

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

SUŠENÍ SLOUČENINY CHLORIDU VÁPENATÉHO A
SILIKAGELU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Hoffman, CSc.

SOUHRN

Tato práce mapuje současné trendy v systémech akumulace tepla pro vytápění obytných budov. Zaměřuje se na řešení sezónní akumulace tepla na bázi adsorpce vodní páry do pevných materiálů a dále se hlouběji zabývá letním provozem systému, ve kterém dochází k procesu ukládání tepla sušením partikulární sloučeniny chloridu vápenatého a silikagelu. Na základě provedených experimentů na laboratorní oběhové sušárně jsou v této práci sestaveny sušicí křivky a proveden návrh koncepce a základních rozměrů provozní sušárny pro sušení zadaného množství materiálu.

Klíčová slova: chlorid vápenatý, silikagel, energetická hustota, akumulace tepla, sušení, sušicí křivka, oběhová sušárna.

SUMMARY

The master thesis reports about current trends in heat accumulation systems for space heating. A focus is put on seasonal heat accumulation on base of water vapor adsorption into a solid material and furthermore goes deeper into a summer operation of the system, in which the process of heat accumulation takes place in the form of drying of calcium chloride and silica gel compound. On base of several experiments undertaken on a laboratory circulation dryer, various drying curves for different conditions have been assembled and used for a choice of real scale dryer conception and for a calculation of its basic dimensions.

Key words: calcium chloride, silica gel, energy density, heat accumulation, drying, drying curve, circulation dryer.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Sušení sloučeniny chloridu vápenatého a silikagelu“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Hoffmana, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 5. 1. 2015

Bc. Jan Běťák

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Hoffmanovi, CSc. za trpělivé vedení, cenné rady a konstruktivní připomínky při tvorbě mé diplomové práce. Rád bych také poděkoval panu Ing. Petru Kuptíkovi za poskytnutí odborných konzultací.

Děkuji firmě Regulus spol. s r.o. za přístup k technickým podkladům.

1 Obsah

1	Obsah	5
2	Seznam použitého značení.....	7
3	Úvod.....	9
4	Přehled konvenčních řešení akumulace tepla pro vytápění nízkoenergetických domů	10
4.1	Krátkodobá akumulace tepla vs. sezónní akumulace tepla.....	10
4.1.1	Akumulace tepelné energie ze solárních kolektorů	10
4.1.2	Akumulace tepelné energie z tepelných čerpadel.....	11
4.1.3	Akumulace tepelné energie získané spalováním biomasy.....	12
4.2	Akumulace ve formě citelného tepla.....	13
4.3	Akumulace ve formě latentního tepla	14
4.4	Akumulace s chemickou reakcí	15
5	Koncepce manipulace s partikulárními materiály [7].....	20
6	Přehled konvenčních zařízení pro sušení sypkých materiálů	22
6.1	Rychlost sušení [9].....	22
6.2	Fluidní sušárny [7]	26
6.3	Vibrofluidní sušárny.....	27
7	Solární kolektory.....	29
7.1	Vakuové trubicové kolektory	29
7.2	Vzduchové solární kolektory	30
8	Experimentální stanovení sušících křivek	32
8.1	Měření okolních podmínek měření	32
8.1.1	Měření relativní vlhkosti vzduchu v laboratoři.....	32
8.2	Měření počáteční vlhkosti materiálu	33
8.2.1	Postup měření	33
8.3	Měření na oběhové sušárně.....	34
8.3.1	Popis laboratorní oběhové sušárny	34
8.3.2	Postup měření	36
8.3.3	Podmínky měření.....	37
8.3.4	Vyhodnocení naměřených dat	38
9	Návrh sušárny	43
9.1	Koncepce sušárny.....	43
9.2	Bilanční výpočty	44
9.2.1	Bilance sušiny	44

9.2.2	Množství odsušené vlhkosti.....	45
9.2.3	Parametry sušícího vzduchu na vstupu do sušárny.....	45
9.2.4	Parametry sušícího vzduchu na výstupu ze sušárny	45
9.2.5	Množství vzduchu potřebné pro sušení	47
9.3	Orientační určení základních rozměrů sušárny	49
9.4	Výkon ohřívače vzduchu.....	49
10	Technicko-ekonomické zhodnocení	51
10.1	Analýza využitelnosti solárních termických kolektorů jako zdroje tepla pro ohřev sušícího vzduchu.....	51
10.1.1	Využitelnost vakuového trubicového kolektoru	51
10.1.2	Využitelnost vzduchového trubicového kolektoru	53
11	Závěr	54
12	Seznam použité literatury	57

2 Seznam použitého značení

A	psychrometrická konstanta	[K ⁻¹]
A	plocha	[m ²]
Ar	Archimedovo číslo	[-]
Be	Beránkovo číslo	[-]
c_p	měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_{pA}	měrná tepelná kapacita složky A v kapalném skupenství	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_{pC}	měrná tepelná kapacita složky C	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
$c_{p,vz}$	měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
d	střední průměr částic	[m]
G	plynná látka	[-]
g	tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
H_0	výška nehybné vrstvy	[m]
Δh_r^0	standardní reakční entalpie	[J.mol ⁻¹]
Δh_{vAw}	měrné výparné teplo	[J.kg ⁻¹]
I	relativní měrná entalpie	[J.kg ⁻¹]
I'	relativní měrná entalpie vlhkého materiálu	[J.kg ⁻¹]
I_0	relativní měrná entalpie okolí systému	[J.kg ⁻¹]
I_e	relativní měrná entalpie na výstupu ze sušárny	[J.kg ⁻¹]
I_i	relativní měrná entalpie na vstupu do sušárny	[J.kg ⁻¹]
k_y	součinitel přestupu hmoty vztažený k fázi y	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
k_Y	součinitel přestupu hmoty vztažený k nerozpustné složce fáze y	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
k'_Y	součinitel přestupu hmoty na jednotku hmoty	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
M	množství sušicího vzduchu	[kg.h ⁻¹]
\dot{m}	hmotnostní průtok	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_A	hmotnostní tok složky A	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_B	hmotnostní tok složky B	[kg.s ⁻¹]
m_C	hmotnost sušiny	[kg]
p	tlak	[Pa]
p_b	barometrický tlak	[Pa]
p^0	referenční tlak	[Pa]
p_{eqSG}	rovnovážný tlak na fázovém rozhraní mezi pevnou a plynnou látkou	[Pa]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
p''	parciální tlak syté páry	[Pa]
Q	množství energie	[kWh]
\dot{Q}	tepelný výkon	[W]
Q_k	množství tepla dodaného plynu v ohříváči	[kWh]
\dot{Q}_{OH}	výkon ohříváče	[W]
q_w	intenzita toku tepla	[W.m ⁻²]
R	univerzální plynová konstanta	[J.kmol ⁻¹ .K ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re _k	Reynoldsovo číslo při volném pádu částic	[-]

S_0	dehydratovaná pevná látka	[-]
S_I	hydratovaná pevná látka	[-]
Δs_r^0	standardní reakční entropie	[$J.mol^{-1}.K^{-1}$]
T	teplota	[K]
t	teplota	[°C]
t	čas	[s]
T_{A1}	teplota vzduchu na výstupu ze sušárny	[°C]
T_{eqSG}	rovnovážná teplota na fázovém rozhraní mezi pevnou a plynnou látkou	[K]
t_m	teplota mokrého teploměru	[°C]
t_1	teplota suchého teploměru	[°C]
T_{sv}	teplota sušicího vzduchu	[°C]
t_w	teplota na fázovém rozhraní	[°C]
ΔT	teplotní rozdíl	[K]
V	objem	[m^3]
w	rychlost proudění	[$m.s^{-1}$]
W	množství odsušené vlhkosti	[$kg.h^{-1}$]
w_k	rychlost volného pádu částic	[$m.s^{-1}$]
w_p	prahová rychlost fluidace	[$m.s^{-1}$]
w_u	prahová rychlost úletu	[$m.s^{-1}$]
x	měrná vlhkost vzduchu	[$kg_{H_2O} \cdot kg^{-1} s.v.$]
X_A	relativní hmotnostní zlomek vlhkosti materiálu	[-]
X_A^*	rovnovážná vlhkost materiálu	[-]
x_{A0}	měrná vlhkost vzduchu na vstupu do sušárny	[$kg_{H_2O} \cdot kg^{-1} s.v.$]
x_{A1}	měrná vlhkost vzduchu na výstupu ze sušárny	[$kg_{H_2O} \cdot kg^{-1} s.v.$]
X_{Ae}	relativní hmotnostní zlomek složky A ve fázi x na výstupu ze sušárny	[-]
X_{Ai}	relativní hmotnostní zlomek složky A ve fázi x na vstupu do sušárny	[-]
y_A	hmotnostní zlomek složky A ve fázi y	[-]
Y_A	relativní hmotnostní zlomek složky A ve fázi y	[-]
Y_{Ai}	relativní hmotnostní zlomek složky A ve fázi y na vstupu do sušárny	[-]
Y_{Ae}	relativní hmotnostní zlomek složky A ve fázi y na výstupu ze sušárny	[-]
y_{Aw}	hmotnostní zlomek složky A na fázovém rozhraní	[-]
Y_{Aw}	relativní hmotnostní zlomek složky A na fázovém rozhraní	[-]
α	součinitel přestupu tepla	[$W.m^{-2}.K^{-1}$]
λ	součinitel tření	[-]
ν	stechiometrický koeficient	[mol]
ν_L	kinematická viskozita vzduchu	[$m^2.s^{-1}$]
ξ_0	hmotnostní podíl sušiny ve vstupním množství materiálu	[%]
ξ_1	hmotnostní podíl sušiny ve výstupním množství materiálu	[%]
ρ	hustota	[$kg.m^{-3}$]
ρ_L	hustota vzduchu	[$kg.m^{-3}$]
ρ_M	hustota materiálu částic	[$kg.m^{-3}$]
τ	doba sušení	[s]
φ	relativní vlhkost vzduchu	[%]
ϕ_{Aw}	intenzita toku složky A na fázovém rozhraní	[$kg.m^{-2}.s^{-1}$]

3 Úvod

Energetická spotřeba budov činí 25 % z celkové světové spotřeby energie a 40 % spotřeby energie v Evropě. Vytápění budov představuje největší část této energie: 53 % ve světovém měřítku a kolem 80 % v Evropě [1]. Snižování podílu fosilních paliv na celkové produkci energie, jejich rostoucí cena a snaha o eliminaci emisí skleníkových plynů vede ke zvýšené aktivitě v oblasti využívání obnovitelných zdrojů energie.

V poslední době zaznamenává velký rozmach především oblast využívání solární energie, jako zdroje tepla nejen pro výrobu elektrické energie, ale i pro vytápění a přípravu teplé vody. Zvláště v členských státech Evropské unie je růst trhu se solárními systémy značně podpořen významnou dotační politikou, kterou se Evropská unie snaží dostát svým závazkům v oblasti snižování emisí skleníkových plynů. Zmíněná dotační politika se nedotýká pouze potenciálních odběratelů, ale velmi významná je i finanční podpora na straně výzkumu a vývoje inovativních řešení na poli úspory energie.

Jelikož v současné době netvoří hlavní překážku k masivnějšímu využívání solární energie její získávání, ale především její uchování po delší dobu pro její pozdější využití, mezi hlavní pilíře grantových programů Evropské unie patří podpora výzkumu a vývoje systémů pro akumulaci energie (energy storage). V tomto oboru se v posledních letech rozběhlo hned několik výzkumně-vývojových projektů, z nichž některé se zaměřují na výzkum v oblasti uchovávání solární energie využíváním sorpčního tepla. Na jednom z takových projektů spolupracuje jako průmyslový partner i firma Regulus spol. s r.o., která se dlouhodobě zabývá vývojem a prodejem úsporných systémů vytápění a přípravy teplé vody.

Cílem projektu je vyvinout zařízení pro sezónní akumulaci tepla, které bude pracovat na principu adsorpce a desorpce vodní páry na povrchu partikulárního materiálu. Výzkum vhodných materiálů pro danou aplikaci se stále rozvíjí stejně jako výzkum jejich termodynamických vlastností při procesu adsorpce. Méně je však při výzkumu kladen důraz na proces desorpce, tedy v praxi na ukládání tepelné energie do materiálu formou vypuzování vlhkosti z jeho povrchu tzn. jeho sušením. Přitom právě proces sušení bude tvořit nedílnou součást celého procesu akumulace a velmi významnou úlohu sehraje zajištění dostatečně výkonného a zároveň levného zdroje tepla pro ohřev sušicího vzduchu.

Cílem této práce je proto zmapovat současné trendy v oblasti akumulace tepelné energie pro vytápění (především) rodinných domů, dále se seznámit s teorií sušení a konvenčními způsoby sušení partikulárních materiálů a na základě získaných poznatků provést experiment na laboratorní oběhové sušárně za účelem stanovení sušicích křivek zadané sloučeniny chloridu vápenatého a silikagelu při různých parametrech sušicího vzduchu. Dále z experimentálně získaných sušicích křivek vyhodnotit potřebnou dobu sušení materiálu, za kterou hodnota měrné vlhkosti sušeného materiálu klesne pod požadovanou hodnotu 0,2 kg H₂O/kg s.v. a na základě stanovené doby sušení navrhnout základní rozměry pásové sušárny pro sušení daného materiálu. Z hmotové a entalpické bilance pak stanovit teoreticky potřebné množství sušicího vzduchu a potřebný výkon ohřívače. A na závěr zhodnotit potenciál využití solárních termických kolektorů, jako zdroje tepla pro ohřev sušicího vzduchu.

4 Přehled konvenčních řešení akumulace tepla pro vytápění nízkoenergetických domů

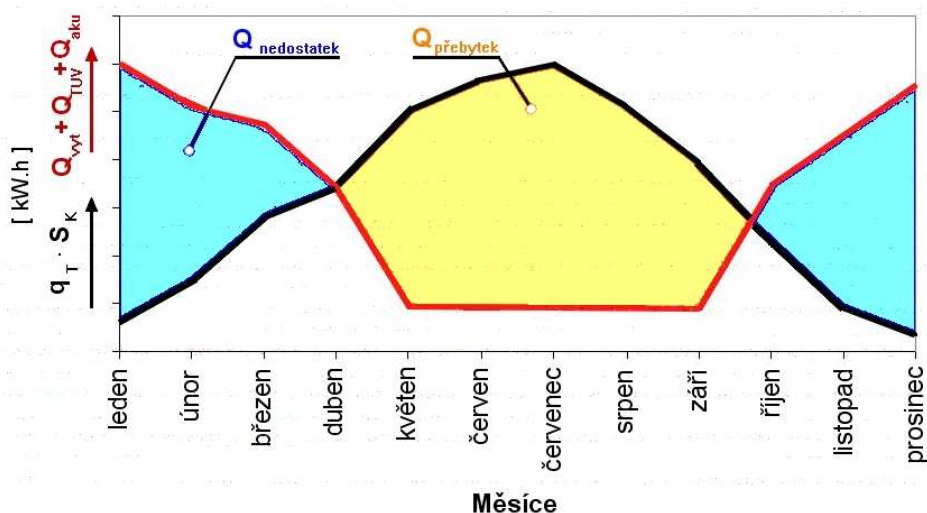
4.1 Krátkodobá akumulace tepla vs. sezónní akumulace tepla

Při vytápění rodinných domů se v současné době stále více uplatňují obnovitelné zdroje energie, mezi něž patří zejména zdroje využívající solární energii, dále zdroje geotermální, využívající energii zemského jádra a v neposlední řadě zdroje využívající energii vzniklou při spalování biomasy. Některé obnovitelné zdroje energie (tepla) však mají tu negativní vlastnost, že obvykle neposkytují potřebné množství tepelné energie v době, kdy je po ní největší poptávka.

