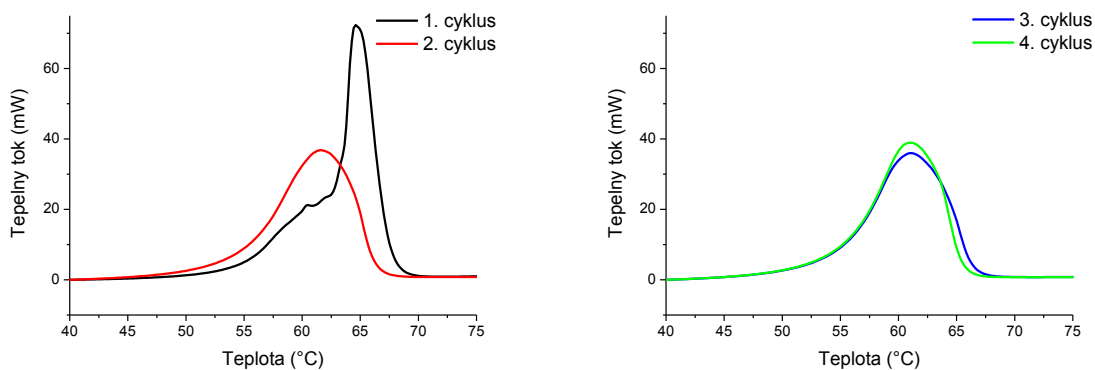


Obrázek 30: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu barnatého

Oxid hořečnatý

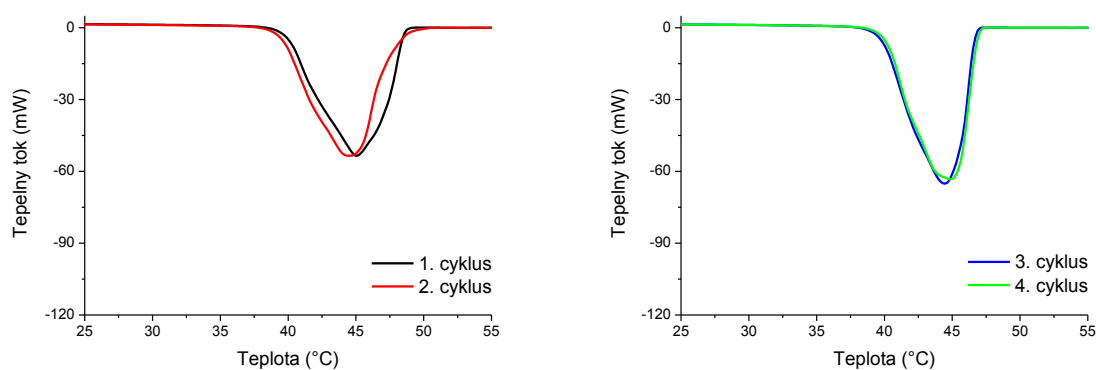
Oxid hořečnatý je velmi jemná krystalická látka připomínající pudr. Má velmi malou hustotu, proto objem naváženého nukleačního činidla, odpovídající 1hm% hexahydrátu, byl zhruba poloviční oproti hexahydrátu. Při míchání v achátové misce, pak byl trochu problém směs homogenizovat. Oxid barnatý sice dobře obalil krystaly hexahydrátu a vytvořil sypkou směs, ale oxidu hořečnatého bylo objemově příliš a homogenizace probíhala také 5 minut, než byla směs homogenní.

Pro nukleační činidla oxid barnatý (Obrázek 29 a Obrázek 30), oxid hořečnatý (Obrázek 31 a Obrázek 32) a oxid vápenatý (Obrázek 33 a Obrázek 34) jsou rozsahy os v grafech zachovány pro lepší přehlednost. Z porovnání hodnot entalpií pro jednotlivé oxidy má oxid hořečnatý nejmenší pík ($\Delta H_m = 108,99\text{J/g}$). Teplota tání zůstává téměř stejná $55,05^\circ\text{C}$. Na konci křivky ohřevu při čtvrtém cyklu (Obrázek 31) je zajímavé, že se pík začíná zužovat. Tento jev by se mohl v dalších cyklech projevit na podchlazení látky.



Obrázek 31: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu hořečnatého

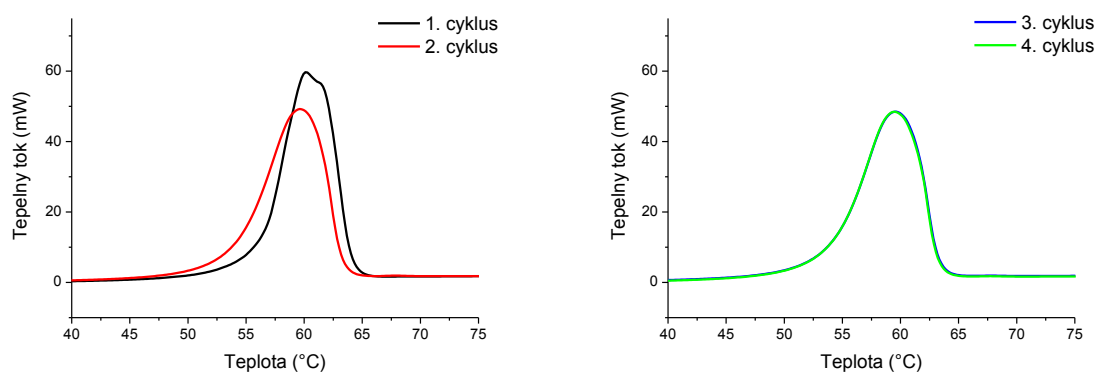
Při zachování os, jak bylo řečeno v předešlém odstavci, je na křivce chlazení (Obrázek 32) zřejmé, že pík krystalizace této směsi je v porovnání s jinými oxidy velmi malý ($\Delta H_c = 111,25 \text{ J/g}$). Z pohledu podchlazení však má tato směs velký potenciál, s nejnižší naměřenou hodnotou $8,06^\circ\text{C}$, ale spíš jako podpůrné nukleační činidlo ve směsi s nukleačním činidlem které zachová entalpii původní látky.



Obrázek 32: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu hořečnatého

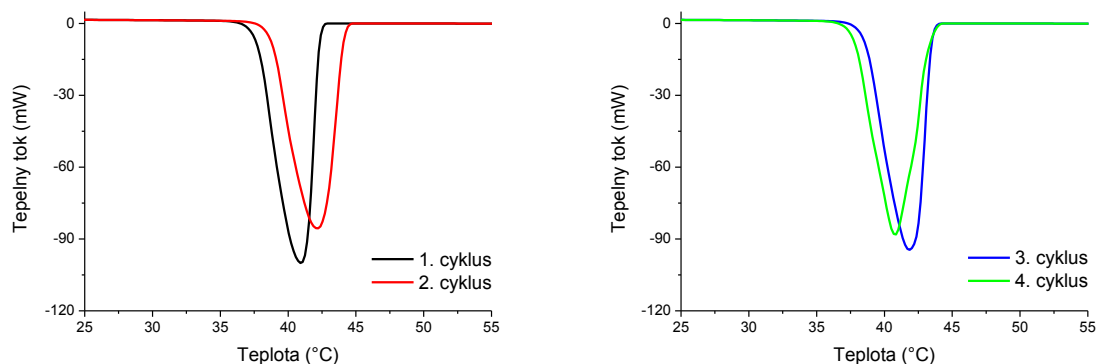
Oxid vápenatý

Z celé řady použitých nukleačních činidel nejlepší vlastnosti projevoval oxid vápenatý. Při navažování nebyl tak jemný jako oxid hořečnatý a při homogenizaci směsi s přídatkem 1hm% tohoto nukleačního činidla s hexahydrátem měl správné objemové vlastnosti, aby se dokonale promísil. Nejspíš proto vycházel nejlépe v poměru podchlazení k zachování entalpie původního hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého. Při ohřevu (Obrázek 33) má oxid vápenatý srovnatelný pík s oxidem barnatým (Obrázek 29) jak z pohledu entalpie tak teploty tání (viz. Tabulka 8) Z pohledu stability už od druhého cyklu, se píky téměř překrývají, což naznačuje stabilnímu průběhu i v dalších cyklech.



Obrázek 33: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého

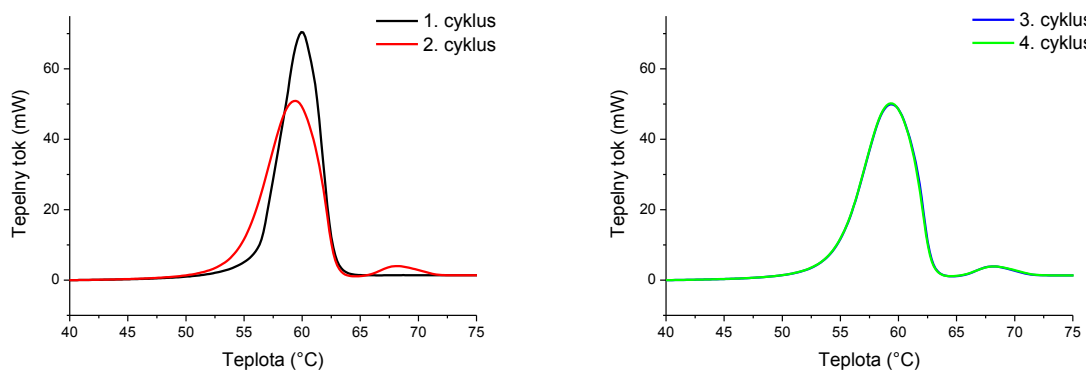
Na křivkách chlazení (Obrázek 34), je zřejmé, že nedošlo k ustálení teploty krystalizace při jedné teplotě. Vypadá to, že se teplota krystalizace posouvá do nižších hodnot, ale při provedení dalších šesti cyklů se teplota krystalizace stále drží okolo hodnoty 46,6°C. Velikost podchlazení (10,41°C) je sice větší než u oxidu hořečnatého, ale původní entalpie ($\Delta H_c = 122,27 \text{ J/g}$) je zachována lépe než v případě oxidu hořečnatého.



Obrázek 34: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého

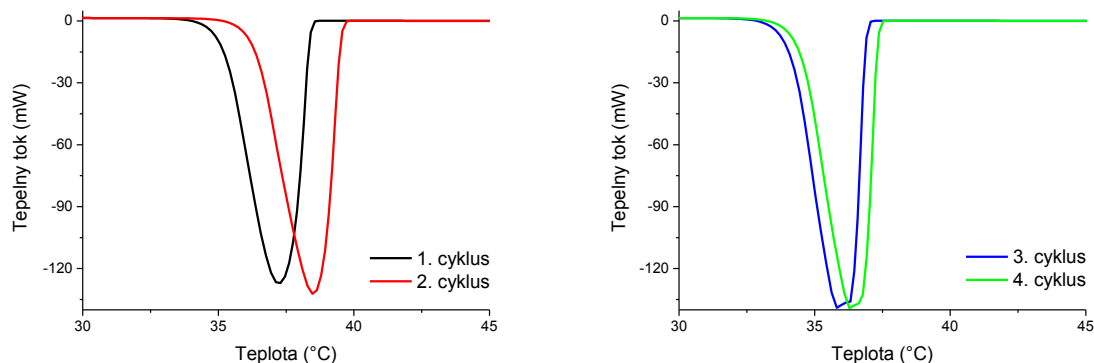
Uhličitan vápenatý

Uhličitan vápenatý má ideální hustotu, jako tomu bylo u oxidu barnatého, proto 1hm% tohoto činidla v achátové třecí misce s hexahydrátem dusičnanu kobaltnatého bude dokonale homogenní za velmi krátkou dobu (2 min). U této směsi se však projevuje vznik druhého píku ve větší míře než u grafitu (Obrázek 25), avšak nezpůsobuje posun v teplotě, kdy rozdíl hlavního a malého píku je 10°C, ale jeho plocha je výrazně větší. Entalpie tohoto píku je 2x větší než v případě grafitu. Tedy i příspěvek k podchlazení látky je větší.



Obrázek 35: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% uhličitanu vápenatého

Při cyklech chlazení hexahydrátu s uhličitánem barnatým (Obrázek 36), je zřejmé rozdvojení maxima píku v třetím cyklu. Tento děj však nesnížil hodnotu entalpie ($\Delta H_c = 127,18 \text{ J/g}$), která má vyšší hodnotu než u čistého hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého.



Obrázek 36: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% uhličitánem vápenatého

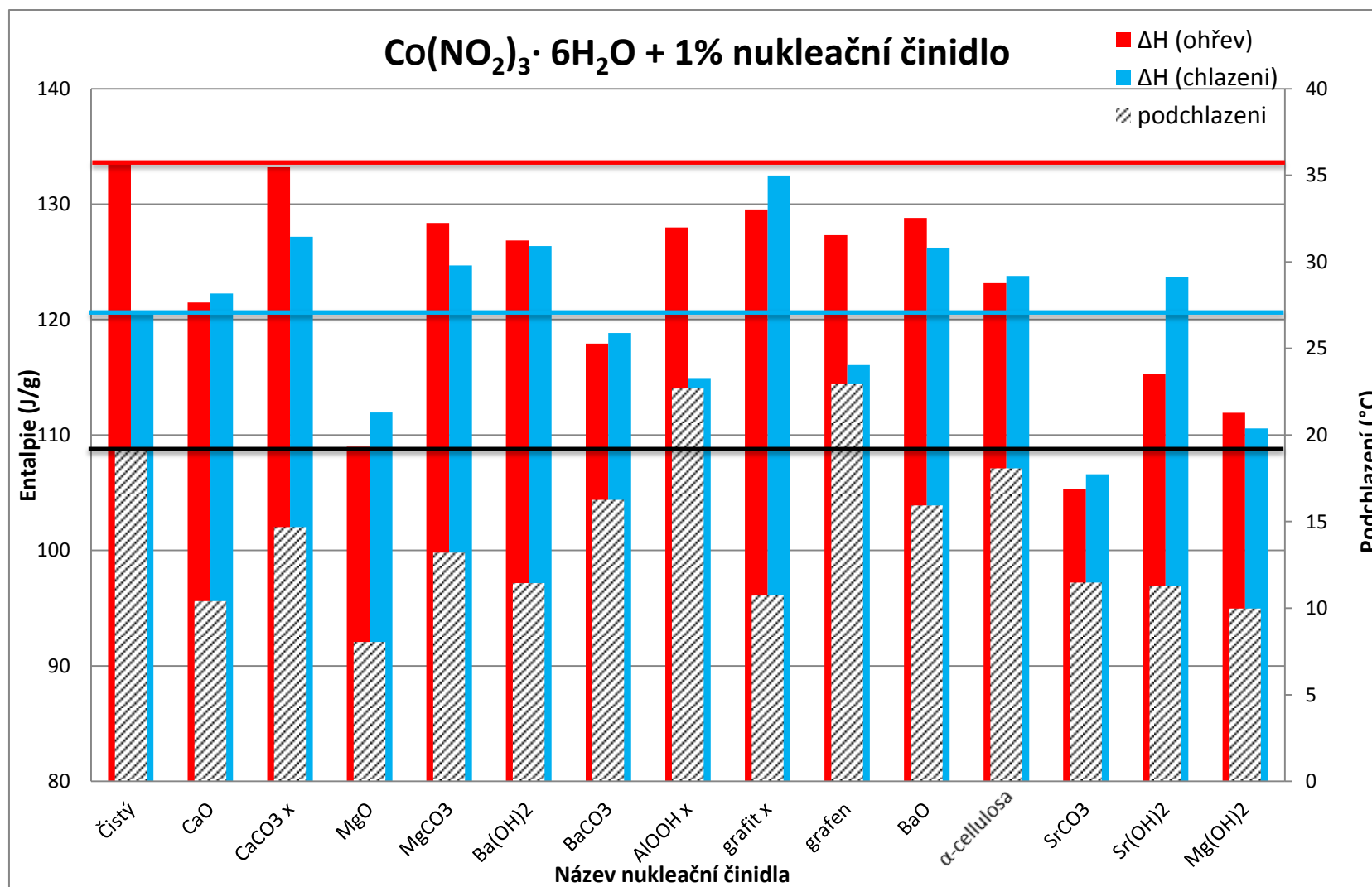
Kromě látek vybraných a zmíněných na předchozích stranách byl CoNHH smíchán také s jinými nukleačními činidly, a to vždy s 1hm% nukleačního činidla. Srovnání všech hodnot získaných z cyklů ohřev/chlazení všech měřených směsí CoNHH s nukleačními činidly rychlostí ohřevu $10^\circ\text{C}/\text{min}$ je uvedeno v Tabulka 8. Pro srovnání jsou zde uvedeny i hodnoty čistého CoNHH.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty teplot a entalpií s odchylkami pro dusičnan kobaltnatý hexahydrát s 1hm% nukleačního činidla. Uvedené hodnoty jsou průměry z druhého až čtvrtého cyklu ohřevu/chlazení.