4.1.1 Akumulace tepelné energie ze solárních kolektorů

Solární kolektory poskytují největší množství tepelné energie během dne, kdy obvykle poptávka po teplé vodě a teple obecně není tak velká, jako večer a ráno, kdy uživatelé často provádí osobní hygienu a vyžadují tepelnou pohodu prostředí. Podíváme-li se na využití solárních kolektorů z dlouhodobého (celoročního) hlediska, uvidíme opět značnou disproporci mezi dostupným výkonem solárních kolektorů a

poptávkou po teplé vodě a teple, neboť z logiky funkce solárního kolektoru vyplývá, že větší výkon bude podávat v letních měsících, kdy jsou doba a intenzita slunečního záření největší, ovšem poptávka zejména po teple pro vytápění rodinných domů je takřka nulová. Oproti tomu v zimních měsících, kdy je spotřeba tepla a teplé vody na vrcholu, neposkytují obvykle solární kolektory dostatečný výkon pro její pokrytí a to zejména kvůli nízké intenzitě slunečního záření a značným tepelným ztrátám solárních kolektorů do okolí. Tuto nevyváženost vystihuje graf na obr. 4-1.



Obr. 4-1 Znáznornění letního přebytku a zimního nedostatku tepelné energie [16]

Aby bylo možné efektivně využít tepelnou energii získanou v době nejvyšších solárních zisků pro pokrytí její spotřeby s časovým odstupem, je nutné tuto tepelnou energii vhodně akumulovat. Jak už bylo naznačeno v předchozím textu, je možné se dívat na časový posun mezi získáváním tepelné energie a jejím využitím jednak z krátkodobého hlediska nebo z hlediska dlouhodobého (celoročního). V návaznosti na to proto mluvíme buď o krátkodobé akumulaci tepelné energie, nebo o akumulaci dlouhodobé (sezónní). Krátkodobou akumulací se rozumí „skladování“ tepla pro překlenutí doby v řádech několika hodin až několika dnů. Sezónní akumulací je pak míněno skladování tepla nashromážděného během letních měsíců pro jeho pozdější využití během chladných měsíců během celého otopného období.

4.1.2 Akumulace tepelné energie z tepelných čerpadel

K využívání geotermální energie a tepelné energie Slunce akumulované ve vzduchu, vodě nebo půdě slouží zařízení, která se nazývají tepelná čerpadla. Tepelná

čerpadla převážně využívaná na území České republiky rozlišujeme dle primárního zdroje energie na tepelná čerpadla země-voda a tepelná čerpadla vzduch-voda. Princip funkce tepelného čerpadla země-voda je názorně popsán např. v [19] proto jej nebudeme popisovat v této práci, neboť to ani není jejím účelem.

Pro tepelné čerpadlo typu vzduch – voda je akumulace tepla důležitá, což je dáno několika důvody.

Instalace akumulčních nádrží u tepelných čerpadel typu vzduch-voda se provádí především za účelem vytvoření zásoby tepelné energie pro tzv. odmrazování výparníku. Jedná se o proces, při kterém se obvykle využívá tepelná energie naakumulovaná v nádrži pro odstranění námrazy, vzniklé zmrznutím zkondenzované vzdušné vlhkosti na vnějším povrchu výparníku. Tento jev je při provozu tepelného čerpadla nežádoucí, jelikož vrstva námrazy zvyšuje tepelný odpor teplosměnné plochy výparníku a zhoršuje tak prostup tepla a s ním i účinnost neboli topný faktor tepelného čerpadla.

Dalším významným důvodem pro kombinaci tepelného čerpadla s akumulční nádrží je snížení počtu startů kompresoru. Toto opatření vede k významnému prodloužení životnosti kompresoru.

Tepelná čerpadla jsou obecně provozována při sníženém cenovém tarifu za elektrickou energii. Tento tarif bývá obvykle poskytován dodavateli v rozsahu 22 hodin denně, a proto se tepelné čerpadlo na zbylé dvě hodiny denně vypíná a tepelné požadavky budovy jsou kompenzovány buď bivalentním zdrojem, anebo právě energií uloženou v akumulční nádrži.

Krátká doba, kterou je potřeba pomocí akumulace překlenout, napovídá, že množství energie, kterou je potřeba naakumulovat pro dobu mimo nízký tarif, je relativně malé. U tepelných čerpadel tedy hovoříme spíše o akumulaci krátkodobé.

4.1.3 Akumulace tepelné energie získané spalováním biomasy

Akumulční nádrže u tepelných zdrojů na biomasu se uplatňují zejména kvůli snížené možnosti regulace výkonu tepelného zdroje – kotle. Z hlediska optimálního provozu kotle na tuhá paliva je žádoucí, aby byl kotel provozován při konstantním výkonu a s co nejnižším počtem zátopů, které vedou k nárůstu spotřeby paliva a zároveň snížení životnosti kotle. Při aplikaci akumulční nádrže je možné kotlem akumulční kapalinu v nádrži „nahřát“ za optimálních provozních podmínek a teplo v ní

akumulované udržet pro využití s časovým odstupem. Z toho vyplývá další velká výhoda instalace akumulární nádrže ke kotli na tuhá paliva, a tou je významné zvýšení komfortu obsluhy, kdy na jeden zátop lze naakumulovat množství tepla potřebné na několikadenní pokrytí jeho spotřeby. Kotel se tím pádem na dobu čerpání energie (tzv. vybíjení) z akumulární nádrže vypíná (nebo běží v útlumovém režimu) a snižuje se tak spotřeba paliva a četnost přítomnosti obsluhy u kotle kvůli přikládání paliva či zátopu.

Dalším přínosem instalace akumulární nádrže do otopného systému je hydraulické vyvážení jednotlivých okruhů s odlišným průtokem otopné vody.

4.2 Akumulace ve formě citelného tepla

Tento způsob akumulace tepla je v současné době nejrozšířenější a je založen na principu využití tepelné kapacity akumulárního materiálu. Z hlediska poměru ceny a hodnoty měrné tepelné kapacity je pro tento účel nejvýhodnější využití vody, jejíž měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku $p = 98066 \text{ Pa}$ a teplotě $T = 293,15 \text{ K}$ je $c_p = 4180,9 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [2].

Akumulace citelného tepla je založena na zvyšování teploty akumulárního materiálu (látky) a tepelná kapacita dané látky je rovna specifickému teplu, vydanému látkou při změně její teploty.

Pro lepší představu při porovnávání různých způsobů akumulace převedme tepelnou kapacitu vody na množství tepelné energie E v kWh , které lze pojmout do 1 m^3 vody při běžně dosahovaném rozdílu teplot $\Delta T = 40 \text{ K}$. Hustotu vody pro výpočet uvažujeme $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ při $T = 293,15 \text{ K}$ [1].

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T = \frac{1}{3600} \cdot 998,2 \cdot 4180,9 \cdot 40 = 46370,8 \text{ Wh} \doteq 46,37 \text{ kWh} \quad (4-1)$$

Veličina $E [\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}]$ je v zahraniční literatuře často nazývána jako energetická hustota (energy density) viz např. [3].

Nevýhodou akumulace citelného tepla jsou značné tepelné ztráty.

Například Vaněk [16] se ve své diplomové práci zabýval mimo jiné výpočtem tepelných ztrát akumulární nádrže na vodu a došel k následujícímu výsledku:

Při potřebném množství akumulované energie 10 230 kWh/rok vychází potřebný objem akumulční nádrže na vodu 224 m³, což přibližně odpovídá výsledku rovnice (4-1). Tepelná ztráta betonové akumulční nádrže uložené v zemi, izolované částečně polystyrenem a částečně pěnovým sklem je pak při uvažování průměrných venkovních teplot a výpočtových teplot vody v nádrži celkem 4 396,62 kWh/rok. Zde vidíme, že množství ztrátového tepla tvoří téměř polovinu celkového potřebného ročního množství tepla.

4.3 Akumulace ve formě latentního tepla

Využití latentního tepla má již dlouhou historii využívání v oblasti kompresorových oběhů v chlazení a tepelných čerpadlech. Konkrétně u tepelných čerpadel je třeba nejprve dodat do systému množství tepla odpovídající výparnému teplu oběžného chladiva a po stlačení par chladiva v kompresoru, lze opět latentní teplo z chladiva odnímat při kondenzaci v kondenzátoru, ovšem již při vyšší teplotě než jakou mělo chladivo při vypařování.

Akumulace využívající latentního tepla je v podstatě snaha o prodloužení doby mezi fázovými změnami akumulční látky z tuhé fáze na kapalnou resp. z kapalně fáze na plynnou a naopak.

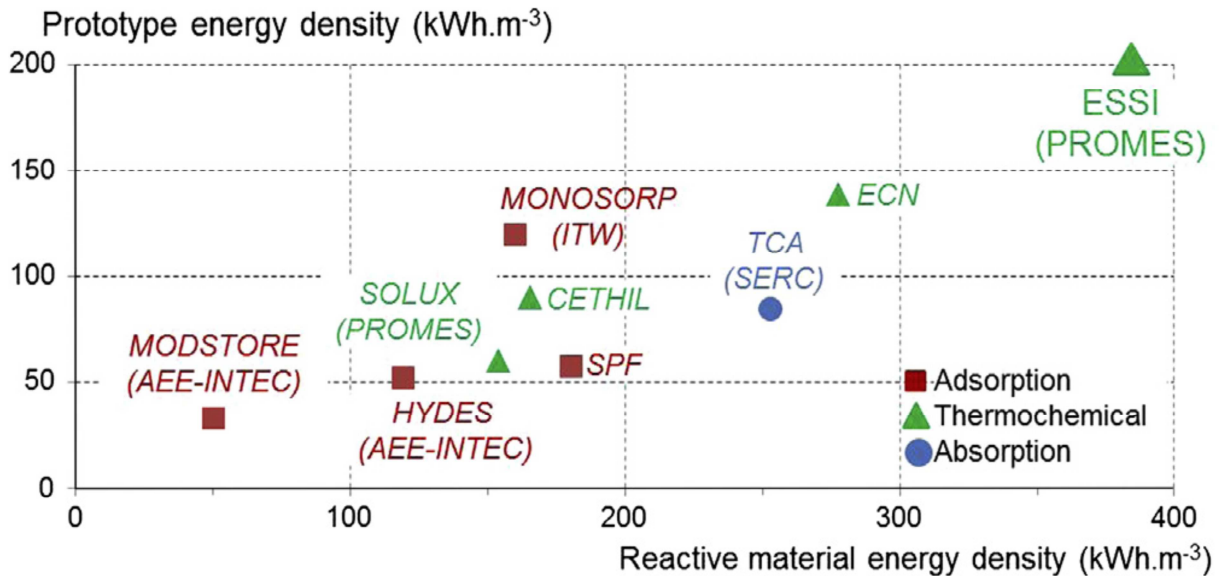
Latentní teplo je množství tepla absorbovaného nebo vydávaného materiálem, který mění své skupenství za konstantní teploty. Při překročení teploty tání materiál s fázovou změnou (PCM – Phase Change Material) taje a odebírá energii okolí, odpovídající latentnímu teplu daného materiálu. Obráceně, latentní teplo je vydáváno materiálem, jakmile je ochlazován a PCM přechází zpět do pevného skupenství. Studie, využívající různé druhy PCM, ukazují, že akumulční zásobníky využívající PCM mohou uložit 5 – 14 krát více tepla, než materiály akumulující citelné teplo. I tak ovšem vycházejí materiály pracující s citelným teplem levněji než PCM. Oba dva způsoby akumulace pak provází poměrně velké ztráty tepelné energie, a proto nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování tepla. [6]

4.4 Akumulace s chemickou reakcí

Jako akumulaci s chemickou reakcí označujeme mimo jiné způsob ukládání tepla na základě sorpce. Jedná se o proces vázání plynné látky do kapaliny (absorpce) nebo častěji na povrch tuhé látky (adsorpce), při kterém, v případě vhodně zvolených reaktantů, dochází k uvolňování tepelné energie. Následnou resorpcí za přívodu tepelné energie ze zdroje, je akumulární materiál regenerován (plynná látka je z něj uvolňována) a dochází tak fakticky k ukládání tepelné energie. Tato energie pak může být z akumulárního materiálu s časovým odstupem uvolněna opětovným procesem sorpce.

Mezi dostupnými systémy akumulace tepla má sorpční proces výhodu vysoké hodnoty energetické hustoty (kolem 100 – 500 kWh/m³ akumulárního materiálu) a nízkých ztrát citelným teplem v období mezi akumulárními (nabíjecími) a topnými periodami, neboť energie je ukládána ve formě chemického potenciálu a citelné teplo je minimální. Proto jsou takové systémy ideální pro aplikaci na sezónní akumulaci tepla pro vytápění obytných budov. V porovnání s „konkurenčními“ systémy se hodnoty energetické hustoty pohybují kolem 90 kWh/m³ u systému pracujících na bázi latentního tepla a kolem 54 kWh/m³ u akumulace do vody (citelné teplo při rozdílu teplot $\Delta T = 70$ °C a tepelné ztrátě 25 %). [3]

Řekněme, že pro různé systémy akumulace tepla mohou být definovány odlišné hodnoty energetické hustoty podle toho, zda vztahujeme tyto hodnoty k množství aktivního materiálu (tedy materiálu účastnícího se reakce) nebo je vztahujeme k celému objemu reaktoru, zahrnujícímu jak aktivní materiál, tak i nevyužitý objem materiálu, objem všech zařízení, která jsou potřebná pro přenos tepla a hmoty při reakci v reaktoru a dále pro přenos tepla do otopné soustavy (výměníky tepla, solární kolektory, atd.). Na obr. 4-2 je znázorněno porovnání různých v současné době vyvíjených systémů při zohlednění výše popsaných dvou přístupů k hodnocení energetické hustoty. Na vodorovné ose je vynesena energetická hustota vztažená k aktivnímu (reagujícímu) objemu materiálu a na svislé ose je vynesena energetická hustota akumulárního materiálu vztažená k objemu celého systému. [4]

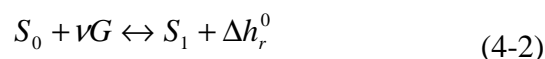


Obr. 4-2 Energetické hustoty různých prototypů sorpčních akumulacích systémů jako funkce energetické hustoty reakčních samotných materiálů použitých v prototypech: TCA (LiBr/H₂O), HYDES a MODSTORE (Silica gel/H₂O), SPF (Zeolithe + 13X/H₂O), MONOSORP (Zeolithe 4A/H₂O), CETHIL (MgSO₄ + Zeolithe + 13X/H₂O), SOLUX (SrBr₂/H₂O), ECN (MgCl₂/H₂O), ESSI (SrBr₂/H₂O). [4]

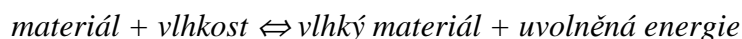
Jak je patrné z diagramu na obr. 4-2 energetická hustota jednotlivých prototypů akumulacích zařízení je výrazně nižší než energetická hustota samotného reakčního materiálu. Mezi většinou porovnávaných prototypů se nejvyšší hodnoty energetické hustoty pohybují kolem 280 kWh/m³ pro samotný reakční materiál a kolem 140 kWh/m³ pro celé zařízení. [4]

Benoit a kol. ve své práci uvádí výsledky výzkumu, prováděného na zařízení pracujícím na principu adsorpce vodní páry do pevného porézního materiálu. Dvojice adsorbent/voda se obecně nazývá pracovní pár. Termochemický proces založený na takovém pracovním páru hydrát/voda může probíhat ve dvou odlišných režimech. První z nich je velmi jednoduchý a pracuje s čistou vodní parou za nízkého tlaku. Nicméně právě nutnost udržení nízkého tlaku během reakce přináší řadu konstrukčních komplikací. Proto se v poslední době prosazuje spíše druhý z možných způsobů, nahrazující čistou vodní páru vlhkým vzduchem za normálního tlaku. Tento způsob je výhodný především z hlediska jednoduchosti konstrukce reaktoru, ovšem je náročnější na procesy spojené s úpravou vzduchu.[4]

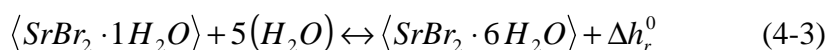
Obecně lze tedy říci, že termochemické akumulacích systémy pracují s vratnou reakcí mezi pevnou látkou a plynem dle rovnice (4-2):



Velmi zjednodušeně se dá rovnice (4-2) přepsat v následujícím tvaru:



Michel a kol. pro svůj výzkum zvolili jako pracovní pár bromid stroncnatý a vlhký vzduch. Termochemická reakce pak probíhá dle rovnice (4-3):



kde členy $\langle \text{SrBr}_2 \cdot 1\text{H}_2\text{O} \rangle$ a $\langle \text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rangle$ jsou soli v dehydratovaném (S_0) resp. hydratovaném (S_1) stavu, reaktivní plyn (G) je vodní pára a stechiometrický koeficient (ν) je 5 mol_G/mol_S. [4]

Rovnovážné podmínky (p_{eqSG} , T_{eqSG}) takové reakce mezi pevnou látkou a plynem lze popsat pomocí Clausius-Clapeyronovy rovnice:

$$\ln\left(\frac{p_{eqSG}}{p^0}\right) = -\frac{\Delta h_r^0}{\nu R T_{eqSG}} + \frac{\Delta s_r^0}{\nu R} \quad (4-4)$$

kde p^0 je referenční tlak (1 bar). Standardní reakční entalpie a entropie byly změřeny v [5]: $\Delta h_r^0 = 337,000 \text{ J} \cdot \text{mol}_S^{-1}$ a $\Delta s_r^0 = 875 \text{ J} \cdot \text{mol}_S^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

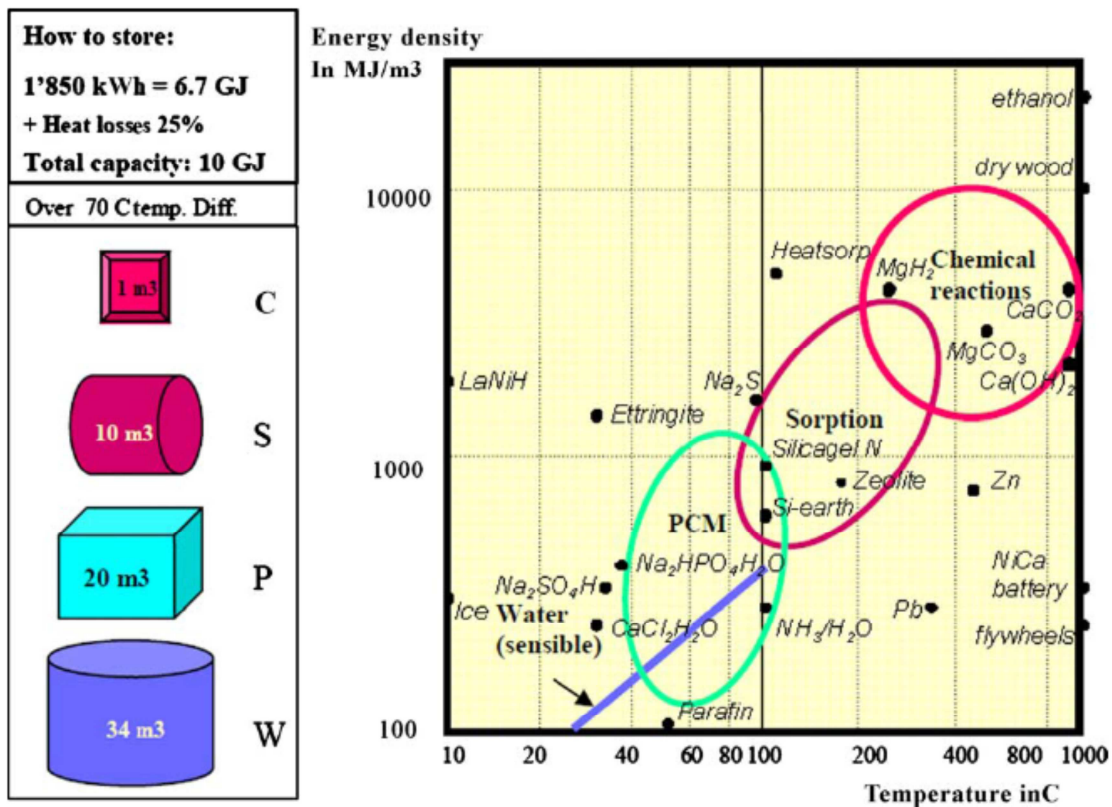
Proto jsou podmínky termodynamické rovnováhy určeny pouze jednou proměnnou a to buď tlakem plynu p_{eqSG} nebo teplotou pevné látky T_{eqSG} . Pro konkrétní případ termochemického systému pracujícího s vlhkým vzduchem při atmosférickém tlaku, jsou podmínky termodynamické rovnováhy závislé na parciálním tlaku vodní páry ve vlhkém vzduchu. [4]

Michel a kol. ve své práci dále popisují funkci systému termochemické akumulace tepla pro vytápění takto:

- Na konci léta je v ideálním případě reakční materiál (sůl) plně dehydratován. V tomto konkrétním případě se jedná o $\text{SrBr}_2 \cdot 1 \text{H}_2\text{O}$.
- Během topné sezóny (zimní provoz): proud vlhkého vzduchu je veden do reaktoru, vodní pára obsažená ve vzduchu reaguje s dehydratovanou solí. Dochází k exotermické reakci a termochemický systém generuje teplo, dále využitelné v otopném systému (Δh_r^0 na 1 mol soli). Na konci tohoto procesu je celá vsádka soli plně hydratovaná ($\text{SrBr}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$).

- Během následujícího letního období je vlhký vzduch ohříván pomocí solárních kolektorů a poté je tento horký vzduch profukován skrze porézní vrstvu hydratovaného bromidu stroncnatého. To vede k endotermické rozkladné reakci (dehydrataci) sextahydrátu bromidu stroncnatého na monohydrát bromidu stroncnatého.
- V době mezi nabíjecím a topným obdobím (vybíjením) je reaktor uzavřen a odpojen od reakčního plynu (vlhkého vzduchu), aby mohlo být reakční teplo skladováno po dlouhou dobu. Tepelné ztráty jsou velmi malé, protože jsou spojeny pouze s citelným teplem, které je zde významně menší, než množství získaného tepla z reakce. Proto jsou termochemické systémy vhodné pro sezónní akumulaci.[4]

N'Tsoukpoe ve své práci [6] uvádí přehled v současnosti známých způsobů akumulace tepla. Na obrázku 4-3 jsou znázorněny pozice jednotlivých principů a mechanismů v závislosti energetické hustotě [MJ/m³] a na teplotě [°C]. Dále jsou v něm vyznačeny oblasti, ve kterých se uplatňují jednotlivé jevy (citelné teplo, fázové změny, sorpce, chemické reakce).



Obr. 4-3: Energetické hustoty různých vysokoenergetických metod akumulace tepla. Symboly v levé části obrázku označují druhy akumulacních procesů: C – akumulace s chemickou reakcí, S – sorpční akumulace, P – akumulace s fázovou změnou (PCM), W – akumulace do vody. [6]

Z obrázku 4-3 je patrné, že nejvyšších teplot a zároveň nejvyšší energetické hustoty je možné dosáhnout pomocí chemických reakcí resp. využití jejich reakčního tepla (červená oblast). Naproti tomu nejnižších teplot a energetických hustot je dosahováno při použití citelného tepla vody (modrá oblast). V levém sloupci na obr. 4-3 je znázorněno přehledné srovnání jednotlivých metod podle jejich energetické hustoty. Je zde uvedeno, jaké objemové množství různých materiálů a metod akumulace je potřeba na uložení 1850 kWh s 25% tepelnou ztrátou, což v přepočtu činí celkovou kapacitu 10 GJ. Zde je vidět značný rozdíl mezi akumulací s chemickou reakcí (označená písmenem „C“), která na uložení daného množství tepla potřebuje zhruba 1 m³ materiálu a akumulací ve formě citelného tepla do vody (označená písmenem „W“), kde na stejné množství energie je potřeba kolem 34 m³ vody. Materiály pracující na bázi sorpce se svou energetickou hustotou velmi blíží materiálům s chemickou reakcí, které jsou ovšem mnohem náročnější z hlediska konstrukce reaktoru a říditelnosti reakce.

Z toho důvodu jsou sorpční mechanismy nejvíce rozvíjenými metodami pro dlouhodobou akumulaci tepla.

5 Koncepce manipulace s partikulárními materiály [7]

Nezbytnou součástí sušicího zařízení jsou prvky, zajišťující podávání materiálu do sušicí komory. Souhrnně je můžeme nazvat podávací zařízení.

Podávače jsou důležitým prvkem sušárny ovlivňujícím spolehlivý chod celého zařízení. Jejich význam je zejména při sušení materiálů přicházejících ve stavu sypkém, polotuhém a kašovitém.

Při volbě podavače je nutno přihlížet zejména k:

- a) vlastnostem vlhkého materiálu
- b) množství podávaného materiálu
- c) parametrům a sušicímu prostoru (tlak, teplota).

Vlastnosti materiálu – fyzikální a fyzikálně mechanické.

Fyzikální vlastnosti není možné ovlivňovat (měrná hmotnost, tvrdost apod.).

Fyzikálně-mechanické vlastnosti jsou ovlivněny předchozím zpracováním nebo úpravou materiálu (mletí, flotace, třídění, mechanické odvodnění apod.) a mají značný vliv na reologické vlastnosti. Jsou to zejména:

- a) sypná hmotnost
- b) granulometrické složení
- c) vlhkost materiálu
- d) úhel vnitřního tření
- e) úhel statického odklonu.

Významná je zejména vlhkost, která může být vázána jako krystalická, adsorbovaná, mikrokapilární nebo styková. Pro reologické vlastnosti je důležitá vlhkost v makrokapilárách a ve stykových bodech, která ovlivňuje pohyblivost materiálu m . Ta bývá vyjadřována pomocí součinitele vnitřního tření f , který je přibližně roven hodnotě tangenty úhlu statického odklonu β tj. $f = \tan \beta$; pak pohyblivost materiálu je

$$m = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{1-f} \quad [-] \quad (5-1)$$

Pro sypké materiály se hodnota pohyblivosti materiálu m pohybuje mezi 0,3 a 0,5.

Podavače dělíme na periodicky popř. kontinuálně pracující, nebo na podavače s úpravou popř. bez úpravy dávkovaného materiálu.

Podavače bez úpravy materiálu jsou např.:

a) *turniketové podavače* – používají se pro materiály práškovité, zrnité nebo vločkovité. Pro materiály lepivé je nutná konstrukční úprava s vyškrabovačem. Doporučené průměry a šířky rotorů turniketů uvádí ON 26 6151;

b) *pásové podavače* – hlavní částí je dopravník tvořený nekonečným pásem, obepínajícím dva bubny. Jeden (tzv. hlavní) je připojen na elektromotor a zajišťuje pohyb pásu. V oblasti hlavního bubnu přiléhá na dopravník násypka vlhkého materiálu.

c) *šnekové podavače* – nejvýznamnější typ vhodný pro nejrůznější druhy materiálů. Podavače mohou mít šnekovnici plnou, obvodovou nebo lopatkovou, jednochodou nebo dvouchodou.

Stoupání šnekovnice se volí $s = D$ nebo $s = 0,8 D$. První případ se volí u sypkých materiálů, pro plastoviskózní materiály je stoupání 80 % hodnoty průměru šnekovnice.

Podrobnější kritéria pro volbu parametrů šnekového podavače (průměr, otáčky, zaplnění atd.) jsou uvedena v ČSN 26 2802.

d) *vibrační podavač* – se skládá z budiče vibračního pohybu, žlabu a násypky. Vibrační podavače jsou pružně uloženy nebo zavěšeny. Žlab může být otevřený nebo uzavřený (průřez čtvercový, obdélníkový, kruhový apod.). Nejčastěji se používají elektromagnetické nebo mechanické budiče. Pro elektromagnetické vibrační podavače byly vypracovány oborové normy ON 26 6900 a ON 26 6901. Výkonnosti vibračních podavačů se pohybují ve velmi širokém rozmezí od nejmenších až po (600 – 800) m³/h.

6 Přehled konvenčních zařízení pro sušení sypkých materiálů

Nejrozšířenějším způsobem v technické praxi je sušení materiálů s konvektivním přestupem tepla.

6.1 Rychlost sušení [9]

Nejdůležitější veličinou pro návrh sušárny je rychlost sušení. Průběh sušení popisují rovnice rychlosti sušení, se kterou souvisejí též rozměry aparátu. Rychlost sušení vyjadřujeme pomocí intenzity toku vlhkosti na fázovém rozhraní ϕ_{Aw} . Je-li koncentrace vlhkosti v materiálu dostatečně velká, může být parciální tlak vlhkosti nad materiálem roven tlaku nasycených par kapaliny. Za těchto podmínek obvykle existuje určitý rozsah koncentrací vlhkosti, při kterých odpor proti sdílení hmoty zůstává v plynné fázi. Pak nezáleží na tom, jaké vlastnosti má vlhký materiál, nýbrž pouze na podmínkách v sušicím plynu a sušení lze považovat za odpařování volné kapaliny. V takovém případě můžeme rychlost sušení stanovit z podmínek v plynné fázi. Intenzita sušení v některém místě a okamžiku je dána vztahem [9]

$$\phi_{Aw} = k_y (y_A - y_{Aw}) = k_Y (Y_A - Y_{Aw}) \quad (6-1)$$

Jelikož koncentrace vlhkosti v plynné fázi bývá malá, lze předpokládat, že

$$k_y = k_Y (1 + Y_A)(1 + Y_{Aw}) = k'_y (1 + Y_{Aw}) \quad (6-2)$$

a ke stanovení součinitele přestupu hmoty můžeme využít známých závislostí pro k_y nebo k'_y (vztah mezi těmito dvěma koeficienty vyjadřuje vztah (6-3)), popř. na základě analogie mezi sdílením tepla a hmoty použít vztahů známých pro součinitel přestupu tepla α .

$$\frac{k_y}{k_Y} = \frac{k'_y}{k'_Y} \quad (6-3)$$

kde index y resp. Y udává způsob vyjádření koncentrace difundující složky (y označuje látkové množství a Y hmotnostní zlomek. Čárka odlišuje součinitel přestupu hmoty jednotkou plochy od podobné veličiny pro celkovou intenzitu toku složky. [9]

Hodnota koncentrace vlhkosti na fázovém rozhraní je dána tlakem nasycených par kapaliny, tvořící vlhkost, při teplotě na fázovém rozhraní. Tato teplota souvisí se

sdílením tepla mezi sušeným materiálem a jeho okolím. Předpokládejme, že ke sdílení tepla dochází pouze mezi materiálem a sušicím plynem. Pro intenzitu sdílení tepla v libovolném místě fázového rozhraní a libovolném okamžiku platí rovnice [9]

$$q_w = \alpha(t - t_w) \quad (6-4)$$

Předpokládejme dále, že materiál je vyhřát na teplotu sušení a že nenastávají ztráty tepla do okolí. Teplo, které plyn odevzdává, se pak spotřebuje výhradně na odpařování kapaliny, tj. platí vztah [9]

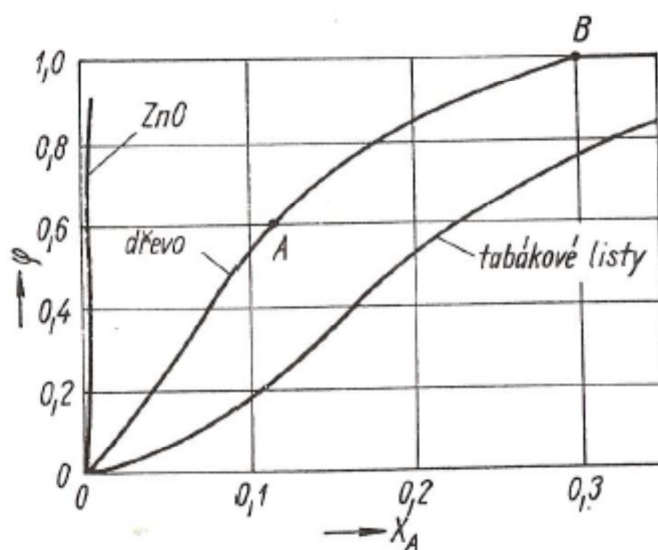
$$q_w = -\phi_{Aw} \Delta h_{vAw} \quad (6-5)$$