Látka	T_m ($^\circ\text{C}$)	ΔH_m (J/g)	T_c ($^\circ\text{C}$)	ΔH_c (J/g)	ΔT ($^\circ\text{C}$)
Čistý	$54,58 \pm 0,06$	$133,58 \pm 0,89$	$33,54 \pm 1,79$	$-120,62 \pm 3,00$	$21,04 \pm 1,77$
CaO	$54,08 \pm 0,03$	$121,48 \pm 0,31$	$43,67 \pm 0,34$	$-122,27 \pm 0,21$	$10,41 \pm 0,30$
CaCO ₃ x	$54,56 \pm 0,78$	$133,18 \pm 2,64$	$39,88 \pm 1,77$	$-127,18 \pm 1,56$	$14,69 \pm 2,16$
MgO	$55,05 \pm 0,14$	$108,99 \pm 1,69$	$46,99 \pm 0,74$	$-111,95 \pm 0,06$	$8,06 \pm 0,44$
MgCO ₃	$54,97 \pm 0,65$	$128,37 \pm 0,59$	$41,76 \pm 0,77$	$-124,69 \pm 1,02$	$13,21 \pm 0,64$
Ba(OH) ₂	$54,53 \pm 0,03$	$126,86 \pm 0,99$	$43,07 \pm 0,59$	$-126,36 \pm 0,30$	$11,46 \pm 0,57$
BaCO ₃	$55,04 \pm 0,09$	$117,91 \pm 1,23$	$38,77 \pm 0,72$	$-118,85 \pm 0,66$	$16,27 \pm 0,72$
AlOOH x	$54,82 \pm 0,05$	$127,97 \pm 1,40$	$32,13 \pm 1,01$	$-114,86 \pm 4,05$	$22,69 \pm 1,00$
grafit x	$54,72 \pm 0,04$	$129,55 \pm 0,83$	$43,99 \pm 0,89$	$-132,48 \pm 0,30$	$10,74 \pm 0,86$
grafen	$54,81 \pm 0,02$	$127,32 \pm 0,19$	$31,87 \pm 5,18$	$-116,07 \pm 5,78$	$22,94 \pm 5,19$
BaO	$54,97 \pm 0,04$	$128,79 \pm 0,97$	$39,03 \pm 0,20$	$-126,24 \pm 0,18$	$15,94 \pm 0,19$
α -celulóza	$54,75 \pm 0,18$	$123,15 \pm 5,47$	$36,60 \pm 1,89$	$-123,78 \pm 2,30$	$18,15 \pm 1,81$
SrCO ₃	$53,16 \pm 0,45$	$113,94 \pm 0,12$	$42,16 \pm 0,26$	$-126,90 \pm 9,50$	$11,00 \pm 0,65$
Sr(OH) ₂	$53,16 \pm 0,45$	$113,94 \pm 0,12$	$42,16 \pm 0,26$	$-126,90 \pm 9,50$	$11,00 \pm 0,65$
Mg(OH) ₂	$53,43 \pm 0,08$	$111,94 \pm 1,08$	$43,71 \pm 0,24$	$-110,58 \pm 0,27$	$9,72 \pm 0,30$

V grafu (Obrázek 37) jsou uvedeny hodnoty z tabulky pro lepší přehlednost a srovnání, jsou zde zobrazeny tři základní sloupce, odpovídající hodnotám pro čistý CoNHH a to červená odpovídá hodnotě změny entalpie ohřevu 133,58 J/g, modrá hodnotě (absolutní hodnotě) změny entalpie chlazení 120,62 J/g a černá odpovídá podchlazení 21°C. Lze tak snadno pozorovat, které látky zlepšily a které zhoršily vlastnosti původní látky. Je zřejmé, že původní změně entalpie při ohřevu se přiblížily směsi s CaCO₃ anebo grafitem, ovšem každý z nich má označení x, které říká, že vznikaly dva píky. Většina směsí měla větší změnu entalpie při chlazení než čistý CoNHH, tedy vyšší než 120,62 J/g.

Podchlazení většina nukleačních činidel snížila až na AlOOH a grafen. Největší snížení podchlazení bylo pozorováno ve směsích CoNHH s 1hm% MgO a Mg(OH)₂. Obě tyto látky snížily podchlazení pod 10°C, což odpovídá více než polovičnímu podchlazení oproti původní hodnotě 21,04°C, avšak ani takovéto podchlazení není vhodné pro komerční využití a další prohloubení studia této směsi. CoNHH však s některými nukleačními činidly projevuje lepší vlastnosti než čistý, proto byly směsi s těmito činidly dále testovány pomalými cykly a ve směsích s dalšími nukleačními činidly.



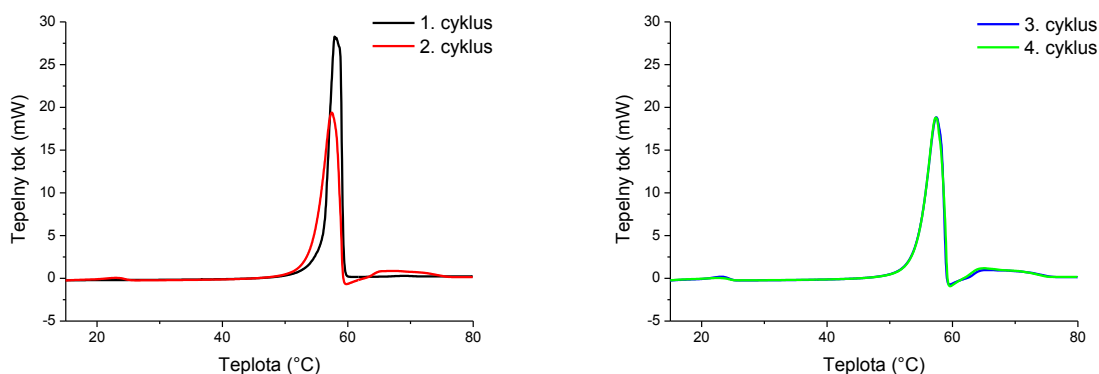
Obrázek 37: Graf dusičnanu kobaltného hexahydrátu jak čistého tak ve srovnání s přidávkou 1hm% nukleačních činidel

Látky označené symbolem x měly dva píky, při dalších cyklech byl druhý pík výrazný a nezanedbatelný jako u čisté látky.

3.1.2. Pomalé cykly

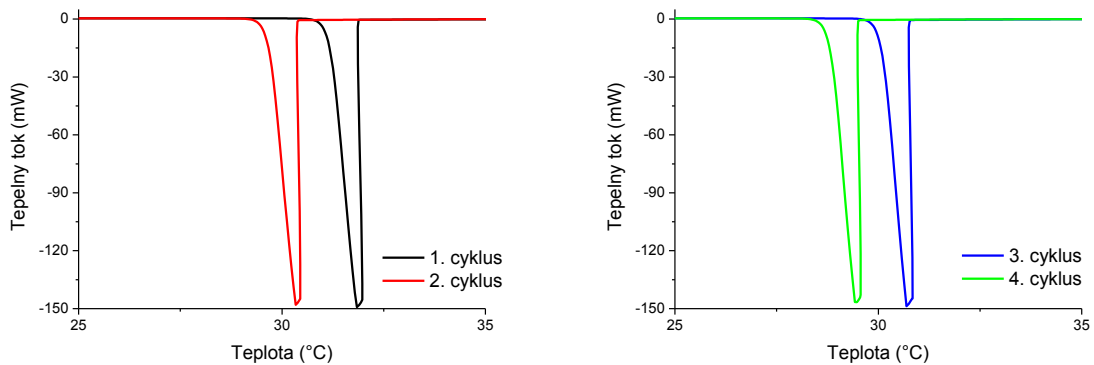
Po proměření cyklů ohřev/chlazení rychlostí $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a zjištění, která nukleační činidla projevují nejlepší vlastnosti ve směsi s CoNHH byli proměřeny také pomalé cykly a to rychlostí $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Tato rychlost ohřevu lépe odpovídá nabíjení při dopadajícím slunečním záření nebo ohřevu média ve slunečních kolektorech. Měření probíhalo za stejných podmínek jako u předchozích cyklů pouze při změněné rychlosti ohřevu a se zvýšeným počtem měření na 10 cyklů; v grafech jsou však uvedeny opět 4 cykly, pro lepší srovnání a konzistenci všech grafů.

Po proměření čistého CoNHH na DSC při pomalých teplotních cyklech ohřev/chlazení, se ukázaly při cyklu ohřevu (Obrázek 38) další fázové změny, a to exotermní propad za píkem tání který snižuje hodnotu změny entalpie tání tím, že se překrývá s píkem tání. Dále pak dlouhý endotermní efekt mezi $60\text{--}75^{\circ}\text{C}$, který je nejpravděpodobněji způsoben přeskupením krystalické fáze. Tyto dva děje (exotermní propad a dlouhý endotermní efekt) budou dále označovány jako sekundární děje. Náběhová hrana píku pro tání je velmi ostrá proto bylo snadné určit teplotu tání CoNHH $54,34^{\circ}\text{C}$ pro rychlost $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ bez nukleačních činidel. Tato teplota je téměř identická s teplotou při rychlosti ohřevu $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ která činila $54,58^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 38: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu bez nukleačních činidel rychlostí $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$

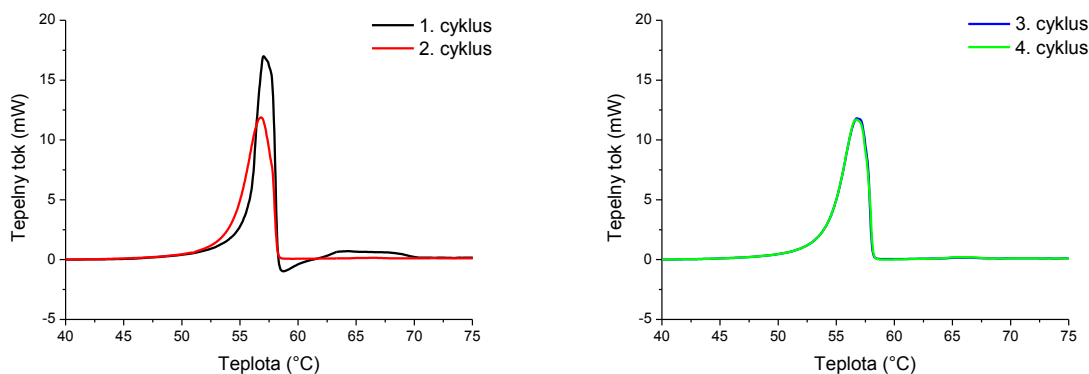
Při cyklech chlazení (Obrázek 39) se může zdát, že se teplota krystalizace čistého CoNHH s přibývajícými cykly snižuje, avšak není tomu tak, při dalších cyklech se stále teplota krystalizace pohybuje okolo hodnoty $29,23^{\circ}\text{C}$. Podchlazení při pomalých cyklech ($25,11^{\circ}\text{C}$) je větší než u cyklů měřených rychlostí $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($21,04^{\circ}\text{C}$), pravděpodobně proto, že při rychlejších cyklech se nestihne projevit např. mírná separace fází.



Obrázek 39: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu bez nukleačních činidel rychlostí 2°C/min

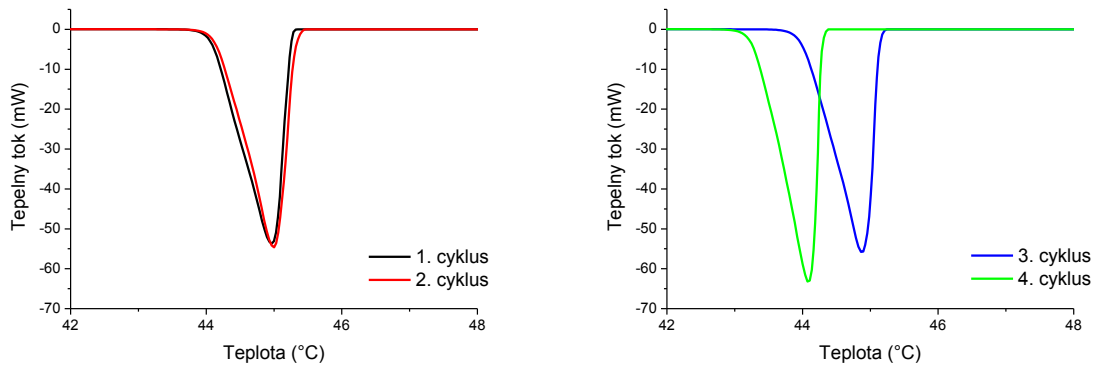
Hydroxid barnatý

CoNHH byl smíchan s 1hm% hydroxidu barnatého v achátové třetí misce. Při mísení se projevilo několik problémů. Objem hydroxidu byl malý, proto homogenizace probíhala delší dobu (5min), dále směs hydroxidu barnatého s CoNHH byla velmi vlhká, lepivá a špatně se navažovala. Při cyklu ohřevu (Obrázek 40) došlo k potlačení sekundárních efektů, které se projevily u čistého CoNHH (Obrázek 38) už u druhého cyklu a je zde pouze jeden pík s teplotou tání 54,24°C



Obrázek 40: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% hydroxidu barnatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

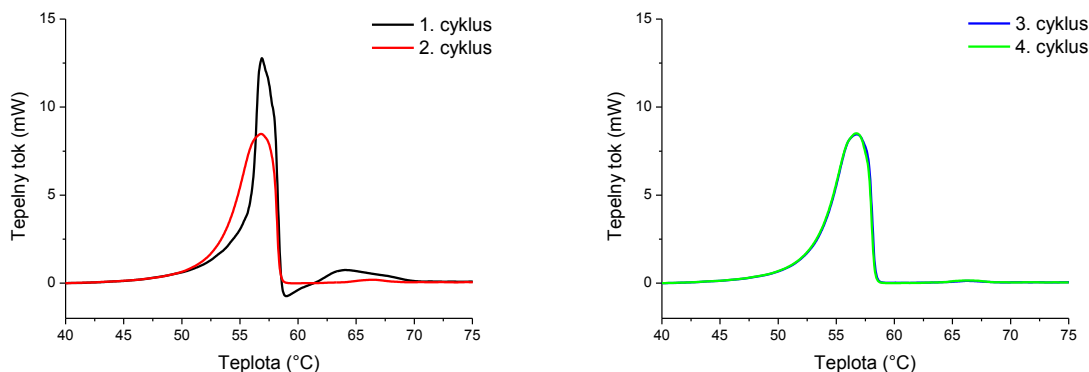
Při cyklech chlazení (Obrázek 41) jsou píky krystalizace mezi teplotami 44-45°C a to i při dalších cyklech, kdy se teplota krystalizace pohybovala okolo 44,91°C. Těmto hodnotám tání a krystalizace odpovídá podchlazení 9,33 °C, které má více než poloviční hodnotu oproti čistému CoNHH.



Obrázek 41: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% hydroxidu barnatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

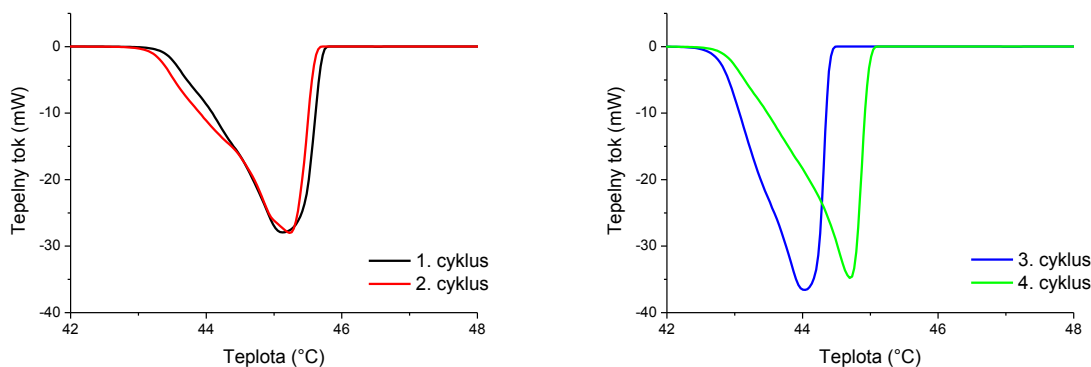
Oxid vápenatý

Příprava vzorku pro měření a jeho vlastnosti byli stejné jako u oxidu vápenatého při rychlosti ohřevu 10°C/min (str. 46). Při ohřevu CoNHH s 1hm% oxidu vápenatého (Obrázek 42) také došlo k potlačení sekundárních efektů jako u CoNHH s 1hm% hydroxidu barnatého (Obrázek 40). Hodnota teploty tání, krystalizace i změny entalpie jsou o něco nižší než hydroxidu barnatého (viz. Tabulka 9)



Obrázek 42: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

Při chlazení CoNHH s 1hm% oxidu vápenatého (Obrázek 43) je zřejmý složený tvar píku. Doběhová hra je příliš dlouhá a je na ní znát přítomnost dalšího píku. Tento efekt však nemá vliv na podchlazení, jelikož teplota krystalizace odpovídá onsetu náběhové hrany. Proto je podchlazení ještě nižší než u předchozího hydroxidu barnatého a to 9,15°C.



Obrázek 43: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

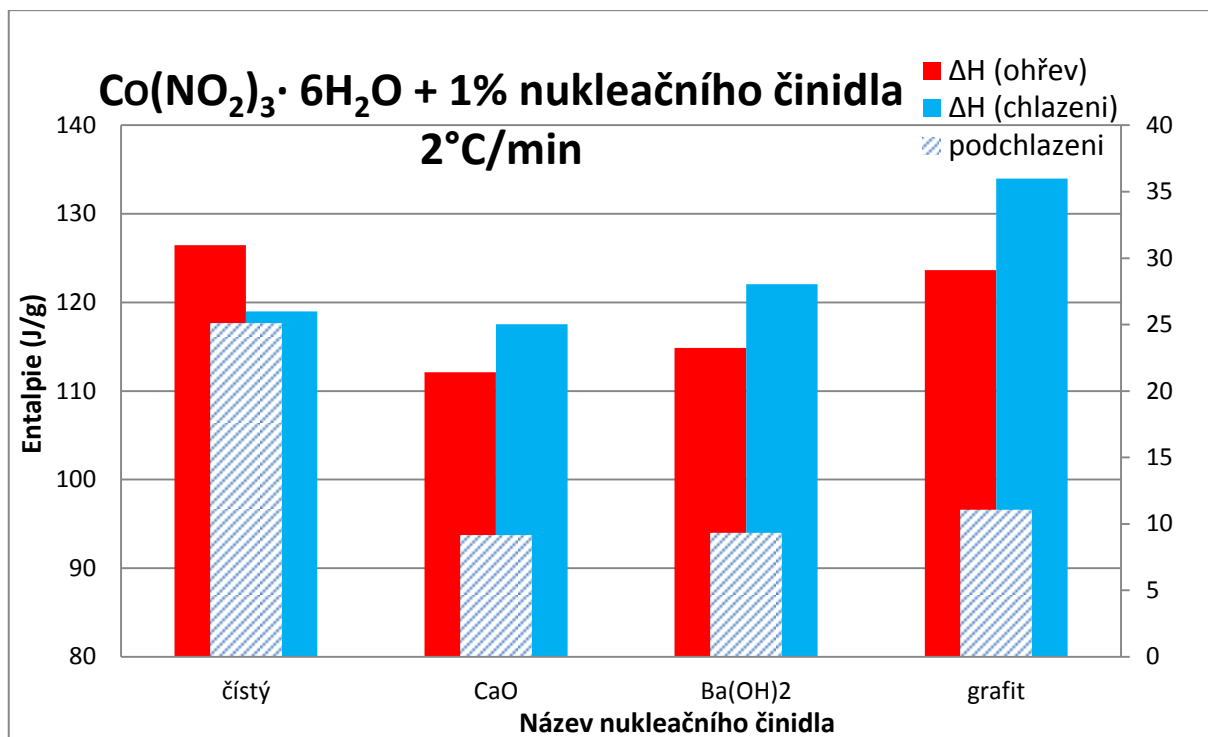
V tabulce jsou uvedeny hodnoty pro výše zmíněná nukleační činidla, dále pro čistý CoNHH při rychlosti ohřevu 2°C/min a CoNHH s 1hm% grafitu, který nebyl vybrán k bližšímu prozkoumání z důvodu neideálních hodnot podchlazení s obrovskou chybou a také neschopnosti potlačit sekundární děje.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty teplot a entalpií s odchylkami pro dusičnan kobaltnatý hexahydrát s 1hm% nukleačního činidla při rychlosti ohřevu 2°C/min. Uvedené hodnoty jsou průměry z druhého až desátého cyklu ohřevu/chlazení.