Záporné znaménko zohledňuje fakt, že směr intenzit toku tepla a hmoty je opačný. Spojením rovnic (6-1), (6-4) a (6-5) dostaneme vztah mezi teplotou a koncentrací na fázovém rozhraní:

$$t - t_w = \frac{k_Y \Delta h_{vAw}}{\alpha} (Y_{Aw} - Y_A) \quad (6-6)$$

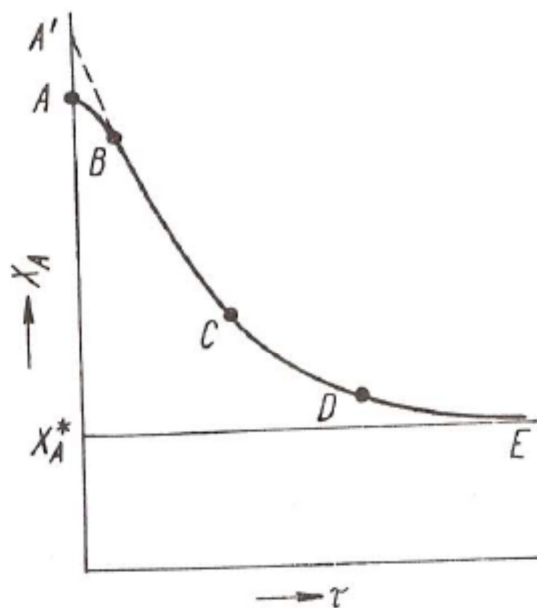
Stav vzduchu v sušárně se v oblasti odpařování volné (nevázané) vlhkosti mění po čáře vlhkého teploměru v entalpickém diagramu a teplota povrchu materiálu je rovna teplotě vlhkého teploměru pro použitý sušící plyn. Z entalpického diagramu pak získáme hodnoty t_w a Y_{Aw} a ty jsou v oblasti odpařování nevázané vlhkosti pro daný sušící plyn konstantní, pokud je sušení adiabatické. [9]

Za předpokladu, že sušícího plynu je velké množství, takže při průchodu oblastí sušení nevázané vlhkosti materiálu zůstává hodnota Y_A prakticky neměnná. Intenzita sušení je pak v celé této oblasti stálá. Situace se však změní, když parciální tlak vlhkosti nad sušeným materiálem klesne pod hodnotu tlaku nasycených par vlhkosti, tj. když se začne odpařovat vázaná vlhkost. Povrch materiálu již není pokryt souvislou vrstvou kapaliny, pára musí difundovat póry v sušeném materiálu a je nutno počítat nejen s difúzí v plynné fázi, ale i s difúzí ve vlhkém materiálu. Odpor proti sdílení hmoty vzroste a zároveň klesne hybná síla, neboť parciální tlak vázané vlhkosti je nižší než parciální tlak vlhkosti nevázané (obr. 6-1). [9]



Obr. 6-1 Závislost rovnovážné vlhkosti vlhkého materiálu na relativní vlhkosti vzduchu. [9]

Intenzita sušení tedy rychle klesá. Protože sdílení hmoty uvnitř sušeného materiálu je zpravidla komplikované, měří se rychlost sušení pokusně tak, že se zkoumaný materiál vloží do proudu sušícího média a zjišťuje se závislost úbytku hmotnosti vlhkého materiálu na době sušení. Tato závislost přepočtená na vztah mezi relativním hmotnostním zlomkem vlhkosti a dobou sušení plynem s konstantní koncentrací vlhkosti, je znázorněna na obr. 6-2. Jde o sušení materiálu s určitým obsahem nevázané vlhkosti. Průběh křivky v počátečním úseku závisí na teplotě vloženého materiálu, úsek AB odpovídá nižší teplotě než úsek A'B' (v praxi samozřejmě není na počáteční koncentraci materiálu závislý, jak by vyplývalo z obrázku). V úseku BC klesá koncentrace vlhkosti materiálu lineárně, v úseku CDE se pokles koncentrace zpomaluje a čára se asymptoticky blíží hodnotě X_A^* , tj. rovnovážné vlhkosti materiálu odpovídající konstantní vlhkosti sušícího plynu (obr. 6-1). Na základě této závislosti je možno znázornit změnu rychlosti sušení s dobou sušení nebo s vlhkostí materiálu. [9]



Obr. 6-2 Závislost relativního hmotnostního zlomku vlhkosti materiálu na době sušení při určité vlhkosti a teplotě sušicího plynu (křivka sušení). [9]

Jak již bylo uvedeno, budeme zde vycházet z předpokladu, že průtok sušicího plynu je tak velký, že lze zanedbat změnu jeho vlhkosti při průchodu sušárnou. To opravňuje k dalšímu předpokladu, že totiž rychlost sušení nezávisí na místě podél povrchu sušeného materiálu. Tok vlhkosti elementární plochou rozhraní mezi vlhkým materiálem a plynem je vzhledem k tomu, že $d\dot{m}_A$ vyjadřuje přítok vlhkosti do plynu a ϕ_{Aw} intenzitu odtoku vlhkosti z plynu,

$$d\dot{m}_A = -\phi_{Aw} dA \quad (6-7)$$

Z uvedeného předpokladu dostáváme pak integrací podél plochy rozhraní výraz pro tok odpařené vlhkosti v libovolném okamžiku sušení:

$$\dot{m}_A = -\phi_{Aw} A \quad (6-8)$$

Hmotnostní bilanci vlhkosti sušeného materiálu v libovolném okamžiku sušení lze zapsat rovnicí

$$-\dot{m}_A = m_C \frac{dX_A}{d\tau} \quad (6-9)$$

Dosadíme-li do bilanční rovnice hmotnosti, kde m_c vyjadřuje hmotnost sušiny a poměr hmotností vlhkosti a sušiny vyjadřuje střední hodnotu koncentrace vlhkosti v materiálu X_A , dostaneme dále vztah

$$\dot{m}_A = -\phi_{Aw} A = -m_c \frac{dX_A}{d\tau} \quad (6-10)$$

Hodnotu derivace koncentrace vlhkosti materiálu podle času je možno zjistit z křivky $X_A(\tau)$ stanovené experimentálně (obr. 6-2). [9]

6.2 Fluidní sušárny [7]

Důležitou charakteristickou veličinou vrstvy zrnitého (práškového) materiálu profukované plynem zdola nahoru je její tlaková ztráta p a její závislost na mimovrstvové rychlosti w . Poměrná tlaková ztráta připadající na jednotkovou výšku vrstvy je dána obecným vztahem

$$\frac{\Delta p}{H_0} = \frac{\lambda}{d} \rho_L \frac{w^2}{2}, \quad (6-11)$$

kde H_0 je výška nehybné vrstvy [m]

d je střední průměr částic [m]

λ je součinitel tření.

Závislost tlakové ztráty nehybné vrstvy na mimovrstvové rychlosti je v logaritmických souřadnicích lineární až do dosažení prahové rychlosti fluidace w_p , které odpovídá stav vrstvy nazývaný práh fluidace. Tomuto stavu odpovídá tlaková ztráta

$$\Delta p = \frac{\text{(tíha vrstvy mat. - vztlak)} + \text{trení o stenu}}{\text{plocha příčného průřezu}} \quad [Pa] \quad (6.12)$$

S dalším zvyšováním rychlosti proudění nastává expanze vrstvy (zvětšuje se mezerovitost ε), tlaková ztráta zůstává prakticky konstantní (zvyšuje se pouze o třecí ztráty v sušárně) až do okamžiku, kdy rychlost proudění plynu w dosáhne hodnoty w_u –

prahové rychlosti úletu. Při této rychlosti se mezerovitost $\varepsilon \rightarrow 1$, částice ulétají ze zařízení a tento stav nazýváme práh úletu.

Mezními stavy fluidní vrstvy jsou tedy práh fluidace a práh úletu, kterým přísluší rychlosti w_p a w_u . Prahovou rychlost fluidace možno např. stanovit podle metodiky Beránka a Sobola [7]

$$\frac{w_p}{w_u} = f(Be) \quad (6-13)$$

$$\text{kde} \quad Be = \frac{Re_K^3}{Ar} = \frac{w_k^3 \rho_L}{\nu_L g (\rho_M - \rho_L)} \quad (6-14)$$

je kritérium volného pádu částice. Reynoldsovo číslo pro pádovou rychlost částice w_k je

$$Re = \frac{w_k d}{\nu_L} \quad (6-15)$$

a

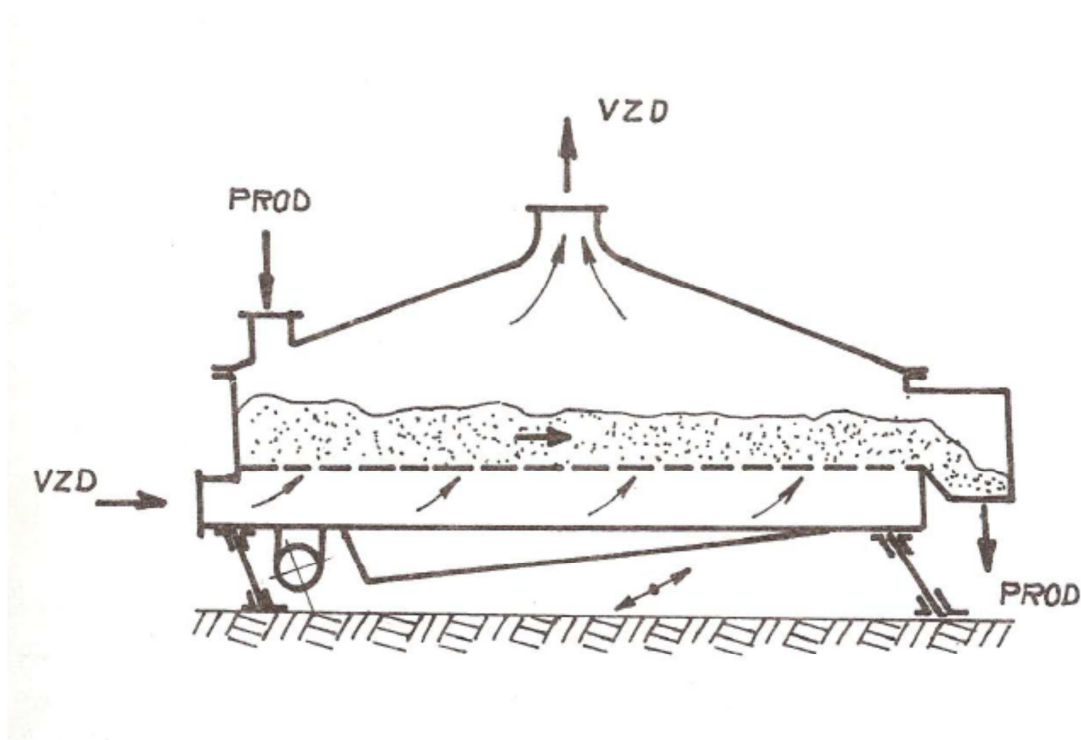
$$Ar = \frac{d^3 g}{\nu_L^2} \cdot \frac{\rho_M - \rho_L}{\rho_L} \quad (6-16)$$

je Archimédovo kritérium, charakterizující poměr síly tíže, zmenšené o vztlak, k síle vazkého tření působícího na částici. Empirické vztahy pro výpočet prahové rychlosti fluidace v různých oblastech proudění uvádí např. Hlavačka, Valchář a Viktorin [8].

6.3 Vibrofluidní sušárny

Vibrofluidní sušárny (viz obr. 6-3) patří mezi kontinuálně pracující zařízení, která díky vibračnímu pohybu žlabu umožňují současně sušit a v horizontálním směru dopravovat sušený materiál. Proto se svým principem funkce hodí pro použití v systémech sorpční akumulace tepla.

Vliv vibračního pohybu na vrstvu zrnitého materiálu se využívá v řadě technologických pochodů (sítování, mletí, pěchování, odvodňování, ohřev, chlazení, sušení atd.). U tepelných a difúzních procesů se využívá zejména skutečnosti, že vibrační pohyb podložky vyvolává intenzivní mísení částic v průřezu vrstvy, což umožňuje dobrý styk materiálu s teplosměnnými plochami, nebo s médiem proudícím vrstvou. [7]



Obr. 6-3 Vibrofluidní žlab. [17]

Při kontinuálním sušení se do konvekční sušárny nepřetržitě přivádí nejen sušící plyn, ale i vlhký materiál, a po vysušení se nepřetržitě odvádí. Vlhkost a teplota jsou funkcemi místa v sušárně, nejsou však funkcemi času (to zn. že se v konkrétním místě sušárny s časem nemění). Pro libovolný diferenciální úsek sušárny platí bilance vlhkosti analogická bilanci při absorpci či extrakci nemísitelnými rozpouštědly [9]:

$$d\dot{m}_A = \mp \dot{m}_C dX_A = \dot{m}_B dY_A \quad (6-17)$$

kde záporné znaménko platí při souproutém uspořádání a kladné znaménko při uspořádání protiproudém. Označíme-li koncentraci na vstupu indexem i a na výstupu indexem e , bude integrál rovnice (6-17) pro celou sušárnu

$$\dot{m}_A = \dot{m}_C (X_{Ai} - X_{Ae}) = \dot{m}_B (Y_{Ae} - Y_{Ai}) \quad (6-18)$$

Tato rovnice platí jak pro souprouté, tak pro protiproudé uspořádání pohybu plynu a materiálu.

Označíme-li symbolem \dot{Q} výsledný přítok tepla z okolí do sušeného materiálu a sušícího plynu, bude bilance entalpie diferenciálního úseku sušárny

$$d\dot{Q} + \dot{m}_C dI' = \mp \dot{m}_B dI \quad (6-19)$$

kde záporné znaménko platí při souproudém uspořádání a kladné při uspořádání protiproudém.

Entalpii vlhkého materiálu vyjádříme pomocí jeho relativní měrné entalpie I' , vztažené na $t = 0$, sušinu v pevném a vlhkost v kapalném skupenství, vztahem (předpokládáme zanedbatelné směšovací teplo)

$$I' = (c_{pC} + X_A c_{pAl})t \quad (6-20)$$

Teplo dodané sušenému materiálu a plynu v sušárně pak vypočítáme z rovnice:

$$dQ - m_c dI' = \dot{m}_B (I_e - I_i) d\tau \quad (6-21)$$

Výsledný přítok tepla do plynu, tj. tok dodávaného tepla, zmenšený o ztráty do okolí pak vyjadřuje vztah:

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_B (I - I_0) \quad (6-22)$$

Pokud zanedbáme tepelné ztráty mezi ohřívacem sušícího plynu a sušárnou je hodnota I rovna hodnotě na vstupu do sušárny:

$$I = I_i \quad (6-23)$$

Jestliže pak rovnici (6-22) násobíme $d\tau$ a integrujeme pro celou dobu sušení, dostaneme vyjádření množství tepla Q_k dodaného plynu v ohříváči:

$$Q_k = \dot{m}_B \tau (I_i - I_0) \quad (6-24)$$

7 Solární kolektory

Z hlediska využitelnosti solárních kolektorů při jejich aplikaci jako zdroje tepla pro sušení se nabízí dva jejich základní typy. Jednak je to solární kolektor vakuový trubicový, který pracuje s kapalným teplonosným médiem (nejčastěji s nemrznoucí kapalinou na bázi glykolu) a dále se nabízí využití vzduchového solárního kolektoru, který, jak jeho název napovídá, pracuje s přímým ohřevem vzduchu. V následujících dvou odstavcích si přiblížíme konkrétní vlastnosti obou zmíněných typů kolektorů a jejich předpoklady pro využití při sušení.

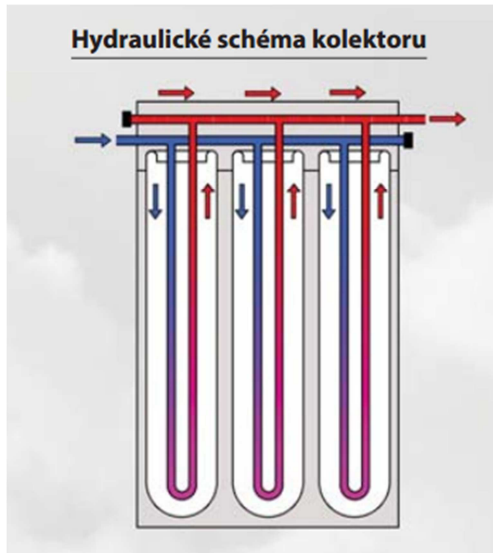
7.1 Vakuové trubicové kolektory

Trubicové vakuové solární kolektory obecně dosahují vyšších teplot než kolektory vzduchové, což je dáno především jejich lepší izolací (dvouplášťové vakuované trubice)

a také druhem teplotnosného média. V případě ohřevu vzduchu pomocí tohoto typu kolektoru je ale nutné použití dalšího výměníku voda – vzduch, což značně sníží celkovou účinnost přenosu tepla. Z tohoto důvodu bude v rámci analýzy využitelnosti solárních kolektorů v závěru této práce zhodnocena i varianta použití vzduchových solárních kolektorů.