Látka	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔT (°C)
Čistý	$54,34 \pm 0,11$	$126,46 \pm 4,03$	$29,23 \pm 2,20$	$118,97 \pm 4,27$	$25,11 \pm 2,18$
CaO	$52,97 \pm 0,12$	$112,11 \pm 3,16$	$43,82 \pm 1,21$	$117,52 \pm 0,32$	$9,15 \pm 1,11$
Ba(OH) ₂	$54,24 \pm 0,03$	$114,88 \pm 0,63$	$44,91 \pm 0,47$	$122,04 \pm 0,23$	$9,33 \pm 0,47$
Grafit	$54,59 \pm 0,03$	$123,63 \pm 1,72$	$43,53 \pm 5,10$	$133,99 \pm 2,14$	$11,06 \pm 4,46$

Dále v grafu (Obrázek 44) jsou uvedeny hodnoty entalpií čistého CoNHH při rychlosti ohřevu 2°C/min v porovnání s příměsemi 1hm% nukleačních činidel z předchozí tabulky. Jak je vidět v grafu hodnoty hydroxidu barnatého a oxidu vápenatého jsou si velmi podobné.

Grafit však zřetelně převyšuje všechny ostatní nukleační činidla v hodnotách změny entalpie krystalizace $\Delta H_c = 133,99$ J/g, však grafit nedokázal potlačit sekundární děje, proto není vhodný jako nukleační činidlo.



Obrázek 44: Graf dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu jak čistého tak ve srovnání s přidávkou 1hm% nukleačních činidel s rychlostí ohřevu 2°C/min

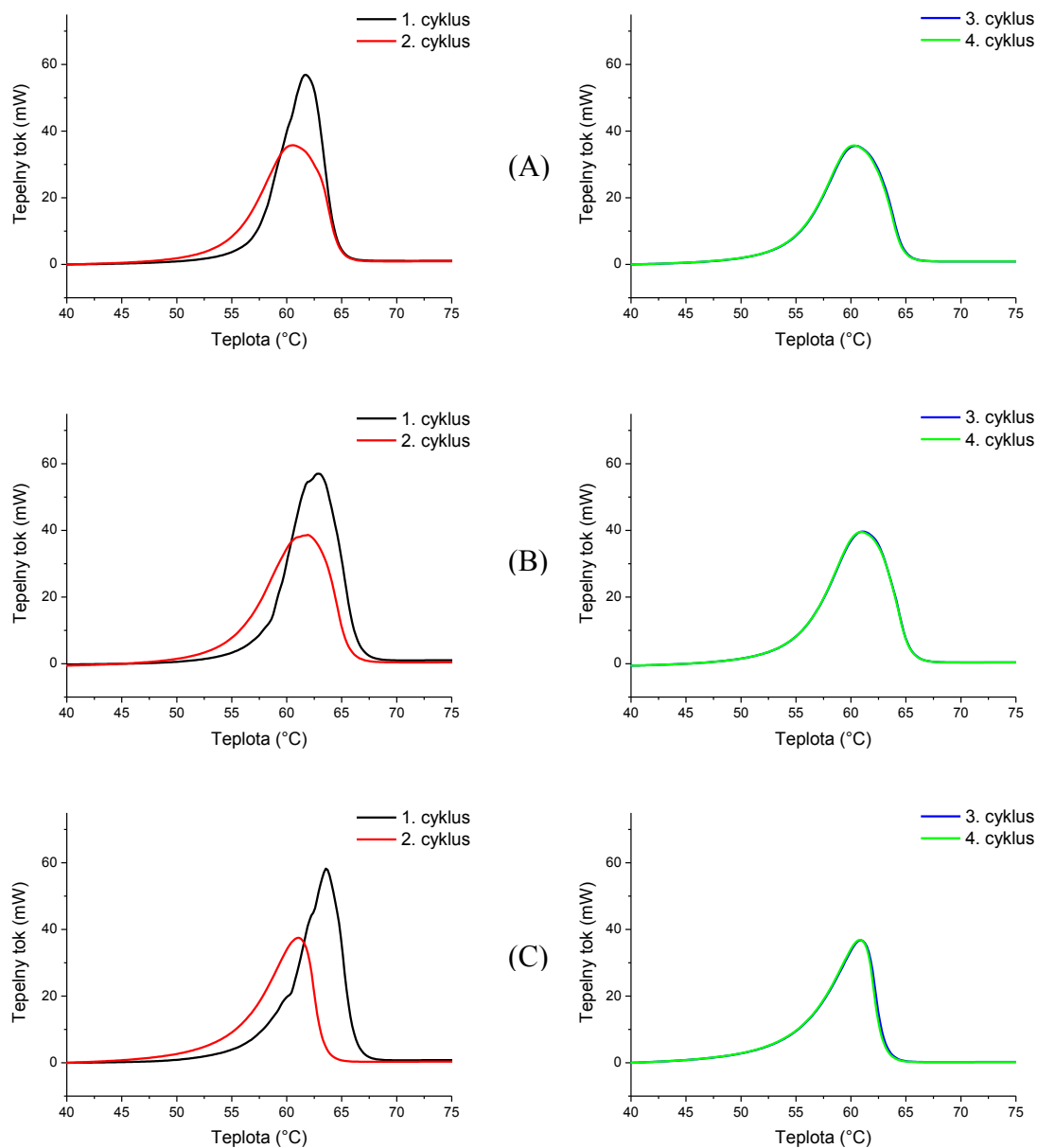
3.1.3. Směsi nukleačních činidel

Protože žádná použitá nukleační činidla nedokázala dostatečně potlačit podchlazení CoNHH bylo nutné přejít ke směsím nukleačních činidel pro zlepšení jejich vlastností. Do směsí byla volena nukleační činidla, která sama dokázala zlepšit vlastnosti CoNHH.

Směs oxidu barnatého s oxidem hořečnatým

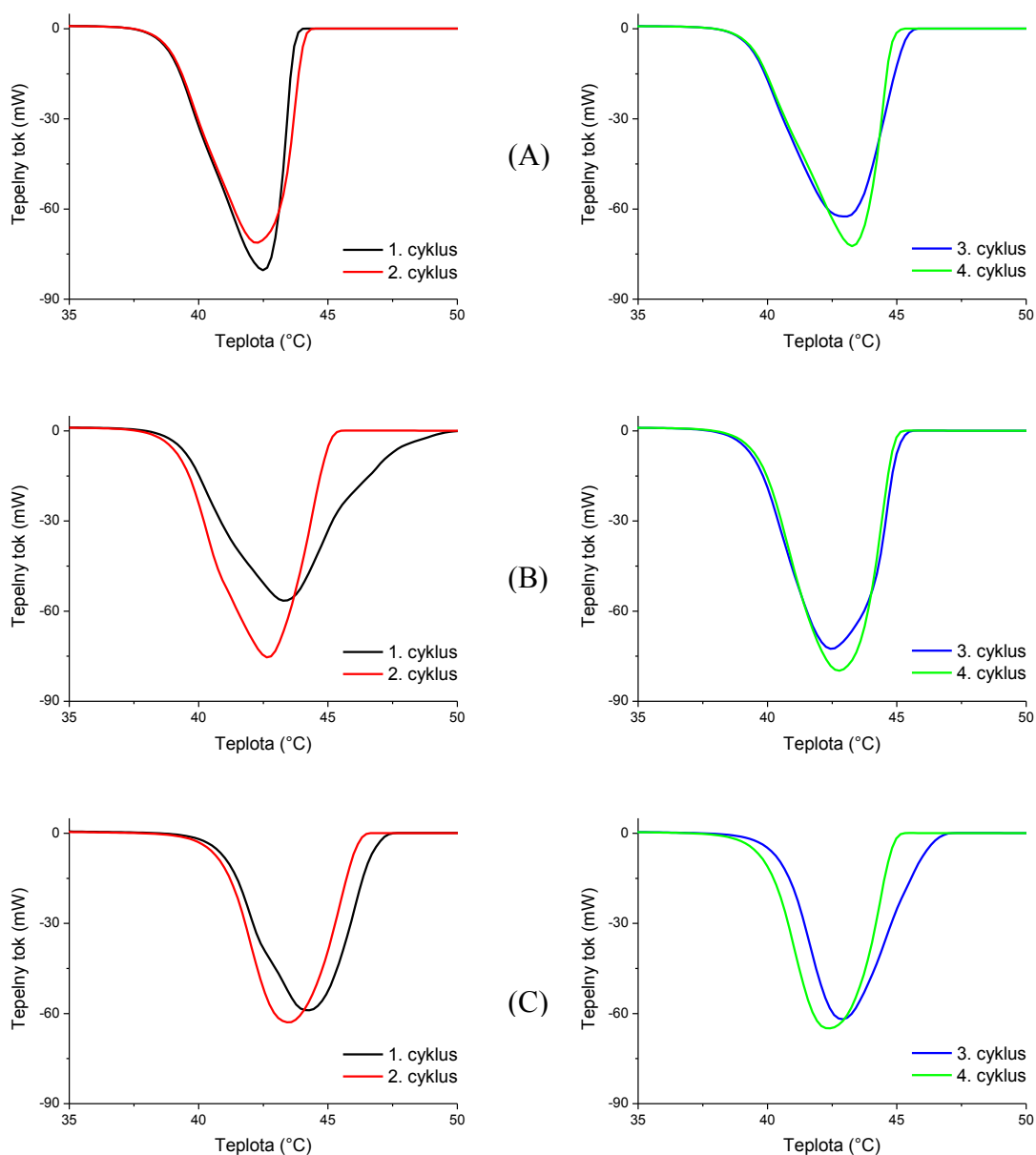
Při přípravě směsi oxidu barnatého s oxidem hořečnatým v achátové třecí misce v hmotnostním poměru 1:1 byl zřejmý objemový nepoměr nukleačních činidel, kdy oxidu hořečnatého bylo několikanásobně větší množství, proto směs musela být homogenizována ve třecí misce 5min. Pro vytvoření tří různých vzorků pro měření na DSC bylo přidáno k CoNHH 0,5hm%, 1hm% a 2hm% takto připravené směsi nukleačních činidel. Každý takto vytvořený vzorek byl homogenizován v achátové misce 2min.

Z teplotních cyklů ohřevu (Obrázek 45) je zřejmé, že nezáleží na obsahu nukleáčních činidel, pokud bude 0,5hm% nebo 1hm%. Pokud však zvýšíme obsah směsi nukleáčních činidel na 2hm% dojde ke snížení entalpie tání CoNHH o 17 J/g oproti CoNHH s 1hm% směsi nukleáčních činidel. Obsah nukleáčního činidla má však pouze malý vliv na teplotu tání kdy rozdíl je okolo 0,3°C.



Obrázek 45: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s obsahem A 0,5hm% B 1hm% a C 2hm% směsi nukleáčních činidel oxidu barnatého a oxidu hořečnatého v poměru 1:1

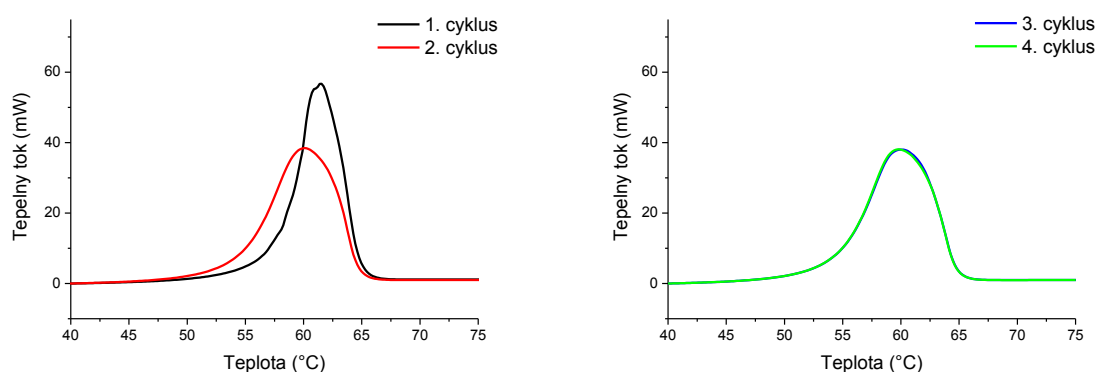
Cykly chlazení (Obrázek 46) pro jednotlivé obsahy nukleačních činidel se téměř nemění, proto lze usuzovat pro tuto směs, že velikost podchlazení nezávisí na obsahu směsi nukleačních činidel do obsahu 2hm%. Velikosti podchlazení měli všechny vzorky $\Delta T = 10 \pm 0,3^\circ\text{C}$. Jedinou proměnou byla změna entalpie krystalizace, která byla nejvyšší ($\Delta H_c = 119,86 \text{ J/g}$) pro obsah směsi ve vzorku 1hm% a naopak nejnižší ($\Delta H_c = 102,87 \text{ J/g}$) pro obsah směsi 2hm% v CoNHH.



Obrázek 46: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s obsahem A 0,5hm% B 1hm% a C 2hm% směsi nukleačních činidel oxidu barnatého a oxidu hořečnatého v poměru 1:1

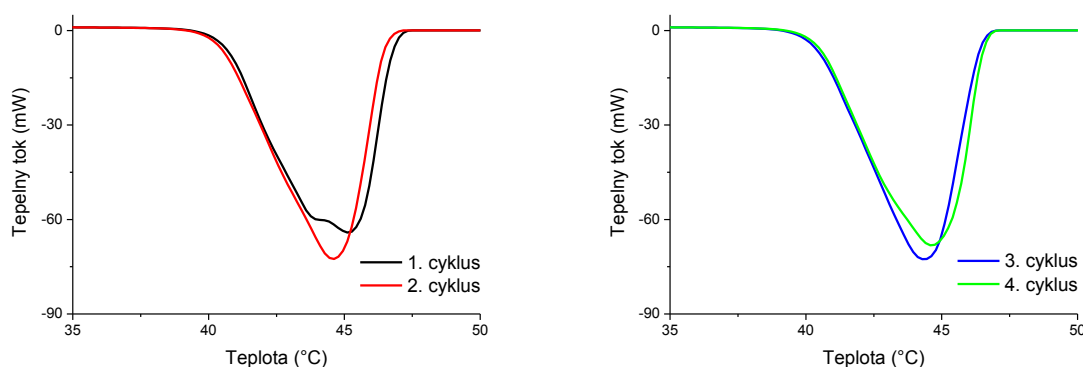
Směs grafitu s oxidem hořečnatým

Směs grafitu s oxidem hořečnatým by měla podle dosavadních výsledků velice snížit podchlazení a zachovat velké změny entalpií. Obě tato nukleační činidla mají velkou hustotu, proto jejich směs byla hmotnostně a téměř i objemově 1:1. Dvou minutová homogenizace v achátové misce byla dostatečná pro dokonalé promísení. Po přidání 1hm% nukleačního činidla k čistému CoNHH došlo ke vzniku sypké nelepivé směsi. Zde musela být homogenizace v achátové třecí misce delší z důvodu velkého objemu nukleačního činidla (5 min). Takto vytvořený vzorek při cyklech ohřevu (Obrázek 47) tál při teplotě 54,67°C. Pík se s cykly neměnil, čemuž napovídá i odchylka teploty tání 0,02°C



Obrázek 47: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s obsahem 1hm% směsi grafitu a oxidu hořečnatého v poměru 1:1

Při cyklech chlazení (Obrázek 48) se vzorek též projevoval stabilně a nedocházelo k výraznému posunu teploty krystalizace ($T_c = 45,86^\circ\text{C}$). Díky takto stabilním cyklům došlo k snížení podchlazení až na 7,81°C. Tato hodnota odpovídá nejlepšímu dosaženému snížení podchlazení v této práci.