Princip funkce trubicového vakuového kolektoru je popsán na obr. 7.1. Teplotnosná látka je čerpána oběhovým čerpadlem do kolektoru, kde prochází obvykle měděnou trubicí, která je naletovaná k tzv. absorberu. Absorbér je v podstatě plech z kovu s vysokou tepelnou vodivostí, který díky své ploše zvyšuje účinnost přestupu tepla radiací a následným vedením do teplotnosné látky. Absorbér je umístěn ve dvouplášťové skleněné trubicí, ve které je prostor mezi pláští vyplněn vakuem, které zajišťuje izolaci proti úniku tepla ven z kolektoru.

Dle statistik výrobce je během letních měsíců (červen až srpen) při slunečných dnech teoreticky možné dosáhnout průměrnou výstupní teplotu teplotnosné kapaliny 80 °C po dobu 6 hodin za den. Z tohoto údaje budeme později vycházet při analýze využitelnosti solárních kolektorů pro ohřev sušicího vzduchu.



Obr. 7-1: Schéma trubicového vakuového solárního kolektoru. [12]

7.2 Vzduchové solární kolektory

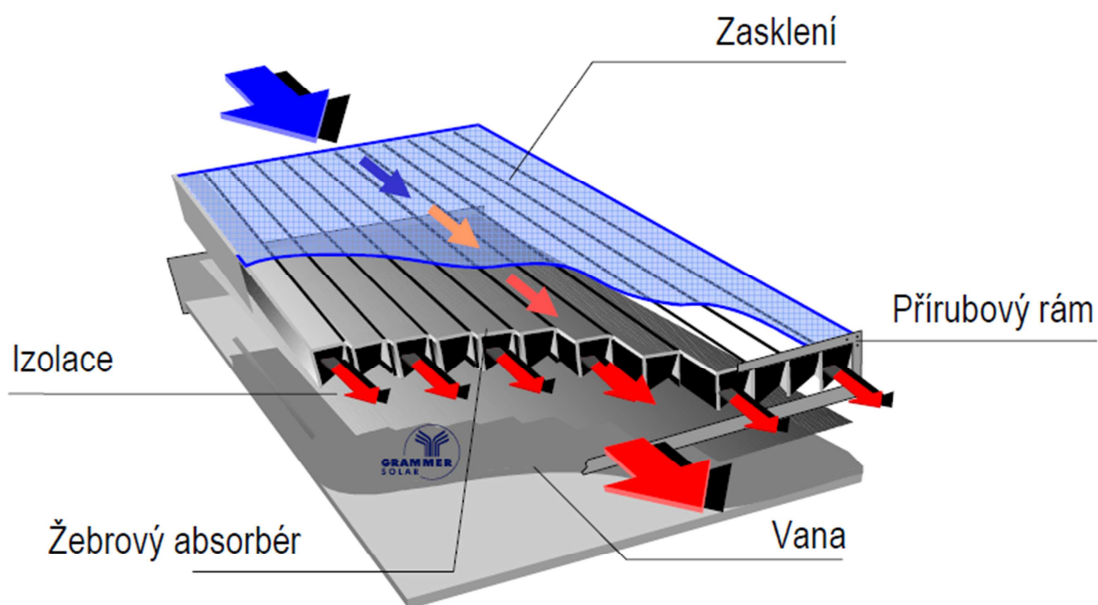
Jak již bylo zmíněno v kapitole 7.1 vzduchové solární kolektory se vyznačují nižší účinností než kolektory vakuové trubicové. Ovšem pro aplikaci na sušení poskytují výhodu přímého ohřevu vzduchu bez nutnosti použití dalšího tepelného výměníku, což

značně zjednoduší konstrukci celého zařízení a sníží pořizovací náklady. Na druhé straně ovšem vzduchový kolektor dosáhne nižší maximální teploty vzduchu a bude tak vyžadovat delší dobu zdržení sušeného materiálu v sušárně.

Výrobou a prodejem vzduchových solárních kolektorů pro aplikace na sušení zemědělských plodin se zabývá například německá firma Grammer Solar GmbH. Funkční schéma jednoho z jejích vzduchových kolektorů je zobrazeno na obr. 7-2. Kolektor je tvořen absorberem ve tvaru obdélníkových kanálů, jimiž proudí ohříváný vzduch. Zasklení kolektoru na jeho povrchu zvyšuje účinnost přestupu tepla a zároveň snižuje tepelné ztráty do okolí vlivem radiace.

Na obr. 7-3 je ukázka aplikace vzduchových solárních kolektorů firmy Grammer Solar na sušení zemědělských plodin.

Při analýze využitelnosti solárních kolektorů pro ohřev sušicího vzduchu budeme vycházet z předpokladu, že dosažitelná teplota vzduchu na výstupu z kolektoru v letním období při slunečných dnech je průměrně 60 °C.



Obr. 7-2: Schéma vzduchového solárního kolektoru firmy Grammer Solar. [11]



Obr. 7-3 Ukázka aplikací vzduchových solárních kolektřů v zemědělství. [13]

8 Experimentální stanovení sušících křivek

8.1 Měření okolních podmínek měření

Pro případné pozdější zopakování experimentu a validaci naměřených dat bylo nejprve nutné zjistit stav okolního prostředí (okolní podmínky) v laboratoři.

8.1.1 Měření relativní vlhkosti vzduchu v laboratoři

Měření relativní vlhkosti vzduchu v laboratoři jsem provedl pomocí Assmannova aspiračního psychrometru a jeho výsledky shrnuje tabulka 8-1. Stanovení relativní vlhkosti vzduchu je založeno na současném měření teploty suchého a mokrého teploměru, jehož mokrý konec je ofukován vzduchem s rychlostí proudění větší než $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Požadovaná rychlost proudění je zajištěna pomocí malého ventilátoru, který je součástí psychrometru.

Tabulka 8-1: Výsledky měření relativní vlhkosti vzduchu.

Veličina	Značení	Jednotka	Hodnota
parciální tlak syté páry při teplotě t_m	p_m''	MPa	0,0014016
parciální tlak syté páry při teplotě t_1	p_1''	MPa	0,0019364
barometrický tlak	p_b	MPa	0,10128
psychrometrická konstanta	A	1/K	6,56E-04
teplota suchého teploměru	t_1	°C	17
teplota mokrého teploměru	t_m	°C	12
relativní vlhkost vzduchu	ϕ	-	0,552

Jak je patrné z tabulky 8-1 relativní vlhkost vzduchu v laboratoři v době měření byla $\phi = 55,2 \%$.

8.2 Měření počáteční vlhkosti materiálu

Měření bylo provedeno na elektronickém analyzátoru vlhkosti Sartorius Model MA35 (viz obr. 8-1), které díky vysoušení infrazářením a kontinuálnímu měření úbytku hmotnosti vloženého vzorku umožňuje zjištění jeho počáteční relativní vlhkosti, obsahu sušiny, poměru obsahu vlhkosti vůči obsahu sušiny a zbytkové hmotnosti vzorku.



Obr. 8-1: Elektronický analyzátor vlhkosti Sartorius Model MA35.

8.2.1 Postup měření

Na hliníkovou misku jsem odměřil vzorek 10 g kompozitu CaCl_2 a silikagelu v hydratovaném stavu a provedl měření v elektronickém analyzátoru vlhkosti. Měření bylo opakováno třikrát pro tři vzorky odebrané ze stejného zásobníku kompozitu. Výsledky měření shrnuje tabulka č. 8-2).

Tab. 8-2: Výsledky měření počáteční vlhkosti materiálu.

č. vzorku	teplota sušení [°C]	hmotnost m0 vzorku na počátku měření [g]	hmotnost m1 vzorku na konci měření [g]	rel. vlhkost vzorku [%]	Absolutní vlhkost vzorku [%]	Rel. obsah sušiny [%]	Doba měření [min]
1.	80	10,000	5,7	43,00	75,44	57,00	81
2.	80	10,000	5,7	43,00	75,44	57	82
3.	80	10,000	5,668	43,32	76,43	56,68	89

Měření vlhkosti materiálu probíhalo za ustálených podmínek při konstantní okolní teplotě a tlaku. Měřené vzorky byly skladovány v uzavřené nádobě po dobu 30 dnů v prostoru laboratoře, ve které zároveň probíhalo měření. Vzhledem k výše zmíněným skutečnostem a výsledkům měření, které se neliší o více jak 0,32 %, lze považovat naměřenou počáteční vlhkost materiálu za ustálenou.

8.3 Měření na oběhové sušárně

8.3.1 Popis laboratorní oběhové sušárny

Oběhová sušárna patří mezi zařízení pracující s konvektivním přestupem tepla a hmoty. Sušící vzduch v sušárně za jejího provozu neustále cirkuluje a je hnán skrze sušící komoru, do které se vkládá sušený materiál. Sušící vzduch je před vstupem do sušící komory ohříván elektrickým odporovým tělesem. Sušený materiál je v sušárně umístěn na závěsné konstrukci pevně spojené táhly s laboratorní váhou, která kontinuálně snímá úbytek hmotnosti sušeného vzorku. Sušící vzduch proudí v sušící komoře nad povrchem vzorku, který je umístěn v hliníkové misce ve vrstvě o výšce 3 mm. Plocha, kterou zaujímá vzorek na sušícím lóži je $7,854 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Na obr. 8-2 je vyobrazena fotografie experimentální sušárny v halové laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT v Praze. Obr. 8-3 pak zobrazuje tuto sušárnu schematicky a důležité funkční prvky sušárny jsou očíslované dle následujícího seznamu:

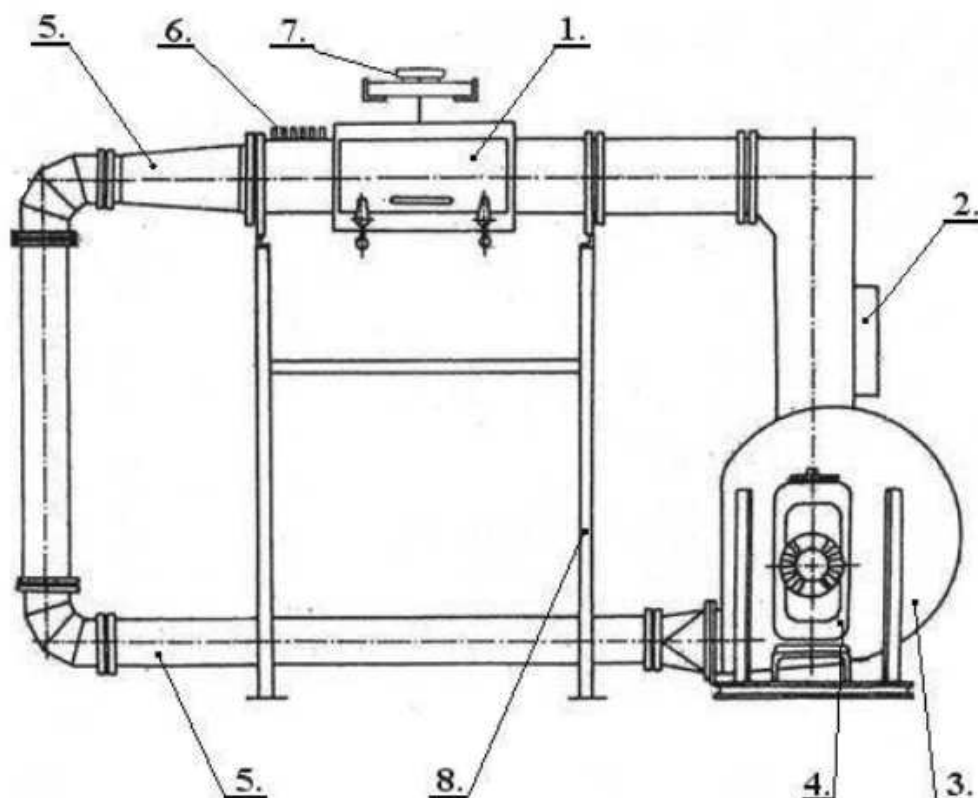
1. Sušící komora
2. Otopná tělesa
3. Ventilátor
4. Převodovka s motorem
5. Vzduchové kanály
6. Otopná tělesa

7. Váha AJH-CE 220
8. Nosná konstrukce

Provoz sušárny je řízen pomocí software, v jehož uživatelském rozhraní lze jednak nastavovat teplotu sušicího vzduchu, rychlost proudění vzduchu, teplotní hysterezi a zároveň je možné zaznamenávat hmotnost sušeného vzorku v závislosti na době sušení.



Obr. 8-2: Oběhová sušárna v halové laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze.



Obr. 8-3: Schéma oběhové sušárny. [10]

8.3.2 Postup měření

Sušárnu bylo nutné nejprve zahřát na provozní teplotu, což vyžadovalo její spuštění s nastavenou požadovanou teplotou přibližně 1 hod před začátkem samotného měření. Nastavení parametrů měření proběhlo pomocí uživatelského rozhraní regulátoru sušárny na PC.

Na hliníkovou misku jsem odměřil 20 g vzorku vlhké sloučeniny chloridu vápenatého a silikagelu. Vzorek jsem rozmístil na misce v rovnoměrné vrstvě o tloušťce 3 mm a vložil jej do závěsného přípravku v sušicí komoře (viz obr. 8-4 a 8-5). Po vložení vzorku do sušicí komory jsem komoru uzavřel a spustil ventilátor, otopná tělesa a záznam hmotnosti.

Proces sušení probíhal do doby, kdy se hmotnost vzorku ustálila, tedy do doby, kdy úbytek hmotnosti byl téměř neměřitelný. V některých případech bylo měření ukončeno dříve a to poté, co hmotnost vzorku klesla pod hodnotu odpovídající měrné vlhkosti vzorku $x = 0,2 \text{ kg H}_2\text{O/kg s.m.}$, neboť právě tato hodnota měrné vlhkosti je požadována zadavatelem.

8.3.3 Podmínky měření

Měření probíhalo při dvou různých teplotách sušicího vzduchu a dvou různých rychlostech proudění. Teploty sušicího vzduchu při experimentu byly voleny s ohledem na budoucí aplikaci, především na předpokládané využití solárních termických kolektorů, jako zdroje tepla pro ohřev sušicího vzduchu. Vzhledem k provozním podmínkám solárních kolektorů byly zvoleny teploty $T_A = 60\text{ °C}$ a $T_B = 80\text{ °C}$ které zhruba odpovídají maximálním reálně dosažitelným teplotám na plochém resp. vakuovém trubcovém kolektoru viz kapitola 7.



Obr. 8-4: Umístění vzorku sušeného materiálu v sušicí komoře.



Obr. 8-5: Vzorek sušeného materiálu po vyjmutí ze sušárny.

8.3.4 Vyhodnocení naměřených dat

K vyhodnocení sušících křivek z naměřených dat jsem použil program Matlab. Z hlediska návrhu sušárny je cílem vyhodnocení měření zjistit, za jakou dobu klesne obsah vody v materiálu (měrná vlhkost) na hodnotu 0,2 kg H₂O / kg s.m. Tato hodnota byla stanovena zadavatelem a zohledňuje předpokládané podmínky při skladování materiálu po sušení.

Pomocí řídicího software jsem získal závislosti úbytku hmotnosti sušených vzorků na době sušení. Pro vyhodnocení potřebné doby zdržení materiálu v sušárně za daných podmínek tzn. určení doby, za kterou obsah vody v materiálu klesne na hodnotu 0,2 kg H₂O / kg s.m., bylo nutné naměřený úbytek hmotnosti přepočítat na měrný obsah vlhkosti (relativní hmotnostní zlomek). K tomu bylo použito následujícího vztahu [10]:

$$x_{H_2O} = \frac{m_i - m_{k0}}{m_{k0}} \quad (8-1)$$

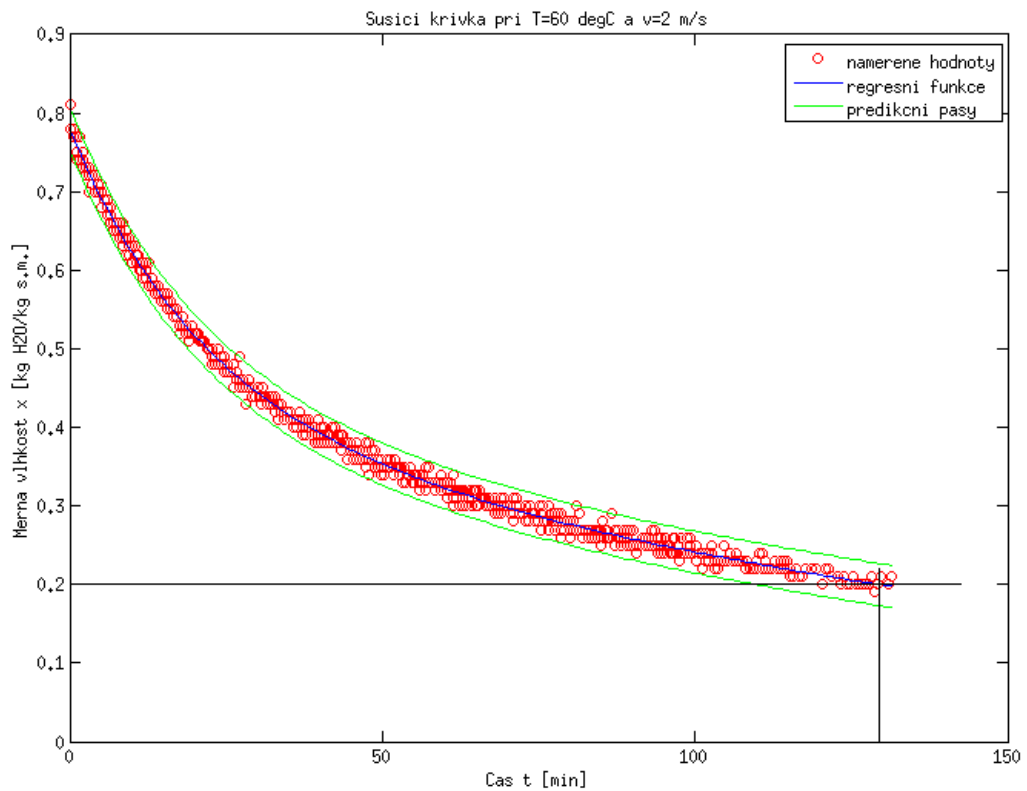
kde m_i je aktuální hmotnost sušeného vzorku v daném čase a m_{k0} je hmotnost suchého vzorku.

Jelikož závislost úbytku obsahu vlhkosti v sušeném materiálu vykazuje zjevně exponenciální charakter, použil jsem regresní funkci popsanou následující rovnicí:

$$f(t) = A \cdot e^{-Bt} + C \cdot e^{-Dt} \quad (8-2)$$

kde parametry A, B, C, D jsou parametry regresní funkce a t je doba sušení v [min].

Vyhodnocení 1. měření:



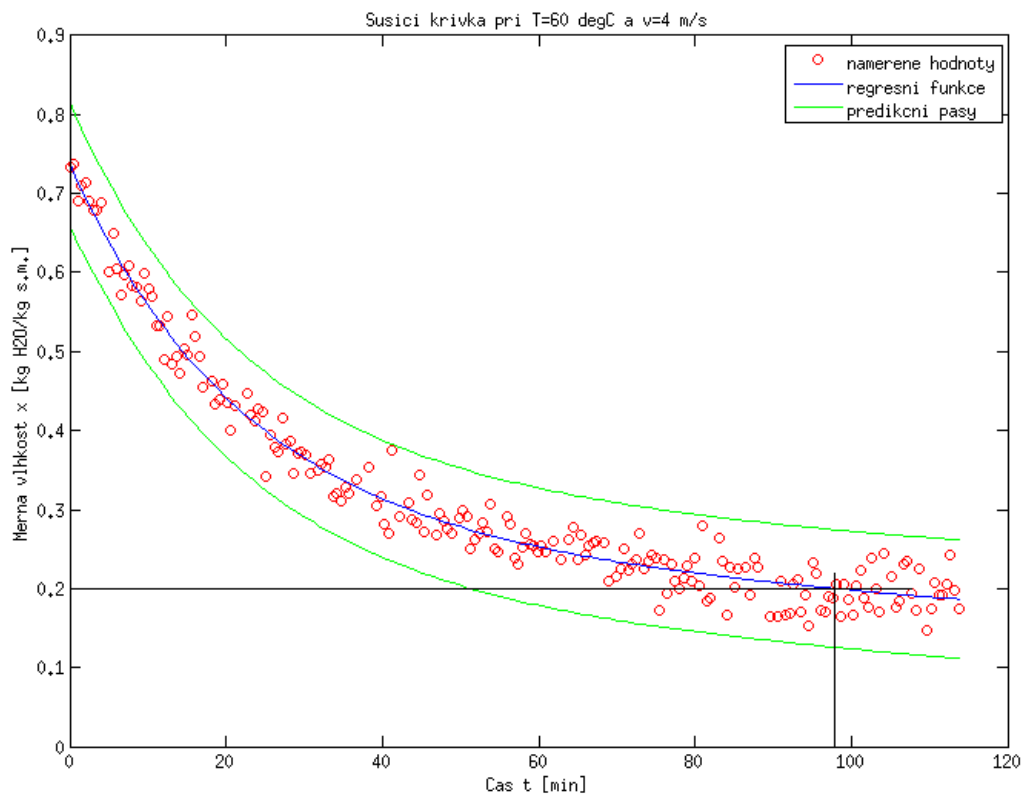
Obr. 8-6: Graf závislosti poklesu měrné vlhkosti sušeného materiálu na době sušení (sušicí křivka) při teplotě sušicího vzduchu $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ a rychlosti proudění sušicího vzduchu $w = 2 \text{ m/s}$.

Tab. 8-3: Parametry nelineární regrese.

Parametr	Hodnota parametru	Dolní mez	Horní mez
A	0,438666	0,424941	0,452392
B	0,006091	0,005785	0,006397
C	0,341574	0,329151	0,353996
D	0,048946	0,046457	0,051435

Výsledná doba sušení za kterou hodnota měrné vlhkosti klesne pod hodnotu 0,2 kg H₂O/kg s.m. při teplotě sušicího vzduchu $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlosti proudění sušicího vzduchu $w = 2\text{ m/s}$ je $t_{0,2} = 129,4482\text{ min}$.

Vyhodnocení 2. měření:



Obr. 8-7: Graf závislosti poklesu měrné vlhkosti sušeného materiálu na době sušení (sušící křivka) při teplotě sušicího vzduchu $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlosti proudění sušicího vzduchu $w = 4\text{ m/s}$.

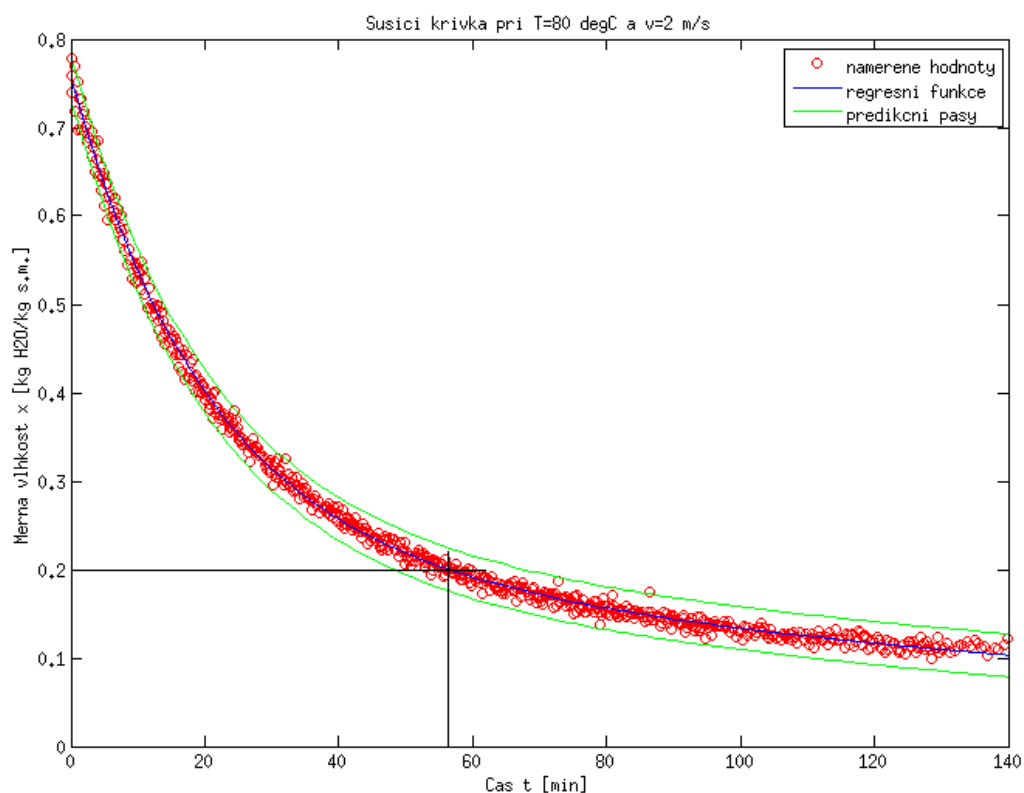
Tab. 8-4: Parametry nelineární regrese.

Parametr	Hodnota parametru	Dolní mez	Horní mez
A	0,278242	0,213918	0,342567
B	0,003633	0,001377	0,005889
C	0,460317	0,402154	0,518481
D	0,04614	0,037658	0,054622

Výsledná doba sušení za kterou hodnota měrné vlhkosti klesne pod hodnotu 0,2 kg H₂O/kg s.m. při teplotě sušícího vzduchu T = 60 °C a rychlosti proudění sušícího vzduchu w = 4 m/s je t_{0,2} = 97,8825 min.

Větší rozptyl výsledků měření je způsoben dynamickým účinkem proudu vzduchu na závěsné lóže v sušící komoře při vyšší rychlosti proudění sušícího vzduchu.

Vyhodnocení 3. měření:



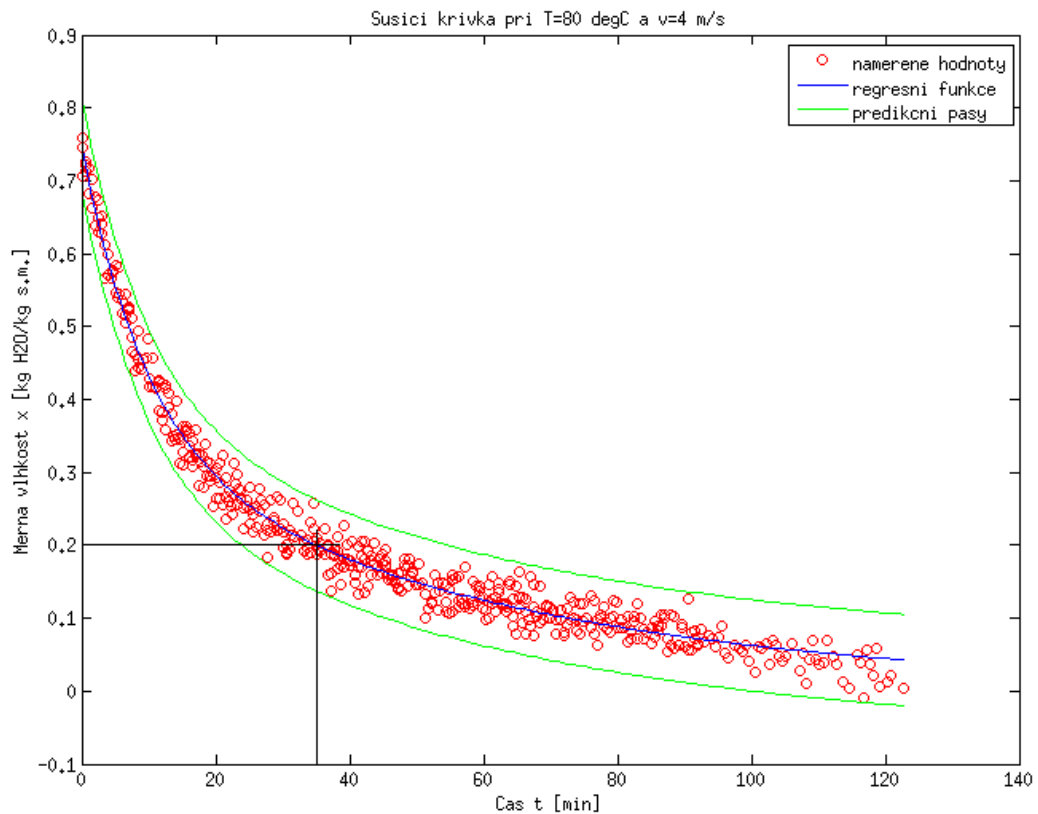
Obr. 8-8: Graf závislosti poklesu měrné vlhkosti sušeného materiálu na době sušení (sušící křivka) při teplotě sušícího vzduchu T = 80 °C a rychlosti proudění sušícího vzduchu w = 2 m/s.

Tab. 8-5: Parametry nelineární regrese.

Parametr	Hodnota parametru	Dolní mez	Horní mez
A	0,235895	0,225776	0,246014
B	0,005956	0,005547	0,006365
C	0,519335	0,510209	0,528462
D	0,049776	0,048459	0,051093

Výsledná doba sušení za kterou hodnota měrné vlhkosti klesne pod hodnotu 0,2 kg H₂O/kg s.m. při teplotě sušicího vzduchu T = 80 °C a rychlosti proudění sušicího vzduchu w = 2 m/s je t_{0,2} = 56,3747 min.

Vyhodnocení 3. měření:



Obr. 8-9: Graf závislosti poklesu měrné vlhkosti sušeného materiálu na době sušení (sušicí křivka) při teplotě sušicího vzduchu T = 80 °C a rychlosti proudění sušicího vzduchu w = 4 m/s.

Tab. 8-6: Parametry nelineární regrese.

Parametr	Hodnota parametru	Dolní mez	Horní mez
A	0,343183	0,318152	0,368214
B	0,016983	0,015793	0,018172
C	0,406356	0,383112	0,429601
D	0,104058	0,094323	0,113793

Výsledná doba sušení za kterou hodnota měrné vlhkosti klesne pod hodnotu 0,2 kg H₂O/kg s.m. při teplotě sušicího vzduchu $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a rychlosti proudění sušicího vzduchu $w = 4 \text{ m/s}$ je $t_{0,2} = 35,0109 \text{ min.}$

Zde se opět, stejně jako u 2. měření, projevil větší rozptyl výsledků měření, způsobený dynamickým účinkem proudu vzduchu na závěsné lóže v sušící komoře při vyšší rychlosti proudění sušicího vzduchu.

Naměřené hodnoty doby sušení z jednotlivých měření nyní použijeme pro návrh základních rozměrů provozní sušárny.

9 Návrh sušárny

9.1 Koncepce sušárny

Vzhledem k požadavku zadavatele na kontinuální provoz sušárny připadá v úvahu použití buď sušárny pásové, nebo vibrofluidní.

Experimentální stanovení doby sušení probíhalo na oběhové sušárně, která se svou koncepcí v podstatě shoduje se sušárnou pásovou s tím rozdílem, že sušený materiál je v experimentální oběhové sušárně uložen staticky a v sušárně pásové je materiál kontinuálně posouván od vstupu k výstupu rychlostí, která odpovídá potřebné době jeho zdržení. U obou typů sušáren je sušicí vzduch přiváděn nad vrstvu sušeného materiálu, případně může být u pásové sušárny přiváděn skrz pohyblivý pás kolmo ke směru posuvu materiálu.

Z hlediska geometrie sušící komory a sušicího lóže je experimentální oběhová sušárna, využitá ke stanovení sušících křivek, podobná jak sušárně pásové, tak i sušárně vibrofluidní. Proto budu při návrhu provozního zařízení vycházet z geometrické podobnosti a to zejména při stanovení potřebné plochy sušicího lóže.

Lze předpokládat, že použití vibrofluidní sušárny přinese značné zvýšení součinitele přestupu tepla a hmoty, neboť částice materiálu se ve vibrofluidním žlabu dostávají do vznosu a jsou tak ofukovány sušicím vzduchem po celém svém povrchu. Udržování částic ve vznosu a jejich vzájemná interakce, stejně jako jejich interakce se stěnami sušící komory, vedou k rozrušování shluků lepivých částic a je tak docíleno

intenzivnějšího přestupu tepla i hmoty než je tomu u sušáren s fixním ložem. Vyšší součinitelé přestupu tepla a hmoty s sebou přinesou zkrácení doby sušení.