Obrázek 48: Teplotní cykly chlazení dusičnanu kobaltnatého hexahydrátu s obsahem 1hm% směsi grafitu a oxidu hořečnatého v poměru 1:1

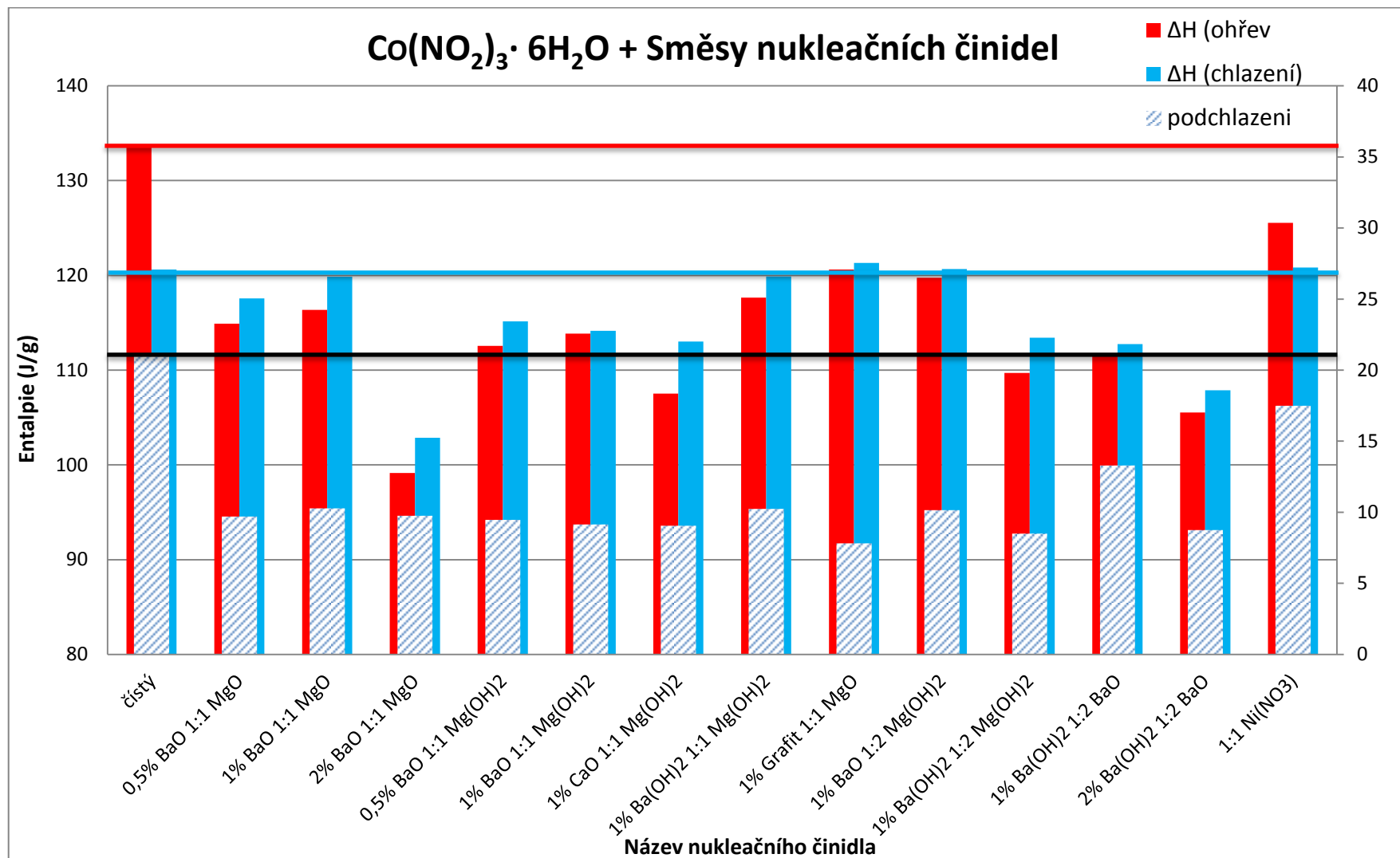
Kromě směsí, které byly vybrány a zmíněných na předchozích stranách byl CoNHH smíchán také s dalšími směsmi nukleačních činidel v poměru 1:1 (50/50%) nebo 1:2 (33/66%), které byly homogenizovány v achátové třecí misce po dobu nejméně dvou minut podle charakteru směsi. Vzorek pro měření byl vytvořen smícháním CoNHH s půl, jedním nebo dvěma hmotnostními procenty směsi nukleačních činidel v achátové třecí misce. Tato směs byla homogenizována nejméně po dobu dvou minut.

Srovnání všech hodnot získaných z cyklů ohřev/chlazení všech měřených vzorků rychlostí ohřevu 10°C/min je uvedeno v Tabulka 10. Pro srovnání jsou zde uvedeny i hodnoty čistého CoNHH.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty teplot a entalpií s odchylkami pro dusičnan kobaltnatý hexahydrát s 0,5; 1 nebo 2 hm% směsi nukleačních činidel. Uvedené hodnoty jsou průměry z druhého až čtvrtého cyklu ohřevu/chlazení.

Látka	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔT (°C)
Čistý	54,58 ± 0,06	133,58 ± 0,89	33,54 ± 1,79	-120,62 ± 3,00	21,04 ± 1,77
0,5% BaO 1:1 MgO	54,91 ± 0,03	114,89 ± 0,07	45,22 ± 0,37	-117,56 ± 0,10	9,69 ± 0,63
1% BaO 1:1 MgO	55,23 ± 0,04	116,35 ± 0,34	44,97 ± 0,18	-119,86 ± 0,12	10,26 ± 0,16
2% BaO 1:1 MgO	54,92 ± 0,05	99,14 ± 0,20	45,18 ± 0,04	-102,87 ± 0,38	9,75 ± 0,64
0,5% BaO 1:1 Mg(OH) ₂	56,14 ± 0,01	112,55 ± 0,19	46,68 ± 0,10	-115,13 ± 0,27	9,45 ± 0,18
1% BaO 1:1 Mg(OH) ₂	54,28 ± 0,07	113,85 ± 0,55	45,14 ± 0,30	-114,14 ± 0,10	9,14 ± 0,25
1% CaO 1:1 Mg(OH) ₂	53,82 ± 0,06	107,52 ± 0,17	44,78 ± 0,07	-113,01 ± 0,09	9,04 ± 0,27
1% Ba(OH) ₂ 1:1 Mg(OH) ₂	55,21 ± 0,06	117,66 ± 0,22	44,98 ± 0,18	-119,89 ± 0,10	10,23 ± 0,15
1% Grafit 1:1 MgO	54,67 ± 0,02	120,61 ± 0,19	46,86 ± 0,17	-121,30 ± 0,05	7,81 ± 0,89
1% BaO 1:2 Mg(OH) ₂	56,42 ± 0,04	119,76 ± 0,20	46,27 ± 0,49	-120,67 ± 0,11	10,15 ± 0,61
1% Ba(OH) ₂ 1:2 Mg(OH) ₂	54,22 ± 0,05	109,70 ± 0,51	45,74 ± 0,09	-113,42 ± 0,08	8,49 ± 0,45
1% Ba(OH) ₂ 1:2 BaO	54,34 ± 0,02	111,78 ± 0,05	41,07 ± 0,30	-112,74 ± 0,16	13,28 ± 0,53
2% Ba(OH) ₂ 1:2 BaO	53,17 ± 0,07	105,53 ± 0,26	44,42 ± 0,31	-107,86 ± 0,15	8,74 ± 0,29
1:1 Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	54,67 ± 0,00	125,55 ± 1,44	37,18 ± 0,13	-120,83 ± 0,20	17,49 ± 1,41

V grafu (Obrázek 49) jsou uvedeny hodnoty z tabulky pro lepší přehlednost a srovnání, jsou zde zobrazeny tři základní sloupce, odpovídající hodnotám pro čistý CoNHH a to červená odpovídá hodnotě změny entalpie ohřevu 133,58 J/g, modrá hodnotě (absolutní hodnotě) změny entalpie chlazení 120,62 J/g a černá odpovídá podchlazení 21°C. Lze tak snadno pozorovat, které směsi zlepšily a které zhoršily vlastnosti původní látky. Je zřejmé, že původní změně entalpie při ohřevu se nepřiblížila žádná z měřených směsí. Pokud budeme vycházet z původní změny entalpie při chlazení, nejlépe se této hodnotě přiblížily vzorky s 1hm% směsí grafitu a oxidu hořečnatého, 1hm% směsí oxidu barnatého a hydroxidu hořečnatého a vzorek kde byly CoNHH a NiNHH v poměru 1:1.

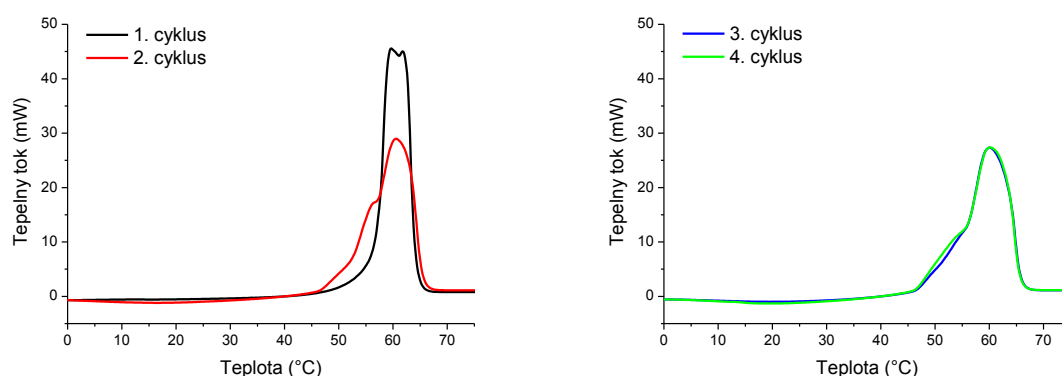


Obrázek 49: Graf dusičnanu kobaltnatého jak čistého tak ve srovnání s přidavky 0,5-2hm% směsí nukleačních činidel uvedených v grafu

3.2. Dusičnan nikelnatý hexahydrát

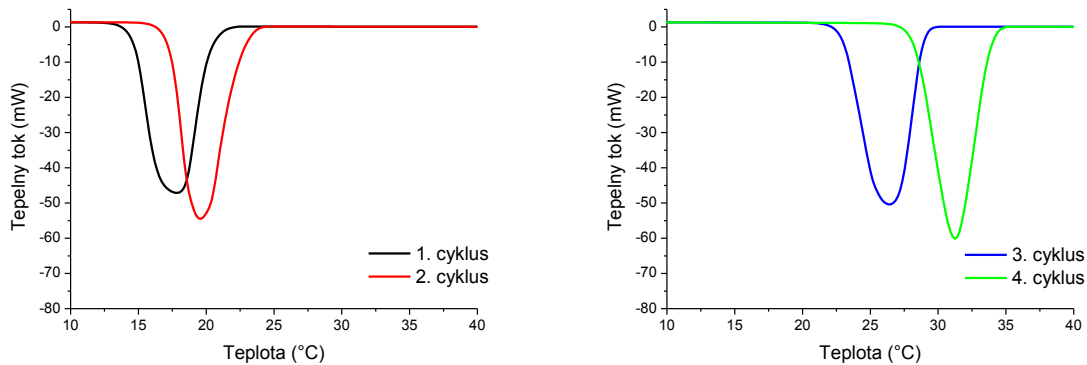
Další studovanou látkou pro teplotní cykly ohřev/chlazení byl dusičnan nikelnatý hexahydrát. Tato látka byla studována za stejných podmínek a vyhodnocována stejnými metodami jako CoNHH v kapitole 3.1 s tím rozdílem, že bylo měřeno vždy 10 cyklů. V grafech jsou vždy uvedeny pouze první čtyři, ale v Tabulka 11 jsou počítány průměry a odchylky z druhého až desátého píku.

Z teplotních cyklů ohřevu NiNHH (Obrázek 50) je zřejmé, že se čistá látka při ohřevu nechová ideálně. Na píku pro čtvrtý cyklus je zpočátku exotermní propad okolo 20°C, který je nejspíš způsoben změnou krystalického uspořádání vody v hydrátu. Dále náběhová hrana píku není ideální a na píku, který odpovídá druhému cyklu ohřevu, je viditelná přítomnost hned tří piků sloučených do jednoho. I přes tyto nedokonalosti si látka drží stabilní teplotu tání 54,33°C a změnu entalpie tání NiNHH $\Delta H = 135,24 \text{ J/g}$



Obrázek 50: Teplotní cykly ohřevu čistého hexahydrátu dusičnanu nikelnatého

Při cyklech chlazení (Obrázek 51) se teplota tání měnila s každým cyklem, ale jak vyplývá z Tabulka 11 teplota tání se ustálila na hodnotě 33,22°C což odpovídá čtvrtému píku. Podchlazení čistého NiNHH dosáhlo hodnoty $\Delta T = 21,11^\circ\text{C}$. Tato hodnota je srovnatelná s hodnotou podchlazení čistého CoNHH $\Delta T = 21,04^\circ\text{C}$. Díky velké podobnosti obou hexahydrátů byla volena i stejná nukleační činidla, aby bylo možné hydráty mezi sebou porovnat.



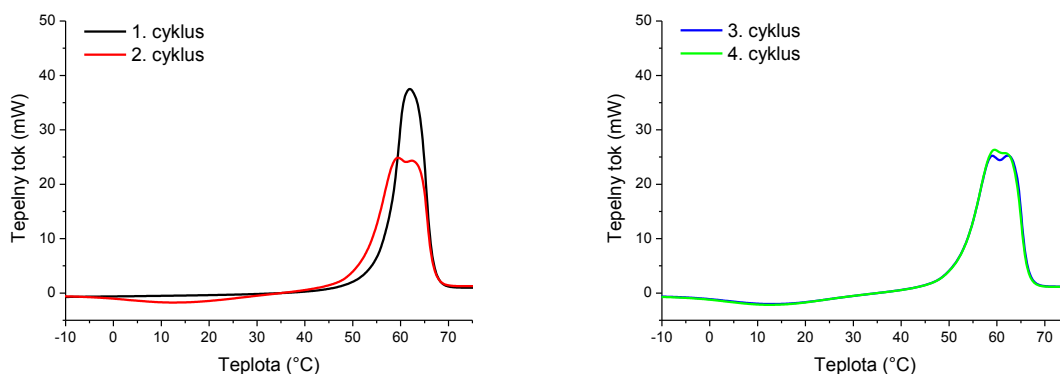
Obrázek 51: Teplotní cykly chlazení čistého hexahydrátu dusičnanu nikelnatého

3.2.1. Přídavek jednoho nukleačního činidla

Oxid barnatý

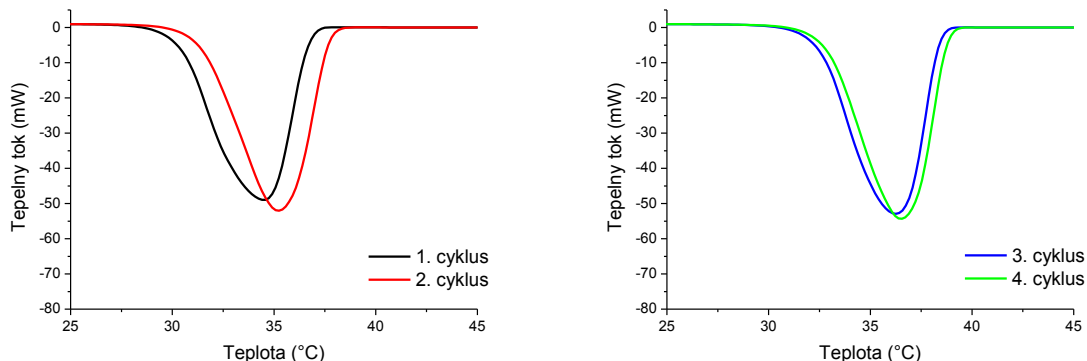
Oxid barnatý má velkou hustotu, proto při míchání 1hm% v achátové třecí misce s NiNHH je nutná delší doba homogenizace (5 min) z důvodu malého objemu oxidu barnatého. Směs v achátové třecí misce byla homogenní, ale ne zcela sypká, krystaly měly tendenci držet v jednom kuse.

Při teplotních cyklech ohřevu (Obrázek 52) dochází k výraznému exotermnímu propadu okolo teploty 14°C. Dále rozdvojení hlavního píku tání na dva píky - z grafu jsou zřetelná dvě maxima. Teplota tání se drží na hodnotě 52,3°C která se s dalšími cykly prakticky nemění.



Obrázek 52: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu barnatého

Při cyklech chlazení (Obrázek 53) se pík mění jen minimálně jak je zřejmé z grafu. Teplotě tání $38,3^{\circ}\text{C}$ odpovídá podchlazení 14°C , které je sice nižší než u čistého NiNHH, ale není dostatečně nízké pro praktické využití.

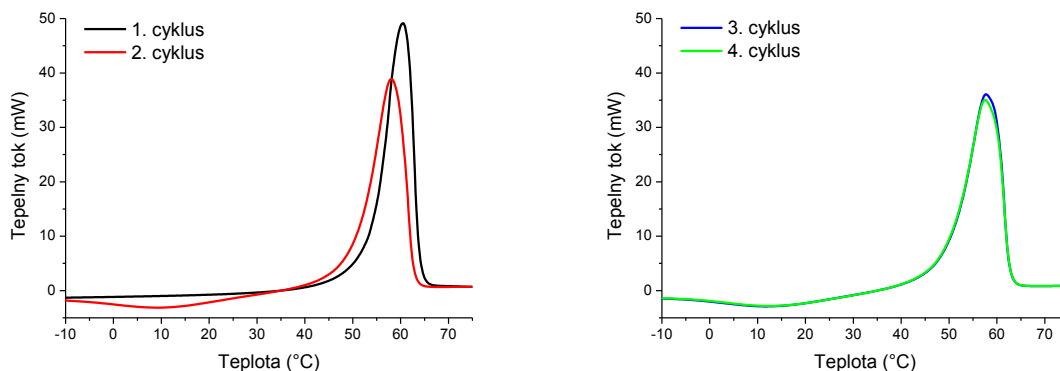


Obrázek 53: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu barnatého

Oxid vápenatý

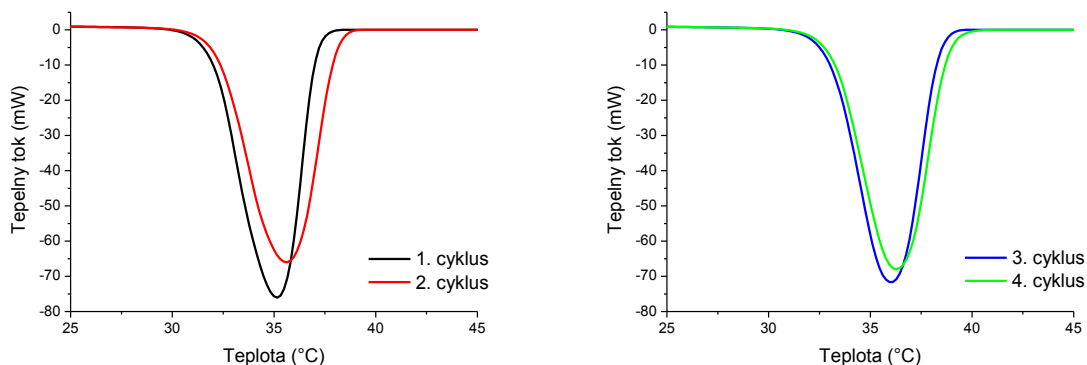
Jak již bylo řečeno u směsi oxidu vápenatého s CoNHH, oxid vápenatý je pro vznik homogenní směsi ideální. Proto při přidavku 1hm% nukleačního činidla k NiNHH a zhomogenizování v achátové třecí misce po dobu dvou minut dojde k dokonalému promísení a vzniku sypké nelepící se směsi.

Při cyklech ohřevu NiNHH (Obrázek 54) dojde ke vzniku velkého stabilního píku s teplotou tání $50,37^{\circ}\text{C}$ čili dojde ke snížení teploty o 4 stupně oproti čistému NiNHH. Navzdory stabilnímu píku dochází zde k velmi výraznému exotermnímu propadu při 10°C . Tento jev se projevuje již u čistého NiNHH (Obrázek 50), ale pouze v malé míře, zde se projevuje velkým propadem při nízké teplotě.



Obrázek 54: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého

Při cyklech chlazení (Obrázek 55), nedochází k žádnému zajímavému efektu, pík vypadá stabilně s teplotou tání 38,4°C. Této teplotě odpovídá jedno z nejmenších naměřených podchlazení $\Delta T = 11,96^\circ\text{C}$. Takto vysoké podchlazení však není vhodné ani žádoucí proto je oxid vápenatý v obsahu 1hm% nevhodným činidlem pro NiNHH.

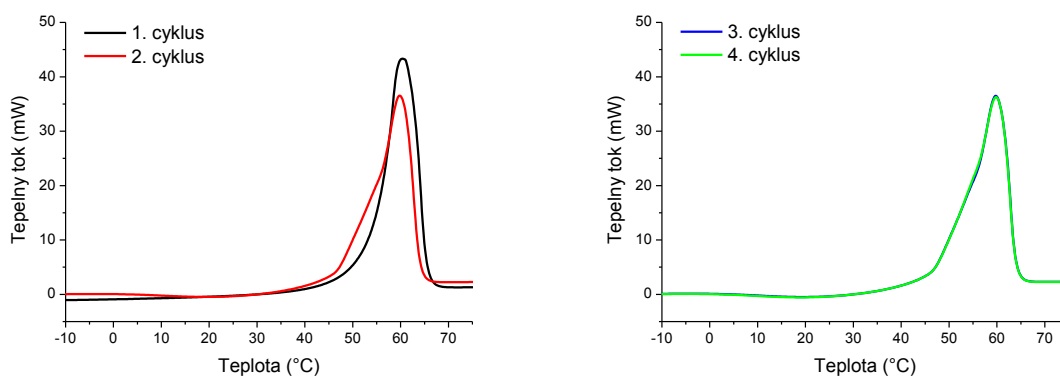


Obrázek 55: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého

Hydroxid vápenatý

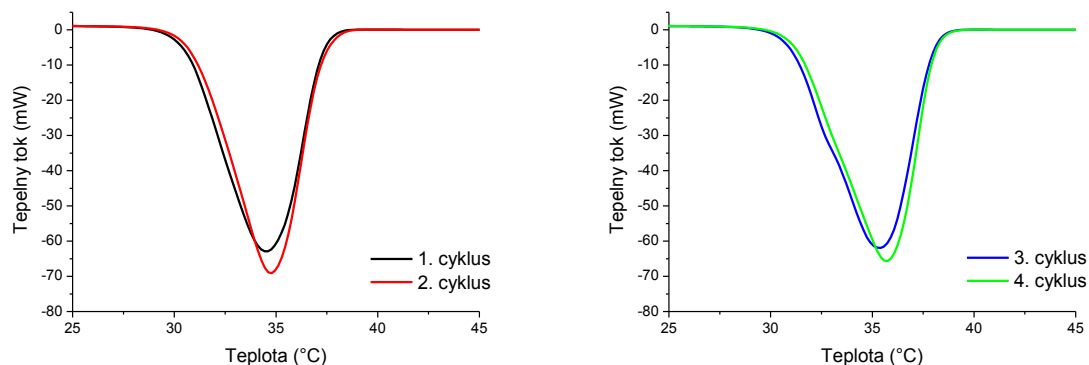
Při míchání 1hm% hydroxidu vápenatého s NiNHH docházelo k uvolňování hydrátové vody formou malých kapek na achátové třecí misce při homogenizace. Proto byla nutná velká opatrnost při míchání, které trvalo asi 10 min, a co nejchladnější prostředí.

Teplotní cyklus ohřevu NiNHH s 1hm% hydroxidu vápenatého (Obrázek 56) velmi připomíná graf čistého NiNHH (Obrázek 50), jak malým exotermním propadem tak dlouhou náběhovou hranou píku, avšak teplota tání je o více než 2°C (viz. Tabulka 11) nižší než u čistého NiNHH.



Obrázek 56: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% hydroxidu vápenatého

Při cyklech chlazení (Obrázek 57) je pík krystalizace roztažený s dlouhou doběhovou hranou, která však neovlivňuje teplotu krystalizace NiNHH s 1hm% hydroxidu vápenatého 37,79°C. Teplota krystalizace je podobná jako u směsi s oxidem barnatým jako nukleačním činidlem $\Delta T = 14,23^\circ\text{C}$.

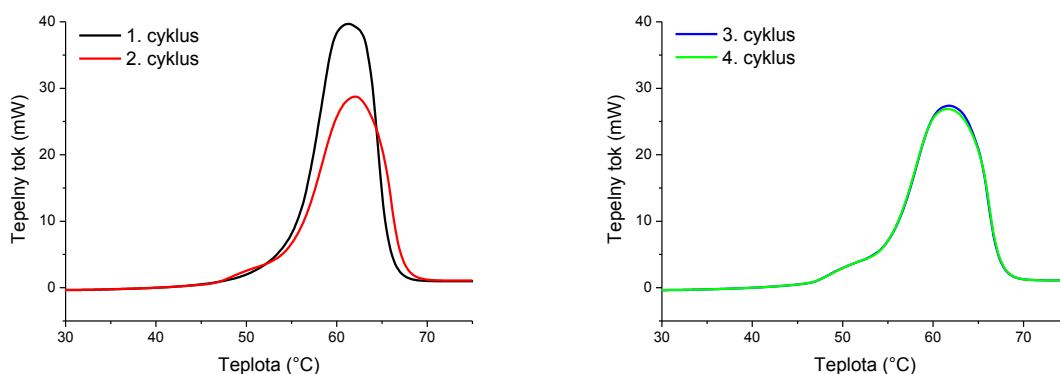


Obrázek 57: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% hydroxidu vápenatého

Grafit

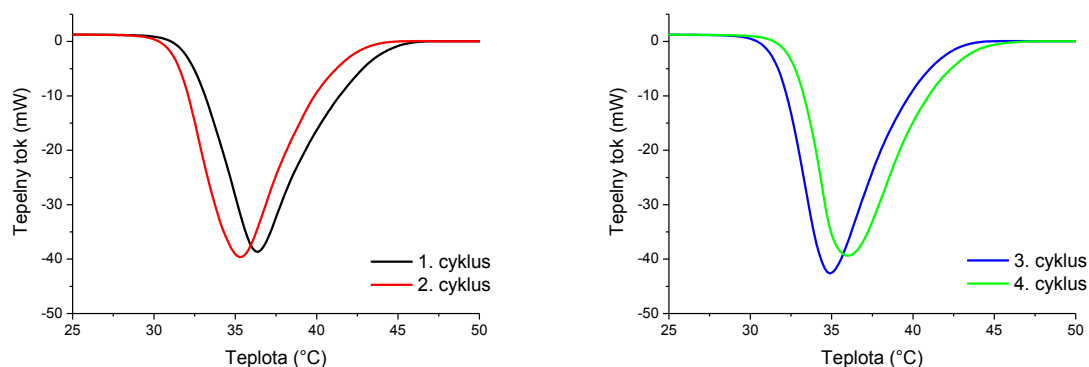
Grafit má velmi malou hustotu proto při mísení 1hm% s NiNHH je ho dostatečné množství k obalení všech krystalků NiNHH a dokonalému promísení v achátové třecí misce během dvou minut. Směs byla černě zbarvena kvůli přítomnosti grafitu, avšak sypká a jen mírně lepivá.

Při cyklech ohřevu (Obrázek 58) byl potlačen exotermní propad, ale při náběhu píku je zřejmí další endotermní pík, který je spojen s hlavním píkem a při odečtu teploty tání ($T_m = 54,67^\circ\text{C}$) mohl ovlivnit odečtenou teplotu tání látky.



Obrázek 58: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% grafitu

I když se teplota tání píku při jednotlivých cyklech (Obrázek 59) drobně mění, z grafu není patrná teplota krystalizace, která je 40,74°C. Z polohy maxima okolo 36°C by měla být teplota krystalizace nižší, avšak kvůli dlouhé náběhové hraně píku je teplota krystalizace posunuta a při odečtu vykazuje vyšší hodnoty.



Obrázek 59: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% grafitu

Kromě látek vybraných a zmíněných na předchozích stranách byl NiNHH smíchán také s jinými nukleačními činidly, a to vždy s 1hm% nukleačního činidla.

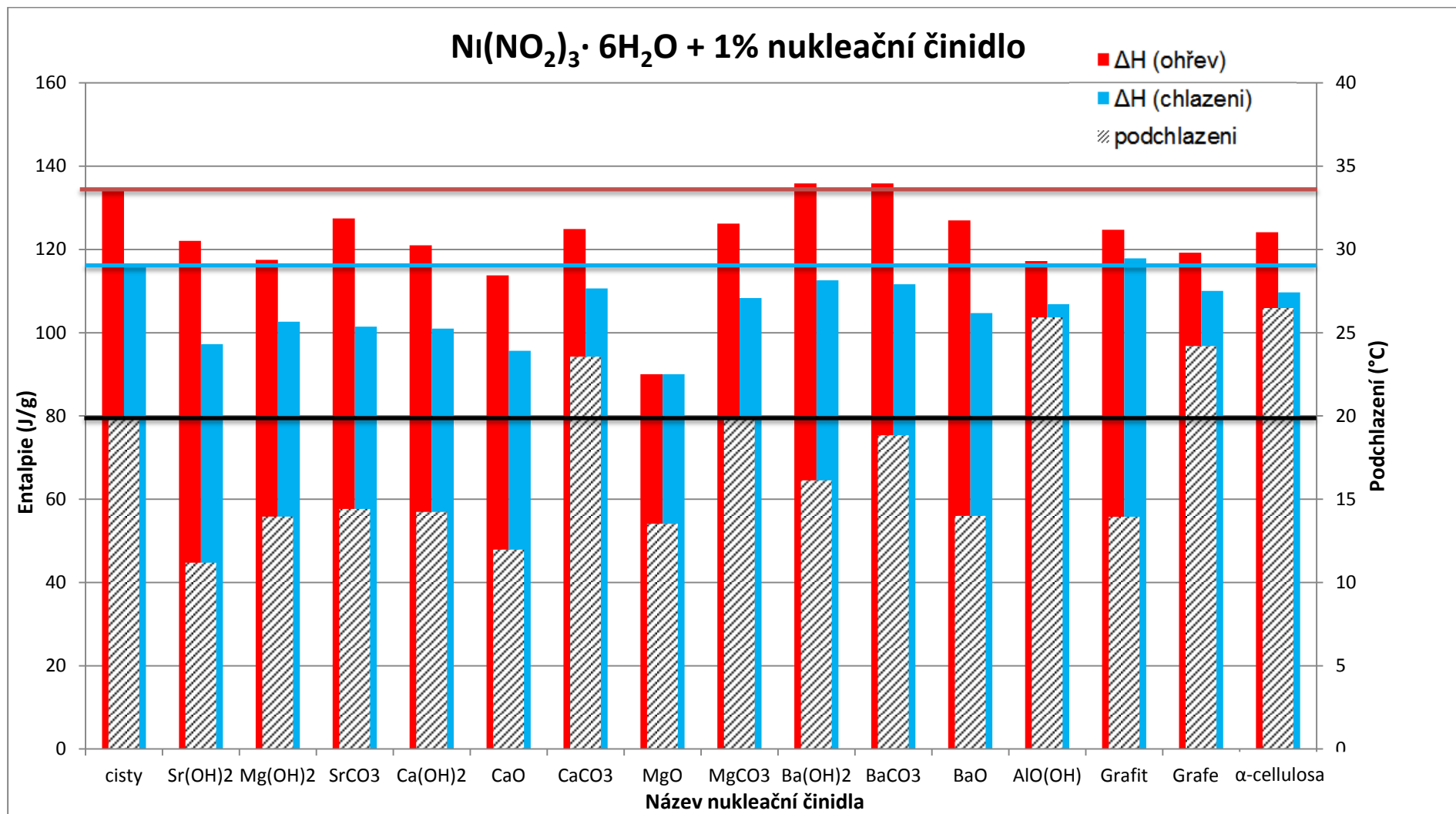
Srovnání všech hodnot získaných z cyklů ohřev/chlazení všech měřených směsí NoNHH s vždy pouze jedním nukleačním činidlem rychlostí ohřevu 10°C/min je uvedeno v Tabulka 11. Pro srovnání jsou zde uvedeny i hodnoty čistého NiNHH.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty teplot a entalpií s odchylkami pro dusičnan nikelnatý hexahydrát s 1hm% nukleačního činidla. Uvedené hodnoty jsou průměry z druhého až čtvrtého cyklu ohřevu/chlazení.

Látka	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔT (°C)
Čistý	54,33 ± 0,03	135,24 ± 0,90	33,22 ± 0,22	-115,94 ± 0,03	21,11 ± 4,29
CaOH	52,02 ± 0,26	121,02 ± 3,97	37,79 ± 0,35	-100,98 ± 0,12	14,23 ± 0,60
CaO	50,37 ± 0,37	113,79 ± 1,70	38,40 ± 0,31	-95,63 ± 0,45	11,96 ± 0,68
CaCO ₃	54,92 ± 0,12	124,93 ± 0,51	31,37 ± 3,13	-110,63 ± 1,36	23,55 ± 3,23
MgO	55,16 ± 0,16	90,06 ± 0,84	41,64 ± 0,11	-90,01 ± 0,33	13,52 ± 0,27
MgCO ₃	54,39 ± 0,20	126,18 ± 4,50	34,57 ± 0,56	-108,31 ± 0,40	19,81 ± 0,76
Ba(OH) ₂	53,98 ± 0,31	135,88 ± 2,09	37,85 ± 0,48	-112,59 ± 0,26	16,13 ± 0,76
BaCO ₃	54,26 ± 0,25	135,86 ± 0,32	35,42 ± 0,75	-111,63 ± 0,12	18,84 ± 0,58
AlOOH	54,66 ± 0,33	117,22 ± 2,23	28,75 ± 1,69	-106,86 ± 0,83	25,91 ± 1,94
grafit	54,67 ± 0,14	124,72 ± 0,59	40,74 ± 0,66	-117,85 ± 0,25	13,93 ± 0,76
grafen	54,88 ± 0,03	119,20 ± 1,77	30,68 ± 0,17	-110,02 ± 0,08	24,20 ± 0,19
BaO	52,30 ± 0,05	126,96 ± 0,60	38,30 ± 0,44	-104,70 ± 0,07	14,00 ± 0,47
α -cellulosa	55,22 ± 0,07	124,15 ± 0,74	28,74 ± 3,93	-109,71 ± 1,84	26,48 ± 3,94
SrCO ₃	54,31 ± 0,25	127,46 ± 0,52	39,96 ± 3,54	-101,47 ± 0,14	14,40 ± 1,25
Sr(OH) ₂	55,01 ± 0,12	122,63 ± 1,13	44,12 ± 1,05	-97,25 ± 1,01	11,19 ± 0,98
Mg(OH) ₂	54,85 ± 0,5	117,52 ± 0,76	41,21 ± 0,13	-102,64 ± 0,45	13,95 ± 0,75

V grafu (Obrázek 60) jsou uvedeny hodnoty pro nukleační činidla a srovnány s čistým NiNHH, jsou zde zobrazeny tři základní sloupce, odpovídající hodnotám pro čistý NiNHH a to červená odpovídá hodnotě změny entalpie ohřevu 135,24 J/g, modrá hodnotě (absolutní hodnotě) změny entalpie chlazení 115,64 J/g a černá odpovídá podchlazení 21,11°C.

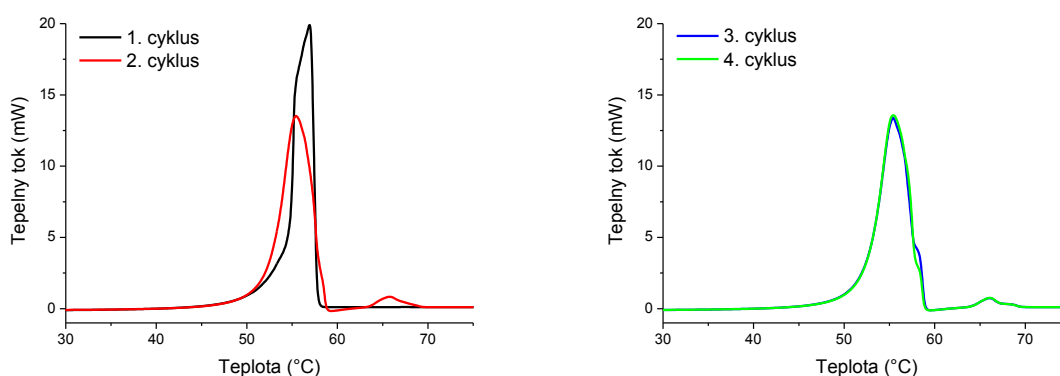
Lze tak snadno pozorovat, které látky zlepšily a které zhoršili vlastnosti původní látky (NiNHH). Je zřejmé, že původní změnu entalpie při ohřevu překonaly směsi s BaCO₃ anebo BaOH, ovšem každý z nich má velkou hodnotu podchlazení, které nebylo dostatečně sníženo. Většina směsí se pouze přiblížila změně entalpie při chlazení čistého NiNHH, tedy k hodnotě 115,64 J/g, ale pouze grafit tuto mez překonal s hodnotou změny entalpie při chlazení 117,85J/g.



Obrázek 60: Graf dusičnanu nikelnatého hexahydrátu jak čistého tak ve srovnání s přidavky 1hm% nukleačních činidel

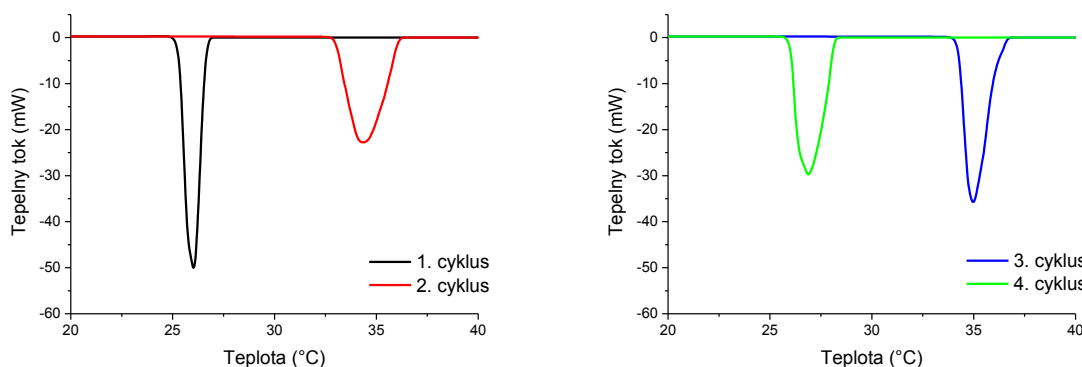
3.2.2. Pomalé cykly

Po proměření čistého NiNHH na DSC při pomalých teplotních cyklech ($2^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ohřev/chlazení, se ukázala při cyklu ohřevu (Obrázek 61) další fázová změna, a to malý endotermní pík za píkem tání. Doběhová hrana píku pro tání je narušena dalším píkem, který je zcela překryt větším píkem. Malý pík ovlivňuje hodnotu podchlazení s teplotou efektu $63,89^{\circ}\text{C}$. Teplota tání čisté látky je přitom pouze $52,49^{\circ}\text{C}$. Hodnota změny entalpie tání při rychlosti ohřevu $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ je $149,21\text{ J/g}$, takže vyšší než při rychlosti $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, která byla $126,46\text{ J/g}$.



Obrázek 61: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu bez nukleačních činidel rychlostí $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Při cyklech chlazení (Obrázek 62) je zřejmá nestabilita jednotlivých cyklů. Tato nestabilita se projevuje na odchylce $1,29^{\circ}\text{C}$ od naměřené teploty krystalizace $37,02^{\circ}\text{C}$. Z takto naměřených hodnot vychází hodnota podchlazení $15,47^{\circ}\text{C}$.

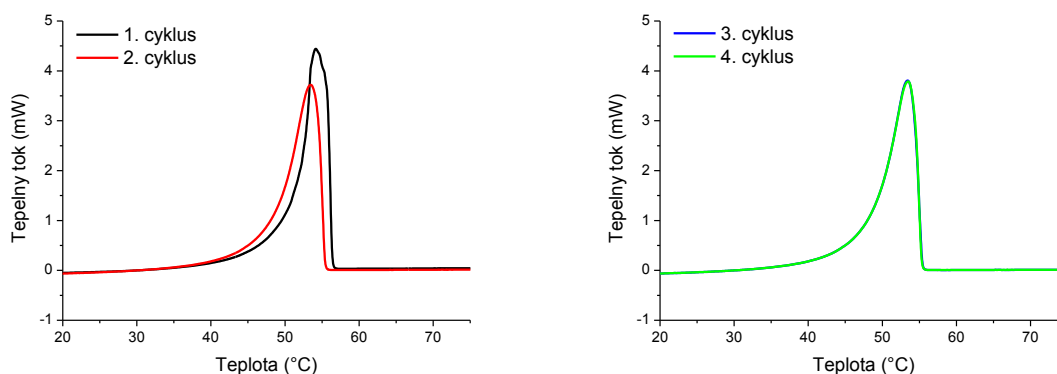


Obrázek 62: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu bez nukleačních činidel rychlostí $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Oxid vápenatý

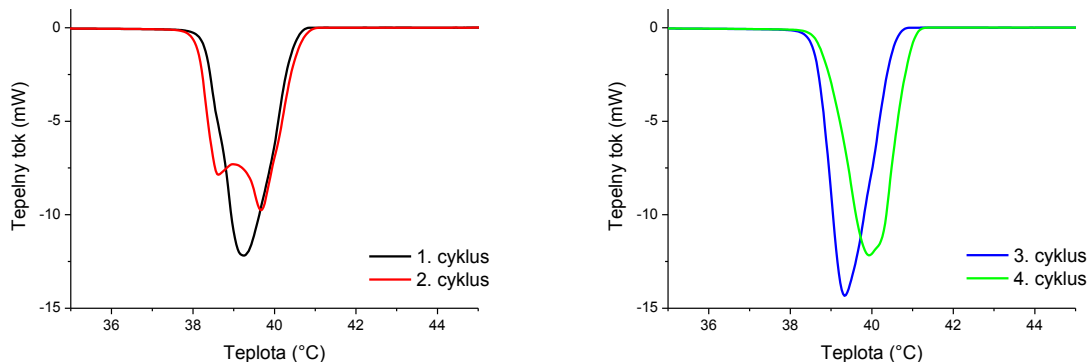
Směs s oxidem vápenatým, jak je uvedeno v odstavci o směsi 1hm% oxidu vápenatého s NiNHH, je dokonale promísená a má dobré sypké a nelepivé vlastnosti. Cyklus ohřevu (Obrázek 63) zobrazuje stabilní pík s prohnutou náběhovou hranou a ostrým maximem píku.

Teplota tání směsi NiNHH s 1hm% nukleačního činidla odpovídá hodnotě 48,64°C. Hodnota změny entalpie tání při rychlosti ohřevu 2°C/min je 99,07 J/g, což je mnohem nižší než u čistého NiNHH bez nukleačních činidel ($\Delta H_m = 149,21$ J/g).



Obrázek 63: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

Při cyklech chlazení (Obrázek 64) došlo hned u druhého píku k rozdělení maxima píku. S dalšími cykly se však píky opět spojily v jeden s teplotou tání 40,65°C. Změna entalpie chlazení byla velmi nízká pouze 90,25 J/g, oproti tomu změna entalpie chlazení čistého NiNHH byla 118,64 J/g. Podchlazení NiNHH s 1hm% oxidu vápenatého bylo relativně nízké 7,98°C avšak za cenu nízké změny entalpií.

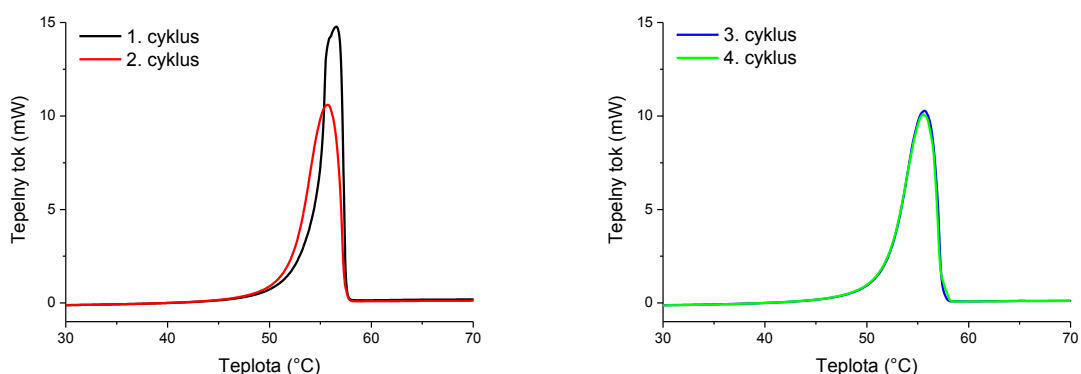


Obrázek 64: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% oxidu vápenatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

Hydroxid strontnatý

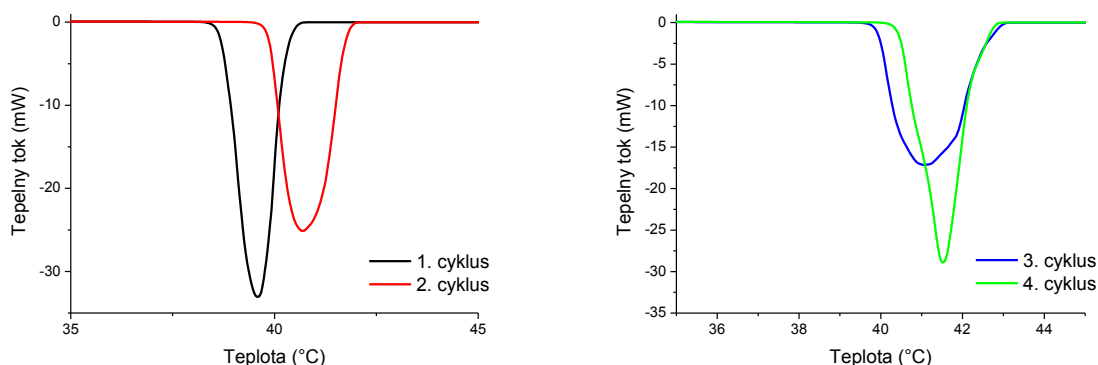
Hydroxid strontnatý se oproti hydroxidu vápenatému daleko lépe homogenizoval. Při smíchání 1hm% v achátové třecí misce s NiNHH byl objem hydroxidu sice malý, ale nedocházelo k nežádoucím jevům jako slepování se nebo vylučování kapek vody na achátové misce.

Z cyklu ohřevu NiNHH s 1hm% hydroxidu barnatého (Obrázek 65) lze usoudit na stabilní pík, který se ustálil na teplotě tání 52,46°C s hodnotou změny entalpie tání 129,52 J/g, což je vyšší než u čistého NiNHH s oxidem vápenatým při rychlosti ohřevu 2°C/min ($\Delta H_m = 99,71$ J/g).



Obrázek 65: Teplotní cykly ohřevu dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% hydroxidu strontnatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

Při cyklech chlazení (Obrázek 66) je zřejmé, že pík se s každým cyklem mění. Teplota krystalizace se pohybuje okolo hodnoty 42,2°C. Podchlazení při pomalých cyklech NiNHH s 1hm% hydroxidu strontnatého (10,51°C) je větší než u cyklů se směsí NiNHH s 1hm% oxidu vápenatého (7,98°C). Na úkor podchlazení však změna entalpie chlazení byla vyšší (111,24 J/g) než změna entalpie chlazení směsi NiNHH s 1hm% oxidu vápenatého (90,25 J/g).



Obrázek 66: Teplotní cykly chlazení dusičnanu nikelnatého hexahydrátu s 1hm% hydroxidu strontnatého a rychlostí ohřevu 2°C/min

4. Závěr

Cílem této práce bylo snížení podchlazení hexahydrátů dusičnanu kobaltnatého a nikelnatého prostřednictvím různých nukleačních činidel. Hydráty anorganických solí se jeví v porovnání s ostatními látkami jako vhodná akumulární činidla, protože se vyznačují vyššími hodnotami entalpie tání. Jejich nevýhodou je, že u nich dochází k podchlazení. Podchlazení směsí hexahydrátů s různými nukleačními činidly bylo stanoveno prostřednictvím teplotních cyklů ohřev/chlazení na kalorimetru DSC Pyris 1 (Perkin – Elmer, USA)

Teplotní rozsah pro všechny cykly byl $-20 - 80^{\circ}\text{C}$. Teplotní programy byly použity dva pro $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Z důvodu potlačení výskytu podchlazení byly studovány různá nukleační činidla, během čtyř a deseti teplotních cyklů. Ze získaných výsledků vyplývá, že žádné z použitých nukleačních činidel, nepotlačilo výskyt podchlazení ani jedné z látek dostatečně, aby bylo možné ji využít pro komerční využití. Neoptimálnějších výsledků bylo dosaženo u hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého a to s 1hm% směsí grafitu a oxidu hořečnatého v poměru 1:1 kdy bylo dosaženo podchlazení $7,8^{\circ}\text{C}$.

5. Použitá literatura

- [1] Trausela, F., Jonga A-J., Cuypersa, R. A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage. *Energy Procedia*. 2014, 48, 447 – 452.
- [2] Tatsidjodoung, P.; Le Pierrès, N.; Luo, L. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, 18, 327.
- [3] R. Velraj, A. Pasupathy, “Phase change material based thermal storage for energy conservation in building Architecture”, Institute for energy studies CEG, Anna University, Chennai
- [4] Sharma, S. D., Sagara, K.: Latent Heat Storage Materials and Systems. *International Journal of Green Energy*, 2: 1–56, 2005. Taylor & Francis Inc. ISSN: 0197-1522..
- [5] <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>
- [6] Huggins, Robert A. Energy storage. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-1024-0.
- [7] <http://faculty.uca.edu/saddison/Thermal2003/FirstLawEnthalpy.pdf>
- [8] Paksoy H. O., NATO Sci. Ser. II Math., 234 (2007) 257.
- [9] <http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-iii/heat-and-thermodynamics/specific-heat.php>
- [10] Wang, X., Lu, E., Lin, W., Liu, T., Shi, Z., Tang, R., Wang, C. (2000). Heat storage performance of the binary systems neopentyl glycol/pentaerythritol and neopentyl glycol/trihydroxy menthylaminomethane as solid phase change materials. *Energy Conservation and Management* 41: 129-134
- [11] Sharma, S.D. a Kazunobu Ssgara. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *International Journal of Green Energy*. 2005-1-1, 2(1), 1-56. DOI: 10.1081/GE-200051299. ISSN 1543-5075
- [12] <http://www.nulovedomy.org/prakticke-informace-a-rady-pro-stavbu/vyuziti-trombeho-steny-v-nulovych-domech.htm>
- [13] Domański, R., Jaworski, M., Rebow, M. Thermal energy storage problems. Institute of Heat Engineering: Warsaw University of Technology 1992. Nr 79
- [14] Verner, C. PHASE CHANGE THERMAL ENERGY STORAGE. 1997. The Department of The Built Environment: University of Brighton, 1997. 105 s
- [15] <http://rgees.com/technology.php>
- [16] <http://www.climatetechwiki.org/sites/ climatetechwiki.org/files/images/extra/classification.jpg>
- [17] Pasupathy, A; Velraj, R; Seeniraj, R (2008). "Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 39–64
- [18] Mehling H., Cabeza L. F., Heat and Cold Storage with PCM, Springer, Berlin, 2008.
- [19] http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9783540685562-c1.pdf?SGWID=0-0-45-562404-p173821439
- [20] <http://www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovych-vzorcich>

- [21] Kraus I., Úvod do strukturní rentgenografie, Akademia, Praha 1985.
- [22] <https://www.colby.edu/chemistry/PChem/lab/DiffScanningCal.pdf>
- [23] Wunderlich, Bernhard. *Thermal analysis of polymeric materials*. Berlin: Springer, c2005. ISBN 3540236295.
- [24] Vaculíková, L., Plevová, E: Identification of clay minerals and micas in sedimentary rocks. *Acta Geodyn. Geomater.* 2005, Vol. 2, No. 2, (138) 165-175.
- [25] http://clab.vscht.cz/ta/vysledky-ta?cookie%5Bonly_desktop%5D=1#
- [26] Blažek, A. *Moderní metody v analytické chemii*. Praha: SNTL Praha, 1972.
- [27] De Jong, A.J., Trausel, F., Finck, C., Van Vliet, L.D., Cuypers, R. SHC 2013, *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*, September 23-25, 2013, Freiburg, Germany, *Energy Procedia* 2014.
- [28] Rathod, K. M. a Banerjee J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, (18), 246–258.
- [29] <https://www.americanelements.com/>
- [30] Brocker, W., Ehrhardt, C., a Gjikaj, M., Système ternaire : H₂O–Fe(NO₃)₃–Co(NO₃)₂ isotherme : 30 °C. *C. R. Chimie*. 2006, 9, 1488-1492.
- [31] Dietz, R., Funk, R., Erochem J., Système ternaire : Löslichkeit einiger salze in wasser. *Der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt*. 1900, 3
- [32] Brocker, W., Ehrhardt, C., a Gjikaj, M., Thermal decomposition of nickel nitrate hexahydrate, Ni(NO₃)₂·6H₂O, in comparison to Co(NO₃)₂·6H₂O and Ca(NO₃)₂·4H₂O. *Thermochimica Acta*. 2007, 432, 64-68.
- [33] Brocker, W., Ehrhardt, C., a Gjikaj, M., Thermal decomposition of cobalt nitrate compounds: Preparation of anhydrous cobalt(II)nitrate and its characterisation by Infrared and Raman spectra *Thermochimica Acta*. 2005, 432, 36-40.
- [34] Ernő Pungor, *A practical guide to instrumental analysis*, Boca Raton, CRC Press, 1995, 384 p. (ISBN 978-0-849-38681-7, OCLC 30736281), p. 181–191
- [35] Title: Knovel Critical Tables (2nd Edition) Table: Thermodynamic Properties of Inorganic Substances
- [36] Handbook of Inorganic Compounds, Second Edition, Dale L. Perry
- [37] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 318-345
- [38] Smithsonian Physical Tables (9th Revised Edition) (1954; 2003)
- [39] Guion, J., Sauzade J.D. a Laügt, M., Critical examination and experimental determination of melting enthalpies and entropies of salt hydrates *Thermochimica Acta*. 1983, 67, 167-179.

6. Přílohy

Příloha I: Tabulka pro hydráty síranů a siřičitanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	453,32	93,8 ¹ , 94,5	$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 683,41 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$, $\Delta\text{Hf} = 103,37 \text{ kJ/kg}$	[39] ¹ , [37]
$\text{BaS}_2\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	333,45	140	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{BaS}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	267,47	x	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	177,13	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CdSO}_4 \cdot 2 \frac{2}{3}\text{H}_2\text{O}$	220,48			
$\text{CdSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	226,47	105		[35]
$\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	352,59	40	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172,17	150	$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 186,23 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$, Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	154,15		$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 123,88 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	
$\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	156,17		$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 178,7 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	
$\text{CaS}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	260,29	45	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	712,54	250	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	404,30	180	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	350,26			
$\text{CrSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	238,13			
$[\text{CrCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	266,34			
$\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	499,30	42 ¹ , 89	$\Delta\text{Hf} = 238,04 \text{ kJ/kg}$	[39] ¹ , [37]
$\text{CoK}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	437,34	75	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	281,10	95,2 ¹ , 41	$\Delta\text{Hf} = 169,72 \text{ kJ/kg}$, Dochází k rozkladu	[39] ¹ , [37]
$\text{CoSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	173,01			
$\text{CuSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	157,01			
$\text{CuSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	153,62			
$\text{Cu}_2\text{SO}_3 \cdot \text{CuSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	386,69			
$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	177,62		$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 130,99 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	249,68	96,5	$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 281,23 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$, $\Delta\text{Hf} = 115,65 \text{ kJ/kg}$	[39]
$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	213,65		$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 205,07 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	
$\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	766,82		Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Eu}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	736,23	375		[37]
$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	169,92	300		[37]
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	278,01	64 ¹ , 60	$\Delta\text{Hf} = 200,2 \text{ kJ/kg}$, Dochází k rozkladu	[39] ¹ , [37]
$\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	746,81	400	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	751,90			
$\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	482,10	30	$\Delta\text{Hf} = 197,82 \text{ kJ/kg}$	[39]
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	561,01	400	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	474,38	91-100	$\Delta\text{Hf} = 184 \text{ kJ/kg}$, Dochází k rozkladu	[37], [37]
$\text{KFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	503,25	33	$\Delta\text{Hf} = 175 \text{ kJ/kg}$	[37]
$\text{K}_2\text{SO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	194,29			[37]
$\text{La}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	728,12		$\text{Cp}_{25^\circ\text{C}} = 636,12 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	
$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	127,96			
$\text{Lu}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	782,24			

MgSO ₄ · H ₂ O	138,38	150	Dochází k rozkladu	[37]
MgSO ₄ · 7H ₂ O	246,47	49,2 ¹ , 150	ΔHf = 202,05 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[39] ¹ , [37]
MgSO ₄ · 2H ₂ O	156,39			
MgSO ₄ · 6H ₂ O	228,45			
MgSO ₄ · 4H ₂ O	192,42			
MgSO ₃ · 3H ₂ O	158,41			
MgSO ₃ · 6H ₂ O	212,46	200	Dochází k rozkladu	[37]
MgS ₂ O ₃ · 6H ₂ O	244,52	170	Dochází k rozkladu	[37]
MnSO ₄ · H ₂ O	169,01			
MnSO ₄ · 4H ₂ O	223,06	38	Dochází k rozkladu	[37]
Mn(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	391,20	84,8	ΔHf = 190,42 kJ/kg	[39]
Nd ₂ (SO ₄) ₃ · 8H ₂ O	720,77			
Ni(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	394,98			
NiSO ₄ · 7H ₂ O	280,86			
NiSO ₄ · 6H ₂ O	262,85	100	Cp _{25°C} = 343,17 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , Dochází k rozkladu	[37]
NaAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	458,28	60		[37]
NaAl(SO ₄) ₂ · 10H ₂ O	422,24	61	ΔHf = 181 kJ/kg	[37]
Na ₂ S ₂ O ₆ · 2H ₂ O	242,13	110	Dochází k rozkladu	[37]
NaHSO ₄ · H ₂ O	138,00	60	ΔHf = 130,4 kJ/kg	[39]
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	322,19	32a	Cp _{25°C} = 587,57 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , ΔHf = 244,197 kJ/kg	[37]
Na ₂ SO ₃ · 7H ₂ O	252,15			
Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	248,17	48,5-50	Cp _{25°C} = 360,74 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , ΔHf = 210 kJ/kg	[37]
NH ₄ Ce(SO ₄) ₂ · 4H ₂ O	422,34			[35]
NH ₄ Cr(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	478,34	94	Dochází k rozkladu	[39]
(NH ₄) ₂ Co(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	395,22	120		[38]
NH ₄ Fe(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	481,19	37		[37]
(NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	392,13	100	Dochází k rozkladu	[37]
(NH ₄) ₂ Ni(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	394,98	96	Dochází k rozkladu	[38]
(NH ₄) ₂ SO ₃ · H ₂ O	134,15	150	Dochází k rozkladu	[36]
RbAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	520,75	100	Dochází k rozkladu	[37]
Sm ₂ (SO ₄) ₃ · 8H ₂ O	733,09			
SrS ₂ O ₃ · 5H ₂ O	289,82	100	Dochází k rozkladu	[37]
Th(SO ₄) ₂ · 9H ₂ O	586,30		Dochází k rozkladu	[37]
Th(SO ₄) ₂ · 8H ₂ O	568,28			
Th(SO ₄) ₂ · 4H ₂ O	496,21			
TiOSO ₄ · H ₂ O	177,94			
UO ₂ SO ₄ · 3H ₂ O	420,13			
VSO ₄ · 7H ₂ O	273,11			
VOSO ₄ · 2H ₂ O	199,03			
Yb ₂ (SO ₄) ₃ · 8H ₂ O	778,37			
Y ₂ (SO ₄) ₃ · 8H ₂ O	610,11		Cp _{25°C} = 577,53 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	287,54	100	Cp _{25°C} = 392,13 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ Dochází k rozkladu	[37]
ZnSO ₄ · 6H ₂ O	269,53		Cp _{25°C} = 338,15 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
ZnSO ₄ · H ₂ O	179,45	238	Cp _{25°C} = 145,22 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , Dochází k rozkladu	[37]
ZnSO ₃ · 2H ₂ O	199,48	200	Dochází k rozkladu	[37]
Zr(SO ₄) ₂ · 4H ₂ O	355,51	100	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha II: Tabulka pro hydráty chlorečnanů a chloristanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{Al}(\text{ClO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	439,472			[35]
$\text{Al}(\text{ClO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	487,47	82	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{AgClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	225,33	43	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{AgC}_6\text{H}_2\text{N}_3\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	353,97			
$\text{Ba}(\text{ClO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	322,24	120	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Ba}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	390,27			
$\text{Be}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	279,97	250	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Cd}(\text{ClO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	315,34	80	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Cd}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	419,4			
$\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	243,01	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Cu}(\text{ClO}_3) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	255,09	65		[37]
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	170,48	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	370,53	82		[37]
$\text{Hg}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	672,14	64		[37]
$\text{Hg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	453,53			
$\text{In}(\text{ClO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	557,29	80		[37]
$\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	144,39	8	$\Delta H_f = 252,16 \text{ KJ/kg}$	[39]
$\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	160,44	95	$\Delta H_f = 253,01 \text{ KJ/kg}$	[39]
$\text{Mg}(\text{ClO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	299,29	35	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	331,29	190	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Mn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	361,93			
$\text{Ni}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	365,682	140		[37]
$\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	140,45	130	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Pb}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	460,14	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Sb}(\text{ClO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	474,15			
$\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	372,37	106	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha III: Tabulka pro hydráty bromičnanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{Al}(\text{BrO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	572,82	62		[37]
$\text{Ba}(\text{BrO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	411,14	260	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Co}(\text{BrO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	422,82			
$\text{Mg}(\text{BrO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	388,2	200	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Pb}(\text{BrO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	481,01	180	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Sr}(\text{BrO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	361,43	120	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Zn}(\text{BrO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	429,27	100		[37]

Příloha IV: Tabulka pro hydráty oxidů a síranů hlinitých

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	156,007	200	$C_{p25^\circ\text{C}} = 44,49 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$, Dochází k rozkladu	[38]
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	119,976		$C_{p25^\circ\text{C}} = 31,37 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	[35]
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	474,377	91	$C_{p25^\circ\text{C}} = 155,6 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$, $\Delta H_f = 252,16 \text{ kJ/kg}$	[35]
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	450,227		$C_{p25^\circ\text{C}} = 117,8 \text{ J/mol}^{-1}\text{k}^{-1}$	[35]
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	666,4	88	$\Delta H_f = 218,54 \text{ KJ/kg}$	[39]
$\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	250,2			

Příloha V: Tabulka pro hydráty chromičitanů a chromanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{BaCr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	389,34		Dochází k rozkladu	
$\text{CaCrO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	192,102			
$\text{CaCr}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	310,11	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CuCr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	315,56			
$\text{Li}_2\text{CrO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	165,9			
$\text{Li}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	265,9	130	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{MgCrO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	266,4			
$\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	234,03		Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	342,1	16	$\Delta H_f = 171,2671 \text{ kJ/kg}$	[39]
$\text{UO}_2\text{CrO}_4 \cdot 5\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	404,037			

Příloha VI: Tabulka pro hydráty čistých látek

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{Ar} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	130,024			
$\text{Kr} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	173,876			
$\text{SO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	190,165			
$\text{ZnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	133,409			
$\text{ZrO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	213,405			

Příloha VII: Tabulka pro hydráty jodičnanů a jodistanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Ba(IO ₃) ₂ · H ₂ O	505,14	130	Dochází k rozkladu	[37]
Cu(IO ₃) ₂ · H ₂ O	431,36	248	Dochází k rozkladu	[37]
Mg(IO ₃) ₂ · 4H ₂ O	446,17	210	Dochází k rozkladu	[37]
NaIO ₄ · 3H ₂ O	267,93	175	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha VIII: Tabulka pro hydráty boritanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Ba(BO ₂) ₂ · H ₂ O	240,96	>900		[37]
LiBO ₂ · 8H ₂ O	193,9	47	ΔHf = 373,39 KJ/kg	
MnB ₄ O ₇ · 8H ₂ O	354,3			
NaBO ₃ · 4H ₂ O	153,86	60	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	318,4	68,1 ¹ , 75	ΔHf = 190,58 kJ/kg Dochází k rozkladu	[39] ¹ , [37]
Na ₂ B ₄ O ₇ · 5H ₂ O	291,29		Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ B ₄ O ₇ · 4H ₂ O	273,28			
(NH ₄) ₂ B ₄ O ₇ · 4H ₂ O	263,37			[35]
NH ₄ HB ₄ O ₇ · 3H ₂ O	228,33			[35]
NH ₄ B ₅ O ₈ · 4H ₂ O	228,33	110	Dochází k rozkladu	[38]
Pb(BO ₂) ₂ · H ₂ O	310,83	500	Dochází k rozkladu	[37]
K ₂ B ₄ O ₇ · 5H ₂ O	323,51			

Příloha IX: Tabulka pro hydráty kyanidů a thiokyanatanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Au(CN) ₃ · 3H ₂ O	329,06	50	Dochází k rozkladu	[37]
Ba ₂ Fe(CN) ₆ · 6H ₂ O	594,69	80	Dochází k rozkladu	[37]
Ba(SCN) ₂ · 2H ₂ O	289,52			
Ba(SCN) ₂ · 3H ₂ O	307,53			[37]
Ca(SCN) ₂ · 4H ₂ O	228,3	160	Dochází k rozkladu	[37]
Co(CN) ₂ · 2H ₂ O	146,99			
Co(SCN) ₂ · 3H ₂ O	229,14			
Fe(SCN) ₂ · 3H ₂ O	226,05			
Fe(SCN) ₃ · H ₂ O	248,1	1	Dochází k rozkladu	[37]
K ₄ Fe(CN) ₆ · 3H ₂ O	422,388	60	Dochází k rozkladu	[37]
K ₄ (Fe(CN) ₆) · H ₂ O	386,361			
K ₂ Pt(CN) ₄ · 3H ₂ O	431,39			
Ni(CN) ₂ · 4H ₂ O	182,78	200	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₃ Fe(CN) ₆ · H ₂ O	298,93			
Na ₄ Fe(CN) ₆ · 10H ₂ O	484,06	50	Dochází k rozkladu	[37]
(NH ₄) ₃ Fe(CN) ₆ · 3H ₂ O	320,11		Dochází k rozkladu	[37]
Sr(CN) ₂ · 4H ₂ O	211,71		Dochází k rozkladu	[37]
SrFe(CN) ₆ · 15H ₂ O	569,79			
BaPt(CN) ₄ · 4H ₂ O	508,54			

Příloha X: Tabulka pro hydráty anorganických kyselin

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
H ₃ AsO ₄ · 0,5H ₂ O	150,95	35,5		[37]
H ₂ MoO ₄ · H ₂ O	179,98			
H ₂ PtCl ₆ · 6H ₂ O	517,9			
HNO ₃ · H ₂ O	81,028	-37,63	C _{p25°C} = 182,46 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , ΔH _f = 216,09 kJ/kg	[35]
HNO ₃ · 3H ₂ O	117,058	-18,47	C _{p25°C} = 325,21 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , ΔH _f = 248,61 kJ/kg	[35]
HClO ₄ · 2H ₂ O	136,489			
H ₃ PO ₄ · 0,5H ₂ O	107	29,3	ΔH _f = 143,93 kJ/kg	[39]
HClO ₄ · H ₂ O	118,474			
H ₂ S · 6H ₂ O	142,167			
H ₂ SeO ₄ · H ₂ O	162,989	26	ΔH _f = 121,96 kJ/kg	[35]
H ₂ PtCl ₆ · 6H ₂ O	517,915			
HIO ₄ · 2H ₂ O	227,94	122	Dochází k rozkladu	[37]
H ₂ SO ₄ · H ₂ O	116,089	8,53	ΔH _f = 166,91 kJ/kg	[35]
HAuBr ₄ · 5H ₂ O	607,66	27		[37]
HAuCl ₄ · 4H ₂ O	411,84			
HfOCl ₂ · 8H ₂ O	409,51		Dochází k rozkladu	[37]
H ₂ PtCl ₆ · 6H ₂ O	517,915			
H ₂ TeO ₄ · 2H ₂ O	837,621			

Příloha XI: Tabulka pro hydráty hydroxidů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O	315,46	78 ¹	ΔH _f ¹ = 301,14 K j/Kg, ΔH _f = 265 kJ/kg	Sharma,[39] ¹
Ba(OH) ₂ · H ₂ O	189,35			
Cr(OH) ₃ · 3H ₂ O	157			
KOH · 2H ₂ O	157,06	33		[38]
LiOH · H ₂ O	41,96			
LiOH · H ₂ O	41,9635			
Ni(OH) ₂ · H ₂ O	110,72			
NaOH · H ₂ O	58,0123	64,3	ΔH _f = 272,68 kJ/kg	[39]
NaOH · 2H ₂ O	76,02	64,3	ΔH _f = 273 kJ/kg	[37]

Příloha XII: Tabulka pro hydráty uhličitánů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
BeCO ₃ · 4H ₂ O	141,08	100	Dochází k rozkladu	[37]
Ce ₂ (CO ₃) ₃ · 5H ₂ O	550,33			
K ₂ CO ₃ · 1,5H ₂ O	165,22	>80		[38]
La ₂ (CO ₃) ₃ · 8H ₂ O	601,95			
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	286,14	33 ¹ , 32	ΔH _f ¹ = 251,59 K j/Kg, ΔH _f = 267 kJ/kg	[37], [39] ¹
Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	124	100	Dochází k rozkladu	[37]
Y ₂ (CO ₃) ₃ · 3H ₂ O	411,88			

Příloha XIII: Tabulka pro hydráty fosforečnanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Ba(H ₂ PO ₂) ₂ · H ₂ O	285,31			
CaHPO ₄ · 2H ₂ O	172,09	100	Dochází k rozkladu	[37]
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	252,06	100	Dochází k rozkladu	[37]
CrPO ₄ · 3,5H ₂ O	210,02			
CrPO ₄ · 6H ₂ O	255,05	>500	Dochází k rozkladu	[37]
Co ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	510,86			
Cu ₃ (PO ₄) ₂ · 3H ₂ O	434,62			
Fe ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	501,59			
FePO ₄ · 2H ₂ O	186,84			
Fe ₄ (P ₂ O ₇) ₃ · 9H ₂ O	907,34			
K ₄ P ₂ O ₇ · 3H ₂ O	384,38	1090		[37]
K ₂ HPO ₄ · 6H ₂ O	282,26	13	ΔHf = 108,23 kJ/kg	[39]
K ₂ HPO ₄ · 7H ₂ O	300,28	45	ΔHf = 145 kJ/kg	[37]
K ₂ HPO ₄ · 3H ₂ O	228,22	48	ΔHf = 99 kJ/kg	[37]
MgHPO ₄ · 3H ₂ O	174,33	550	Dochází k rozkladu	[37]
Mg ₃ (PO ₄) ₂ · 5H ₂ O	352,93	400	Dochází k rozkladu	[37]
Mg ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	406,97			
Mg ₂ P ₂ O ₇ · 3H ₂ O	276,59	100	Dochází k rozkladu	[37]
Mn(H ₂ PO ₄) ₂ · 2H ₂ O	284,94			
Ni ₃ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	510,14			
NaNH ₄ HPO ₄ · 4H ₂ O	209,06	80	Dochází k rozkladu	[37]
NaH ₂ PO ₄ · H ₂ O	137,99	100	Dochází k rozkladu	[37]
NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O	156	60	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ H ₂ P ₂ O ₆ · 6H ₂ O	314,03	110	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ HPO ₄ · 7H ₂ O	268	48,2	ΔHf = 174,89 kJ/kg	[39]
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	358,14	35	ΔHf = 262,92 kJ/kg Dochází k rozkladu	[39]
Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	380,1	79	ΔHf = 220,2 kJ/kg	[39]
NaH ₂ PO ₂ · H ₂ O	105,99	310	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₄ P ₂ O ₇ · 10H ₂ O	446,07	76,3	ΔHf = 229,85 kJ/kg	[39]
Na ₃ (PO ₃) ₃ · 6H ₂ O	413,97	53		[37]
(NH ₄) ₃ PO ₄ · 3H ₂ O	203,13			[35]
(NH ₄) ₂ HPO ₃ · H ₂ O	134,07			[35]
Sr (H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	299,457			
Zn ₃ (PO ₄) ₂ · 4H ₂ O	458,14			

Příloha XIV: Tabulka pro hydráty arzeničanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	298,76	400	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	553,46		Dochází k rozkladu	[37]
$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	230,79		Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	598,04		Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	312,01	50	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Sr}(\text{AsO}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	373,52			
$\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	618,1			

Příloha XV: Tabulka pro hydráty seleničitanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{CoSeO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	291,96		Dochází k rozkladu	
$\text{CoSeO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	221,92			
$\text{BeSeO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	224,03	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CdSeO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	291,399	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CuSeO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	296,58	80	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Li}_2\text{SeO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	174,85			
$\text{MgSeO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	275,35			
$\text{MgSeO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	259,35			
$\text{NiSeO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	309,74			
$\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	369,08			
$\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	244,99	48	$\Delta H_f = 168 \text{ kJ/kg}$	[37]
$\text{VOSeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	211,91			
$\text{ZnSeO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	298,41	50	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha XVI: Tabulka pro hydráty wolframanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{CuWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	347,414	88,6		[37]
$\text{FeWO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	357,73			
$\text{Fe}_2(\text{WO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	999,328			
$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	329,84	100	Dochází k rozkladu	[37]
$(\text{NH}_4)_6\text{W}_7\text{O}_{24} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1887,04			[35]

Příloha XVII: Tabulka pro hydráty manganistanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{NaMnO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	195,97	170	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Sr}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	379,53	175	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Zn}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	411,34			
$\text{Mg}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	370,29		Dochází k rozkladu	[37]

Příloha XVIII: Tabulka pro hydráty sulfidů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Na ₂ S · 9H ₂ O	240,18	50	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ S · 5H ₂ O	168,12	120	Dochází k rozkladu	[37]
Cs ₂ S · 4H ₂ O	369,93			
Ba(HS) ₂ · 4H ₂ O	275,53	50	Dochází k rozkladu	[37]
KHS · 0,5H ₂ O	81,17	175		[37]
K ₂ S · 5H ₂ O	200,338	60		[37]
NaHS · 2H ₂ O	92,09	55	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha XIX: Tabulka pro směsi hydrátů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
(NH ₄) ₃ PO ₄ · 12MoO ₃ · H ₂ O	2092,53		Dochází k rozkladu	
(NH ₄) ₃ PO ₄ · 12WO ₃ · H ₂ O	3147,33		Dochází k rozkladu	
(NH ₄) ₂ TiO(C ₂ O ₄) ₂ · H ₂ O	293,99			
(NH ₄) ₃ ZrOH(CO ₃) ₃ · 2H ₂ O	378,4			
NH ₄ (Cr(NH ₃) ₂ (SCN) ₄).H ₂ O	690,84	268-272	Dochází k rozkladu	[36]
2ZnO · 3B ₂ O ₃ · 3,5H ₂ O	434,64	980		[37]
2ZnO · 3B ₂ O ₃ · 5H ₂ O	461,66			
Zn(BF ₄) ₂ · 6H ₂ O	347,08			
ZrOCl ₂ · 8H ₂ O	322,25	400	Dochází k rozkladu	[37]
Al ₂ (OH) ₅ Cl · 2H ₂ O	210,48			
Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · 2H ₂ O	394,19			[35]

Příloha XX: Tabulka pro hydráty fluorokřemičitanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
ZnSiF ₆ · 6H ₂ O	315,54			
PbSiF ₆ · 2H ₂ O	385,3		Dochází k rozkladu	[37]
Al ₂ (SiF ₆) ₃ · 9H ₂ O	642,32	>500	Dochází k rozkladu	[37]
CaSiF ₆ · 2H ₂ O	218,18			
CoSiF ₆ · 6H ₂ O	309,1			
CuSiF ₆ · 4H ₂ O	277,68		Dochází k rozkladu	[37]
MgSiF ₆ · 6H ₂ O	374,47	120	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha XXI: Tabulka pro hydráty organických látek

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Zn(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 2H ₂ O	219,499	237	Dochází k rozkladu	[37]
Zn(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · H ₂ O	201,484			
Zn ₃ (C ₆ H ₅ O ₇) ₂ · 2H ₂ O	610,36			
Zn(CHO ₂) ₂ · 2H ₂ O	191,446			
AgC ₃ H ₅ O ₃ · H ₂ O	214,95			
Ba(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · H ₂ O	273,43	110	Dochází k rozkladu	[37]
Ba ₃ (C ₆ H ₅ O ₇) ₂ · H ₂ O	808,19			
Ba(CH ₃ COO) ₂ · H ₂ O	273,43	110	Dochází k rozkladu	[36]
Cd(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 2H ₂ O	266,52	130	Dochází k rozkladu	[37]
Ca(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · H ₂ O	176,18	150	Dochází k rozkladu	[37]
Cr(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · H ₂ O	188,09			
Cr(C ₂ H ₃ O ₂) ₃ · 6H ₂ O	337,21			
Co(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 4H ₂ O	249,08			
Co(CH ₂) ₂ · 2H ₂ O	123,01	140	Dochází k rozkladu	[37]
Cu(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · H ₂ O	199,64	115		[37]
CuC ₆ H ₄ O ₇ · 2,5H ₂ O	296,66	100	Dochází k rozkladu	[37]
Cu(CHO ₂) ₂ · 4H ₂ O	225,64			
FeC ₆ H ₅ O ₇ · 5H ₂ O	335,02			
Li(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 2H ₂ O	101,9	58	ΔHf = 251,34 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[37]
Li(CHO ₂) ₂ · H ₂ O	69,97			
Mg(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 4H ₂ O	214,45	80	Dochází k rozkladu	[37]
Mg(CHO ₂) ₂ · 2H ₂ O	150,37		Dochází k rozkladu	[37]
Mn(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 4H ₂ O	245,08	80		[37]
NaC ₂ H ₃ O ₂ · 3H ₂ O	136,08	58	ΔHf = 289,08 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[37]
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ · 2H ₂ O	294,09	150	Dochází k rozkladu	[37]
Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 3H ₂ O	379,33	75	Dochází k rozkladu	[37]
Pb ₃ (C ₆ H ₅ O ₇) ₂ · 3H ₂ O	1053,84			
Sr(CHO ₂) ₂ · 2H ₂ O	213,68	100	Dochází k rozkladu	[37]
NaKC ₄ H ₄ O ₆ · 4H ₂ O	282,22	70	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ C ₄ H ₄ O ₄ · 6H ₂ O	270,14	120	Dochází k rozkladu	[37]
CdC ₂ O ₄ · 3H ₂ O	254,47	340	Dochází k rozkladu	[37]
CaC ₂ O ₄ · H ₂ O	146,11	200	Dochází k rozkladu	[37]
CrC ₂ O ₄ · H ₂ O	158,03			
CoC ₂ O ₄ · 2H ₂ O	182,98		Dochází k rozkladu	
CuC ₂ O ₄ · 0,5H ₂ O	160,58	200	Dochází k rozkladu	[37]
FeC ₂ O ₄ · 2H ₂ O	179,89			
K ₃ Fe(C ₂ O ₄) ₃ · 3H ₂ O	491,24	100		[37]
K ₂ C ₂ O ₄ · H ₂ O	184,23	160	Dochází k rozkladu	[37]
K ₃ Sb(C ₂ O ₄) ₃ · 3H ₂ O	557,15			
MgC ₂ O ₄ · 2H ₂ O	148,35			
MnC ₂ O ₄ · 2H ₂ O	178,98	150	Dochází k rozkladu	[37]
(NH ₄) ₃ Fe(C ₂ O ₄) ₃ · 3H ₂ O	428,06	160	Dochází k rozkladu	[37]
NH ₄ HC ₂ O ₄ · H ₂ O	125,08			[35]

$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	142,11			[35]
$\text{ZnC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	189,42	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{BaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	243,36			
$\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	50,0603	-51,7		[37]
$\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	424,147			

Příloha XXII: Tabulka pro hydráty bromidů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{AlBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	374,78	93		[37]
$\text{BaBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	333,165	75	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CdBr}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	344,269			
$\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	307,97	38,2	$\Delta\text{Hf} = 115,5 \text{ kJ/kg}$	[39]
$\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		34	$\Delta\text{Hf} = 138 \text{ kJ/kg}$	[38]
$\text{CeBr}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	505,934	732		[37]
$\text{CrBr}_3(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	399,799			
$\text{CoBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	326,83	47	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{FeBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	403,64	27	$\Delta\text{Hf} = 105 \text{ kJ/kg}$	[37]
$\text{FeBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	403,64	21	$\Delta\text{Hf} = 105 \text{ kJ/kg}$	[39]
$\text{IrBr}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	503,99			
$\text{LiBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	202,77	34	$\Delta\text{Hf} = 124 \text{ kJ/kg}$	[38]
$\text{MgBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	292,204	165	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{MnBr}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	286,8	64	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{NiBr}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	272,54	200	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	138,924	36	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Na}_2\text{PtBr}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	828,57			
$\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	355,51	88	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{TlBr}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	516,156			
$\text{ThBr}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	731,806			
$\text{ThBr}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	767,837			
$\text{ThBr}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	677,76			
$\text{ZnBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	261,218	37		[35]

Příloha XXIII: Tabulka pro hydráty chloridů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
AlCl ₃ · 6H ₂ O	241,432	100	Dochází k rozkladu	[37]
BaCl ₂ · H ₂ O	226,261		C _{p25°C} = 118,01 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
BaCl ₂ · 2H ₂ O	244,276	120	C _{p25°C} = 155,26 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , Dochází k rozkladu	[37]
CdCl ₂ · 2½H ₂ O	201,321			
CdCl ₂ · H ₂ O	201,321			
CaCl ₂ · 2H ₂ O	157,01	175		[37]
CaCl ₂ · H ₂ O	128,99	260		[37]
CaCl ₂ · 6H ₂ O	219	29,4	ΔH _f = 170,07 kJ/kg	[39]
CaCl ₂ · 12H ₂ O	327,16	29,8	ΔH _f = 174 kJ/kg	[37]
CeCl ₃ · 7H ₂ O	372,58	90		[37]
Cr(H ₂ O) ₄ Cl ₂ · 4H ₂ O	267,02	51		[37]
CoCl ₂ · 2H ₂ O	165,86			
CoCl ₂ · 6H ₂ O	237,93	87		[37]
FeCl ₂ · 2H ₂ O	162,78	120		[37]
FeCl ₂ · 4H ₂ O	198,81	105		[37]
FeCl ₃ · 6H ₂ O	270,297	37	Dochází k rozkladu	[37]
FeCl ₃ · 6H ₂ O		37	ΔH _f = 185,79 kJ/kg	[39]
FeCl ₃ · 2H ₂ O	198,223	56	ΔH _f = 90 kJ/kg	[37]
ErCl ₃ · 6H ₂ O	381,7		Dochází k rozkladu	[37]
EuCl ₃ · 6H ₂ O	366,41	850		[37]
GdCl ₃ · 6H ₂ O	371,7			
LiCl · H ₂ O	60,4	99		[38]
LaCl ₃ · 7H ₂ O	371,37	91	Dochází k rozkladu	[37]
MgCl ₂ · H ₂ O	113,226		C _{p25°C} = 115 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
MgCl ₂ · 2H ₂ O	131,241		C _{p25°C} = 159,11 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
KAuCl ₄ · 2H ₂ O	413,9			
MgCl ₂ · 4H ₂ O	167,272		C _{p25°C} = 221,47 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
MgCl ₂ · 4H ₂ O	167,27	58	ΔH _f = 178 kJ/kg	[37]
MgCl ₂ · 6H ₂ O	203,302	100	C _{p25°C} = 315,8 J/mol ⁻¹ k ⁻¹ , ΔH _f = 168,79 kJ/kg	[37]
MgCl ₂ · 6H ₂ O	203,3	117	Dochází k rozkladu	[37]
MnCl ₂ · 4H ₂ O	197,9	58 ¹ , 87,5	ΔH _f = 177,63 kJ/kg	[39] ¹ , [37]
MnCl ₂ · 4H ₂ O		58	ΔH _f = 151 kJ/kg	[37]
NdCl ₃ · 6H ₂ O	358,69	124	Dochází k rozkladu	[37]
NiCl ₂ · 6H ₂ O	237,697			
Na ₂ IrCl ₆ · 6H ₂ O	559	600	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ PtCl ₆ · 6H ₂ O	561,87	110	Dochází k rozkladu	[37]
NaOCl · 5H ₂ O	164,51	18		[37]
NaAuCl ₄ · 2H ₂ O	397,79	100	Dochází k rozkladu	[37]
Na ₂ PdCl ₄ · 3H ₂ O	348,25			
Na ₂ PtCl ₄ · 4H ₂ O	454,93	100		[37]
(NH ₄) ₂ RhCl ₅ · H ₂ O	334,26	210-230	Dochází k rozkladu	[36]
NH ₄ NiCl ₃ · 6H ₂ O	291,18			[35]
PtCl ₄ · 5H ₂ O	426,97			

PrCl ₃ · 7H ₂ O	373,37	110	Dochází k rozkladu	[37]
RaCl ₂ · 2H ₂ O	332,962			
SmCl ₃ · 6H ₂ O	364,81	78		[37]
AlCl ₃ · 6H ₂ O	225,64	37	Dochází k rozkladu	[37]
BaCl ₂ · H ₂ O	350,59	56	Dochází k rozkladu	[37]
BaCl ₂ · 2H ₂ O	266,465	100	Dochází k rozkladu	[37]
CdCl ₂ · 2½H ₂ O	194,404		C _p 25°C = 160,28 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
CdCl ₂ · H ₂ O	176,389		C _p 25°C = 120,1 J/mol ⁻¹ k ⁻¹	
CaCl ₂ · 2H ₂ O	373,37			
CaCl ₂ · H ₂ O	382,79	35		[35]
CaCl ₂ · 6H ₂ O	401,4			
CaCl ₂ · 12H ₂ O	387,5	150	Dochází k rozkladu	[37]
CeCl ₃ · 7H ₂ O	313,5	110	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha XXIV: Tabulka pro hydráty fluoridů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
AlF ₃ · H ₂ O				[35]
AlF ₃ · 3H ₂ O	138,022			[35]
AlF ₃ · ½H ₂ O	101,992			[35]
AlF ₃ · H ₂ O	101,99			[35]
AlF ₃ · 3H ₂ O	138,02			[35]
AgF · 2H ₂ O	162,897			
AgF · H ₂ O	144,882			
AgF · 4H ₂ O	198,927			
CrF ₃ · 3H ₂ O	163,03			
CoF ₂ · 4H ₂ O	168,99		Dochází k rozkladu	
CuF ₂ · 2H ₂ O	137,573	130	Dochází k rozkladu	[37]
FeF ₂ · 4H ₂ O	165,9			
GaF ₃ · 3H ₂ O	180,76	>140		[37]
FeF ₃ · 3H ₂ O	166,88			
InF ₃ · 3H ₂ O	225,85	100	Dochází k rozkladu	[37]
KF.2H ₂ O	94,1	41,4	ΔH _f = 262,39 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[39]
KF.2H ₂ O		42		[38]
KF.4H ₂ O	130	18,5	ΔH _f = 331,58 kJ/kg	[39]
NaPF ₆ · H ₂ O	185,969			
VF ₃ · 3H ₂ O	161,98	100	Dochází k rozkladu	[37]

Příloha XXV: Tabulka pro hydráty jodidů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{AlI}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	515,78	185	Dochází k rozkladu	[36]
$\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	427,16	740	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CaI}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	401,97	42	$\Delta H_f = 162 \text{ K j/Kg}$	[37]
$\text{CaI}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		42	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{CeI}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	682,96			
$\text{CoI}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	420,83	130	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{FeI}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	381,71	90	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{KI}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	437,82	225	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{LiI} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	187,891			
$\text{MgI}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	422,23	41	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{MgI}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$		42	$\Delta H_f = 133 \text{ kJ/kg}$	[37]
$\text{MnI}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	380,8			
$\text{NiI}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	420,59			
$\text{PdI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	396,239			

Příloha XXVI: Tabulka pro hydráty ostatních látek

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
$\text{BaSnO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	358,08			
$\text{Bi}_2(\text{SnO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1008,16			
$\text{K}_2\text{SnO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	298,95			
$\text{K}_2\text{TeO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	323,84			
$\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	50,0603	-51,7		[37]
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	241,96	100	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	297,94			
$\text{Na}_3\text{PO}_3\text{S} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	396,18	60		[37]
$\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	652,04			
$\text{NaVO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	193,99			
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1235,99	90	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{UO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	304,04	570	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	338,05	115	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	424,147			
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	194,12	48	$\Delta H_f = 168 \text{ kJ/kg}$	[37]

Příloha aXXVII: Tabulka pro hydráty dusitanů a dusičnanů

Vzorec	Molární hmotnost (g/mol)	Teplota tání (°C)	Další veličiny	Zdroj
Al(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	321,088			[35]
Al(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	375,133	73	ΔHf = 162,07 kJ/kg	[37]
Ba(NO ₂) ₂ · H ₂ O	247,33	217	Dochází k rozkladu	[37]
Be(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O	187,07	30		[37]
Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O	485,07	75	Dochází k rozkladu	[37]
Cd(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	308,471	59,5	ΔHf = 105,82 kJ/kg	[35]
Ca(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	200,12			
Ca(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O	218,13	51	ΔHf = 104 kJ/kg	[37]
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	236,151	42,7	ΔHf = 125,82 kJ/kg	[39]
Ca(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O	218,135	51,1		[35]
Ce(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	434,22	150	Dochází k rozkladu	[37]
Cr(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	400,15	66,3	ΔHf = 194,52 kJ/kg	[39]
Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	291	57	ΔHf = 127,99 kJ/kg	[39]
CoK ₃ (NO ₂) ₆ · 1,5H ₂ O	479,28			
Cu(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	295,6	24,4	ΔHf = 123,17 kJ/kg	[39]
Cu(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O	241,6	114		[37]
Fe(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	288	60	ΔHf = 124,96 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[39]
Fe(NO ₃) ₂ · 9H ₂ O	404	43	ΔHf = 126,98 kJ/kg	[38]
Hg ₂ (NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	561,22	70	Dochází k rozkladu	[37]
HgNO ₃ · ½H ₂ O	280,61			
Hg(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	360,63			
Hg(NO ₃) ₂ · H ₂ O	342,63			
Dy(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O	438,59			
Er(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O	443,35	130	Dochází k rozkladu	[37]
Eu(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	446,07	85	Dochází k rozkladu	[37]
Fe(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	349,95	35	Dochází k rozkladu	[37]
Fe(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	404	47	Dochází k rozkladu	[37]
Gd(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	451,36	91	Dochází k rozkladu	[37]
Gd(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O	433,34	92	Dochází k rozkladu	[37]
La(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	433	40	Dochází k rozkladu	[37]
LiNO ₂ · H ₂ O	70,96	>100		[37]
LiNO ₃ · 2H ₂ O	88,98	30		[37]
LiNO ₃ · 3H ₂ O	123	29,9	ΔHf = 296,01 kJ/kg	[39]
LiNO ₃ · 3H ₂ O		30		[38]
Mg(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	184,35	100	Dochází k rozkladu	[37]
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	194,401	89,9 -95	ΔHf = 210,97 kJ/kg Dochází k rozkladu	[37]
Mg(NO ₂) ₂ · 3H ₂ O	170,36	100	Dochází k rozkladu	[37]
Mg(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	188,38	47	ΔHf = 142 kJ/kg	[37]
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	287	28	ΔHf = 139,98 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[39]
Mn(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	251,01	37,1	ΔHf = 115 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[37]
Nd(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	438,3			
Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	290,79	56	ΔHf = 168,38 kJ/kg, Dochází k rozkladu	[39]
Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	290,79	57		[38]

$\text{NaNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	193	53	$\Delta H_f = 158,29 \text{ kJ/kg}$	[39]
$\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	435			[37]
$\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	444,5			[37]
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	283,538			[37]
$\text{Tb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	453	89		[37]
$\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	552,12	500	Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Tm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	444,99			[37]
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	502,129	60		[37]
$\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	346,98			[37]
$\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	383,01			[37]
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	225,42	55,4	$\Delta H_f = 68 \text{ kJ/kg}$	[37]
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	297,481	36	$\Delta H_f = 133,64 \text{ kJ/kg}$ Dochází k rozkladu	[37]
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	207,405	70,7		[35]
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	261,451	48	$\Delta H_f = 144,06 \text{ kJ/kg}$	[37]
$\text{Zr}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	429,32	100	Dochází k rozkladu	[37]