9.2 Bilanční výpočty

Dle požadavků zadavatele je potřebné množství sušeného materiálu $50 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Toto množství vychází z energetických bilančních výpočtů zadavatele pro zimní provoz zařízení, tedy v režimu adsorpce. Dále je brán v potaz fakt, že pokud mají být jako zdroj tepelné energie použity solární kolektory, bude nutné proces sušení celkového množství materiálu uskutečnit během letních měsíců, kdy je intenzita slunečního záření nejvyšší.

S ohledem na podmínky stanovené při experimentálním zjišťování sušicích křivek budou bilanční výpočty provedeny pro čtyři různé varianty, lišící se teplotou vzduchu na vstupu do sušárny a rychlostí proudění. Vstupní parametry jednotlivých výpočetních variant shrnuje tabulka 9-1.

Tab. 9-1: Vstupní parametry výpočetních variant.

Varianta	Teplota vstupního vzduchu [°C]	Rychlost proudění vzduchu [m/s]
A	60	2
B	60	4
C	80	2
D	80	4

9.2.1 Bilance sušiny

Při bilancování sušiny se vychází z předpokladu, že množství sušiny se během procesu sušení nemění. Zmíněný předpoklad lze zapsat rovnicí

$$M_0 \cdot \xi_0 = M_1 \cdot \xi_1 \quad (9-1)$$

kde M_0 je množství sušeného materiálu v $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ vstupujícího do sušárny, M_1 je množství usušeného materiálu v $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ vystupujícího ze sušárny, ξ_0 a ξ_1 jsou hmotnostní podíly sušiny ve vstupním resp. výstupním množství materiálu.

Z výsledků měření počáteční vlhkosti materiálu v kapitole 8.2 vyplývá, že hmotnostní podíl sušiny v hydratovaném materiálu dodaném zadavatelem je $\xi_0 = 57 \%$.

Množství usušeného materiálu pak můžeme vyjádřit z rovnice (9-1) takto:

$$M_1 = M_0 \cdot \frac{\xi_0}{\xi_1} \quad (9-2)$$

po dosazení

$$M_1 = 50 \cdot \frac{0,57}{0,833} = 34,214 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (9-3)$$

9.2.2 Množství odsušené vlhkosti

$$W = M_0 - M_1 = 50 - 34,214 = 15,786 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (9-4)$$

9.2.3 Parametry sušícího vzduchu na vstupu do sušárny

Varianta A, B: $t_A = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

$$x_{A0} = 0,622 \cdot \frac{p_{H_2O}}{p_A - p_{H_2O}} = 0,622 \frac{1,0}{101,28 - 1,0} = 0,0062 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1} \quad (9-5)$$

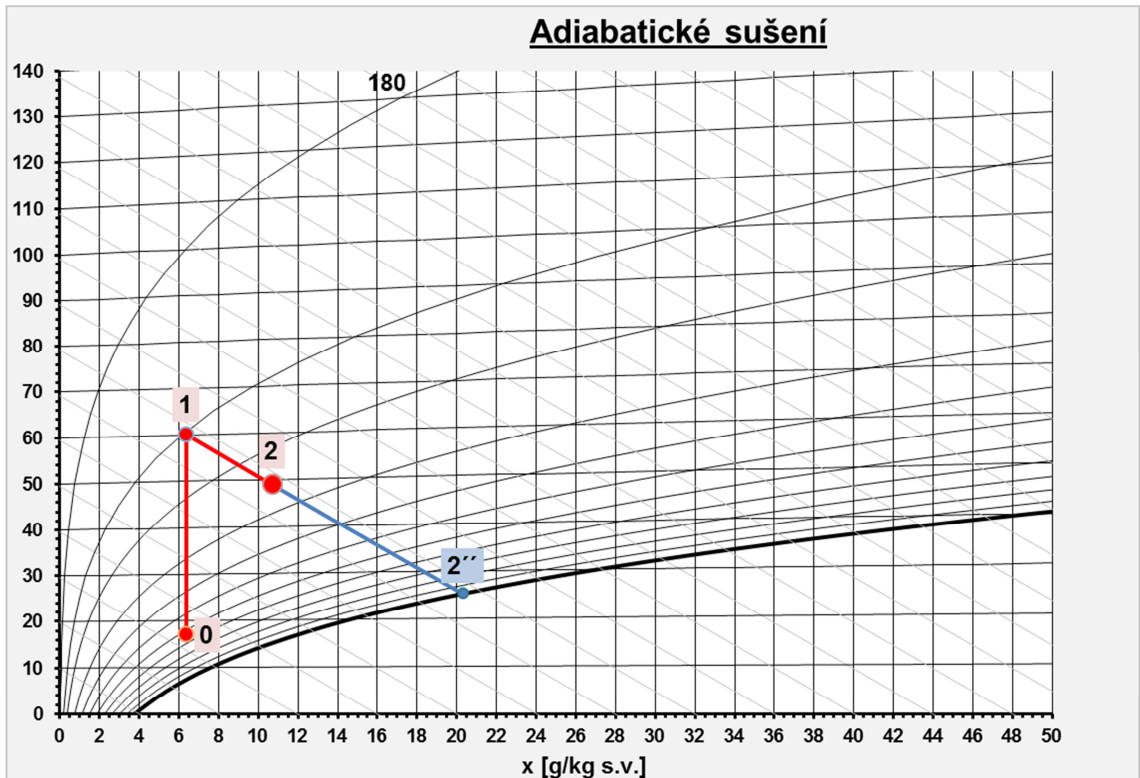
Varianta C, B: $t_A = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

$$x_{A0} = 0,0062 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1}$$

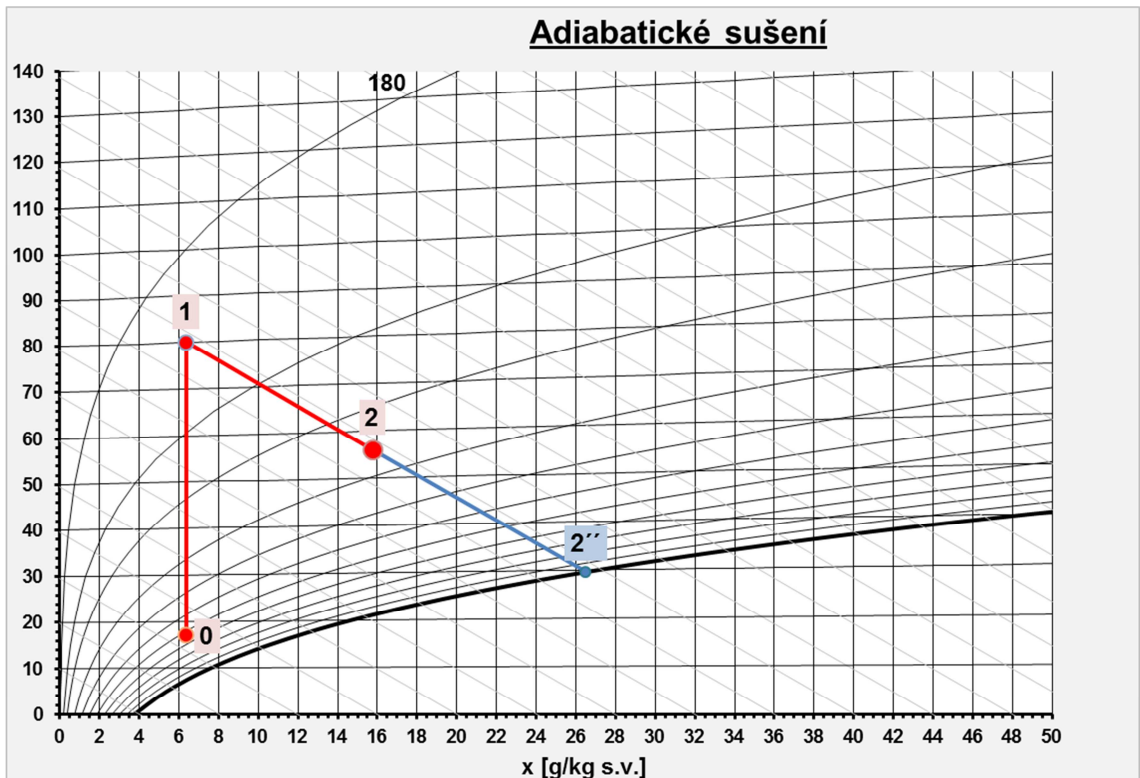
9.2.4 Parametry sušícího vzduchu na výstupu ze sušárny

Pro úplnou bilanci a stanovení potřebného množství sušícího vzduchu je nutné znát množství vlhkosti, které je sušící vzduch schopen „odejmout“ sušenému materiálu při průchodu sušicí komorou.

Z Mollierova diagramu jsem pro danou teplotu vzduchu na vstupu do sušárny odečetl příslušnou hodnotu měrné vlhkosti vzduchu (viz obr. 9-1 a 9-2). Pro orientační stanovení základních rozměrů sušárny budu v další bilanci počítat s případem, že sušící vzduch bude mít na výstupu ze sušárny relativní vlhkost 15 %.



Obr. 9-1 Stav sušícího vzduchu při vstupní teplotě $T = 60 \text{ °C}$ a průběh jeho adiabatického zvlhčování.



Obr. 9-2 Stav sušícího vzduchu při vstupní teplotě $T = 80 \text{ °C}$ a průběh jeho adiabatického zvlhčování.

Za těchto předpokladů vychází hodnoty měrné vlhkosti sušicího vzduchu na výstupu ze sušárny následovně:

Varianta A a B:

$$T_{A1} = 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x_{A1} = 0,011 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1}$$

Varianta C a D:

$$T_{A1} = 56 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x_{A1} = 0,016 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1}$$

9.2.5 Množství vzduchu potřebné pro sušení

V této pasáži se zaměříme na dva přístupy ke stanovení potřebného množství vzduchu pro sušení. V prvním přístupu budeme vycházet z výše uvedených bilančních výpočtů a v tom druhém využijeme ke stanovení potřebného průtoku vzduchu geometrickou podobnost sušicí komory experimentálního zařízení se sušicí komorou navrhovaného provozního zařízení.

Z bilančních výpočtů je možné vypočítat množství sušicího vzduchu takto:

Varianta A a B:

$$M = \frac{W}{x_{A1} - x_{A0}} = \frac{15,786}{0,011 - 0,0062} = 3289 \text{ kg} / \text{h} \quad (9-7)$$

Varianta C a D:

$$M = \frac{W}{x_{A1} - x_{A0}} = \frac{15,786}{0,016 - 0,0062} = 1611 \text{ kg} / \text{h} \quad (9-8)$$

Výsledky bilančních výpočtů shrnuje přehledně tabulka 9-2.

Tab. 9-2: Výpočet potřebného množství vzduchu pro sušení.

			Varianta A	Varianta B
			T=60 °C, w=2 m/s	T=60 °C, w=4 m/s
Potřebné množství odsušené vlhkosti	W	kg/h	15,786	15,786
Měrná vlhkost vzduchu na vstupu do sušárny	x_A0	kg/kg s.v.	0,0062	0,0062
Měrná vlhkost vzduchu na výstupu ze sušárny	x_A1	kg/kg s.v.	0,011	0,011
Teoretické množství vlhkosti odejmuté s.v.	delta x	kg/kg s.v.	0,0048	0,0048
Potřebné množství sušicího vzduchu	mst	kg/h	3289	3289
Potřebné obj. množství sušicího vzduchu	Vst	m ³ /h	3909	3909
Potřebné obj. množství sušicího vzduchu	Vst	m ³ /s	1,086	1,086
			Varianta C	Varianta D
			T=80 °C, w=2 m/s	T=80 °C, w=4 m/s
Potřebné množství odsušené vlhkosti	W	kg/h	15,786	15,786
Měrná vlhkost vzduchu na vstupu do sušárny	x_A0	kg/kg s.v.	0,0062	0,0062
Měrná vlhkost vzduchu na výstupu ze sušárny	x_A1	kg/kg s.v.	0,016	0,016
Teoretické množství vlhkosti odejmuté s.v.	delta x	kg/kg s.v.	0,0098	0,0098
Potřebné množství sušicího vzduchu	mst	kg/h	1611	1611
Potřebné obj. množství sušicího vzduchu	Vst	m ³ /h	1915	1915
Potřebné obj. množství sušicího vzduchu	Vst	m ³ /s	0,532	0,532

9.3 Orientační určení základních rozměrů sušárny

Následující tabulka 9-3 přehledně porovnává všechny čtyři výpočetní varianty pásové sušárny navržené pro stejné množství sušeného materiálu, ovšem pro odlišné teploty sušícího vzduchu a rychlosti proudění.

Tab. 9-3: Porovnání konstrukčních variant pásové sušárny.

		Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
		T=60 °C, w=2 m/s	T=60 °C, w=4 m/s	T=80 °C, w=2 m/s	T=80 °C, w=4 m/s
Experimentální sušárna					
Průměr mísky	m	0,1	0,1	0,1	0,1
Plocha vzorku	m ²	0,00785	0,00785	0,00785	0,00785
Výška vrstvy vzorku	m	0,003	0,003	0,003	0,003
Hmotnost vzorku	kg	0,02	0,02	0,02	0,02
Objem vzorku	m ³	2,35619E-05	2,35619E-05	2,35619E-05	2,35619E-05
Sypná hustota vzorku	kg/m ³	848,83	848,83	848,83	848,83
Šířka sušící komory	m	0,2	0,2	0,2	0,2
Výška sušící komory	m	0,2	0,2	0,2	0,2
Průřez sušící komory	m ²	0,04	0,04	0,04	0,04
Rychlost proudění v s.k.	m/s	2	4	2	4
Obj. průtok vzduchu v s.k.	m ³ /s	0,08	0,16	0,08	0,16
Obj. průtok vzduchu v s.k.	m ³ /h	288	576	288	576
Potřebná doba zdržení	min	129,45	97,88	56,37	35,01
Potřebná doba zdržení	s	7767	5872,8	3382,2	2100,6
Návrh základních rozměrů provozní pásové sušárny					
Množství sušeného materiálu	kg/h	50	50	50	50
Množství sušeného materiálu	kg/s	0,014	0,014	0,014	0,014
Objem vrstvy 3 mm na 1 m ²	m ³	0,003	0,003	0,003	0,003
Množství na 1 m ² při h = 3 mm	kg/m ²	2,546	2,546	2,546	2,546
Plocha potřebná každou sek.	m ² /s	0,00545	0,00545	0,00545	0,00545
Šířka pásu	m	1,5	1,5	1,5	1,5
Rychlost posuvu pásu	m/s	0,004	0,004	0,004	0,004
Celková délka pásu	m	28,242	21,354	12,298	7,638
Délka patra sušárny	m	3	3	2	2
Počet pater sušárny	-	9	7	6	4
Výška patra	m	0,3	0,3	0,3	0,3
Celková výška sušárny	m	2,824	2,135	1,845	1,146

9.4 Výkon ohříváče vzduchu

Známe-li potřebné množství sušícího vzduchu, můžeme dále vypočítat potřebný výkon ohříváče vzduchu. Ve výpočtu zanedbáme tepelné sušící komory i propojovacího potrubí.

Potřebný výkon ohřivače vypočteme dle následujícího vztahu:

$$\dot{Q}_{OH} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_{p,vz} \cdot (T_{sv} - T_{OK}) \quad [W] \quad (9-9)$$

kde \dot{V} je potřebný průtok sušicího vzduchu v [m³/s], ρ je hustota vzduchu [kg/m³], c_p je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku v [J/(kg.K)], T_{sv} je teplota sušicího vzduchu ve [°C] a T_{ok} je teplota okolního vzduchu nasávaného do sušárny ve [°C].

Tab. 9-4 Výsledky výpočtu tepelného výkonu ohřivače a potřebného množství energie.

			Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
Potřebné obj. množství sušicího vzduchu	Vst	m ³ /h	3909	3909	1915	1915
Potřebné obj. množství sušicího vzduchu	Vst	m ³ /s	1,086	1,086	0,532	0,532
Měrná tepelná kapacita vzduchu	cp	J/(kg.	1007	1007	1009	1009
Hustota vzduchu při teplotě T_ok	rho_Tok	kg/m	1,1887	1,1887	1,1887	1,1887
Teplota sušicího vzduchu	T_sv	°C	60	60	80	80
Teplota okolního vzduchu	T_ok	°C	20	20	20	20
Tepelný výkon ohřivače vzduchu	Q_oh	W	51 995	51 995	38 276	38 276
Doba sušení za den	t	h	6	6	6	6
Množství potř. energie za den	Q	Wh	311971	311971	229658	229658
Množství potř. energie za den	Q	kWh	312	312	230	230

10 Technicko-ekonomické zhodnocení

10.1 Analýza využitelnosti solárních termických kolektorů jako zdroje tepla pro ohřev sušicího vzduchu

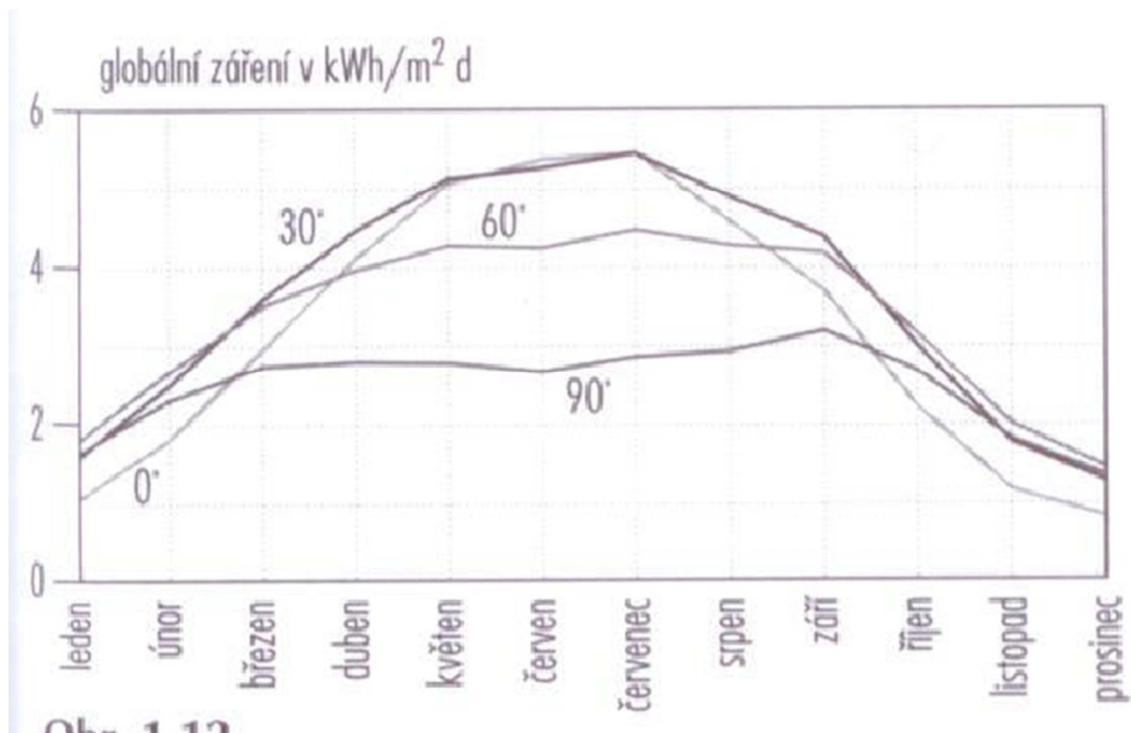
Z požadavků zadavatele vyplývá již zmíněné množství sušeného materiálu 50 kg/h. Celkové množství vlhkého materiálu, které je potřeba vysušit za jednu sezónu je pak 21225 kg. Toto množství je potřeba usušit v době, kdy solární kolektory budou poskytovat dostatečný výkon

V kapitole 7 jsme se krátce seznámili se dvěma typy solárních termických kolektorů, které připadají v úvahu pro aplikaci na ohřev sušicího vzduchu v sušárně. Nyní si na základě změřených dat a technických specifikací výrobců solárních kolektorů ověříme, zda je použití zvolených solárních kolektorů pro danou aplikaci reálné.

10.1.1 Využitelnost vakuového trubicového kolektoru

Začněme kolektorem vakuovým trubicovým. Potřebnou plochu absorberu trubicového kolektoru stanovíme za předpokladu, že v letních měsících bude průměrná výstupní teplota teplotnosné kapaliny 90 °C.

Z grafu na obr. 10-1 odečteme průměrnou hodnotu slunečního záření dopadající na jednotkovou plochu absorberu.



Obr. 10-1 Roční průběh globálního záření na jižně orientované skloněné plochy (hodnoty ze stanice Weihenstephan u Mnichova). [18]

K přenosu tepla do sušícího vzduchu bude nutné instalovat mezi kapalinovou a vzduchovou smyčku tepelný výměník, který značně sníží celkovou účinnost přenosu tepla.

Termická účinnost výměníků vzduch – voda se pohybuje mezi 45 a 65 % [15]. Pro účely výpočtu potřebného výkonu solárních trubcových kolektorů budeme uvažovat účinnost výměníku 50 %.

Tepelné ztráty propojovacího potrubí pro účely výpočtu zanedbáme.

Z průměrné hodnoty slunečního záření dopadajícího na jednotku plochy absorbéru a hodnoty účinnosti solárního kolektoru pro dané podmínky dále vypočítáme průměrné hodnoty energie získané ze solárních trubcových kolektorů za jednotku času. Výsledky tohoto výpočtu shrnuje tab. 10-1.

Tab. 10-1: Průměrné hodnoty energie získané ze solárních kolektorů.

	počet dní v měsíci	q _T , den	q _T , měs
měsíc	-	kWh/m ²	kWh/m ²
květen	31	2,918	90,45175
červen	30	2,953	88,60189
červenec	31	2,965	91,90722
srpen	31	2,953	91,53006
			q_T, sez
			362,4909
			kWh/m ²

Cena trubicového solárního kolektoru Regulus KTU 15 je 16.900 Kč/ks bez DPH.

Tab. 10-2: Výpočet potřebného počtu solárních trubicových kolektorů.

			Varianta A T=60 °C, w=2 m/s	Varianta B T=60 °C, w=4 m/s	Varianta C T=80 °C, w=2 m/s	Varianta D T=80 °C, w=4 m/s
Potřebný výkon ohřívače	Q _{st}	W	51 995	51 995	38 276	38 276
Účinnost výměníku voda - vzduch	eta _T	-	0,50	0,50	0,50	0,50
Potřebný výkon kolektorů	Q _{st} , k	W	103 990	103 990	76 553	76 553
Doba sušení za den	t	h	6	6	6	6
Množství potř. energie z kolektoru za den	Q	Wh	623941	623941	459316	459316
Množství potř. energie za den	Q	kWh	624	624	459	459
Počet dní provozu sušárny	n _s	-	70	70	70	70
Množství potřebné energie z kolektoru za sezonu	Q_d	kWh	43675,88	43675,88	32152,13	32152,13
Absorpční plocha 1 ks kolektoru	S _{K1}	m ²	1,41	1,41	1,41	1,41
Celková potřebná absorpční plocha trub. kolektorů	S _{KT}	m ²	107,05	107,05	88,70	88,70
Celkový potřebný počet kolektorů KTU15	n_{KT}	ks	76	76	63	63
Cena 1 ks kolektoru bez DPH	c _k	Kč/ks	16 900	16 900	16 900	16 900
Celková pořizovací cena instalovaných kolektorů	c _{kc}	Kč	1 283 129	1 283 129	1 063 115	1 063 115

10.1.2 Využitelnost vzduchového trubicového kolektoru

Orientační kalkulace byla provedena pro vzduchový solární kolektor firmy Grammer Solar JumboSolar GLK. Cena vzduchového solárního kolektoru se pohybuje kolem 15.000 Kč/ks bez DPH.

Tab. 10-3: Výpočet potřebného počtu solárních vzduchových kolektorů.

			Varianta A T=60 °C, w=2 m/s	Varianta B T=60 °C, w=4 m/s	Varianta C T=80 °C, w=2 m/s	Varianta D T=80 °C, w=4 m/s
Potřebný výkon ohřívače	Q _{st}	W	51 995	51 995	38 276	38 276
Absorpční plocha 1 ks vzduchového kolektoru	S _{K2}	m ²	2,51	2,51	2,51	2,51
Množství potř. energie za den	Q	kWh	311,97	311,97	229,66	229,66
Množství potřebné energie z kolektoru za sezonu	Q_d	kWh	21837,94	21837,94	16076,07	16076,07
Celková potřebná absorpční plocha vzd. kolektorů	S _{KV}	m ²	186,44	186,44	137,25	137,25
Potřebný počet vzduchových kolektorů	n_{KV}	ks	74	74	55	55
Cena 1 ks kolektoru bez DPH	c _k	Kč/ks	15 000	15 000	15 000	15 000
Celková pořizovací cena instalovaných kolektorů	c _{kc}	Kč	1 114 181	1 114 181	820 207	820 207

11 Závěr

Na základě poznatků z literární rešerše konvenčních systémů pro akumulaci tepla a zařízení pro sušení zrnitých materiálů byla navržena vhodná koncepce sušárny dle požadavků zadavatele. Vzhledem k dostupnosti experimentální oběhové sušárny byla hlouběji analyzována koncepce pásové sušárny, jejíž geometrie je experimentálnímu zařízení podobná stejně jako smysl proudění sušicího vzduchu.

Z experimentů provedených na laboratorní oběhové sušárně byly získány sušicí křivky pro kompozit chloridu vápenatého a silikagelu pro teploty sušicího vzduchu 60 a 80 °C a rychlosti proudění 2 a 4 m/s. Ze sušicích křivek byly pro požadovanou výstupní měrnou vlhkost materiálu $x = 0,2 \text{ kg H}_2\text{O/kg s.m.}$ dále odečteny hodnoty potřebné doby sušení a to pro čtyři varianty vstupních parametrů. Výsledky viz kapitola 8.3.4.

Na základě experimentálně stanovených hodnot doby sušení byl pak proveden návrh základních rozměrů pásové sušárny pro sušení zadaného materiálu v množství 50 kg/h. Potřebné délky pásu pro jednotlivé varianty vstupních parametrů a zvolenou šířku pásu 1,5 m shrnuje tabulka 11-1. Vzhledem ke značné výsledné délce pásu by bylo vhodné v rámci úspory zástavbového prostoru zvolit koncepci pásu rozděleného do několika pater nad sebou. Rozměry při takovém uspořádání jsou pak navrženy v dalších řádcích tabulky.

Tab. 11-1: Základní rozměry pásové sušárny.

		Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
		T=60 °C, w=2 m/s	T=60 °C, w=4 m/s	T=80 °C, w=2 m/s	T=80 °C, w=4 m/s
Šířka pásu	m	1,5	1,5	1,5	1,5
Celková délka pásu	m	28,242	21,354	12,298	7,638
Délka patra sušárny	m	3	3	2	2
Počet pater sušárny	-	9	7	6	4
Výška patra	m	0,3	0,3	0,3	0,3
Celková výška sušárny	m	2,824	2,135	1,845	1,146

Dalším z úkolů bylo stanovení potřebného množství vzduchu pro sušení. To bylo provedeno na základě hmotové bilance sušárny a výsledný objemový průtok byl použit pro výpočet potřebného výkonu ohříváče pro ohřev sušicího vzduchu pro dané podmínky. Pro teplotu sušicího vzduchu na vstupu do sušárny $T = 60 \text{ °C}$ byl stanoven potřebný výkon ohříváče $\dot{Q}_{OH} = 52 \text{ kW}$ a pro teplotu sušicího vzduchu na vstupu do sušárny $T = 80 \text{ °C}$ byl potřebný výkon ohříváče stanoven na $\dot{Q}_{OH} = 38,3 \text{ kW}$.

Na závěr bylo provedeno zhodnocení využitelnosti solárních termických kolektorů jako zdroje tepla pro ohřev sušícího vzduchu. Vyhodnocení je přehledně uvedeno v tab. 11-2.

Tab. 11-2: *Potřebný počet kolektorů pro ohřev sušícího vzduchu a cenové porovnání.*

			Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
			T=60 °C, w=2 m/s	T=60 °C, w=4 m/s	T=80 °C, w=2 m/s	T=80 °C, w=4 m/s
Celkový potřebný počet kolektorů KTU15	n_KT	ks	76	76	63	63
Cena 1 ks kolektoru bez DPH	c_k	Kč/ks	16 900	16 900	16 900	16 900
Celková pořizovací cena instalovaných kolektorů	c_kc	Kč	1 283 128,65	1 283 128,65	1 063 114,92	1 063 114,92
DPH		%	15	15	15	15
Celková pořizovací cena instalovaných kolektorů vč. DPH		Kč	1 475 597,94	1 475 597,94	1 222 582,16	1 222 582,16
Teoretická doba návratnosti		roků	60	60	50	50
Potřebný počet vzduchových kolektorů	n_KV	ks	74	74	55	55
Cena 1 ks kolektoru bez DPH	c_k	Kč/ks	15 000	15 000	15 000	15 000
Celková pořizovací cena instalovaných kolektorů	c_kc	Kč	1 114 180,53	1 114 180,53	820 207,40	820 207,40
DPH		%	15	15	15	15
Celková pořizovací cena instalovaných kolektorů vč. DPH		Kč	1 281 307,61	1 281 307,61	943 238,51	943 238,51
Teoretická doba návratnosti		roků	52	52	38	38
Celkové roční množství akumulované energie	Q	kWh	10 000			
Cena elektrické energie	c_el	Kč/kWh	2,30			
Účinnost elektrokotle	eta	-	0,95			
Pořizovací cena elektrokotle		Kč	21 500,00			
Celkové roční náklady na vytápění elektrokotlem		Kč	24 210,53			

Z výsledků je patrné, že investice pouze do kolektorové plochy bude velmi vysoká a pro účely dané aplikace (sorpční akumulace tepla pro vytápění rodinného domu) bude nutné v budoucnu navrhnout efektivnější způsob sušení akumulárního materiálu. Doba návratnosti byla počítána hypoteticky bez uvažování pořizovací ceny samotné sušárny. Výpočet tedy zohledňuje pouze investici do kolektorového pole oproti investici do elektrokotle a celkovou roční úsporu nákladů na elektrickou energii pro vytápění. Ve výpočtu nejsou zohledněny náklady na přípravu teplé vody. Výsledné doby návratnosti daleko přesahují životnost solárních kolektorů a je zřejmé, že se za uvedených podmínek investice do takového systému nevyplácí.

Je třeba podotknout, že se stále jedná o počáteční fázi výzkumu akumulárních materiálů na bázi adsorpce a lze předpokládat, že v budoucnu se vývoj v této oblasti posune významně dále a budou vyvinuty materiály s násobně vyššími hodnotami energetické hustoty. Takové materiály by přinesly jednak značné zmenšení rozměrů zařízení pro jejich sušení a zároveň nižší spotřebu tepla pro sušení.

V dalším výzkumu bych doporučoval zaměřit se na rozšíření analýzy o potenciální využití vibrofluidní sušárny. Z poznatků získaných z rešerše je pravděpodobné, že by aplikace takového druhu zařízení přinesla značné zkrácení doby

sušení a dále také citelnou úsporu zástavbového prostoru, což zejména v dané aplikaci (vytápění rodinného domu) bude jedním z hlavních kritérií pro konečný výběr provozního zařízení.

Pro přesný návrh provozního zařízení doporučuji provést další podrobnější experimenty, kdy bude mimo jiné ověřen i vliv vlhkostí vstupního a výstupního vzduchu na dobu sušení.

12 Seznam použité literatury

- [1] International Energy Agency. World energy statistics. 2011.
- [2] Ražnjevic, K. *Termodynamické tabulky*. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, červen 1984.
- [3] Hadorn J-C. Advanced storage concepts for active solar energy—IEA SHC Task 32 2003-2007. In: Proceeding of Eurosun, Lisbon, Portugal, 2008.
- [4] Michel, B., Mazet, N., Neveu, P. Experimental investigation of an innovative thermochemical proces operating with a hydrate salt and moist air for thermal storage of solar energy: Global performance. *Applied Energy*. Elsevier. [online]. 23. března 2014, [cit. 21. října 2014].
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191400436X>
- [5] Mauran, S., Lahmidi, H., Goetz, V. Solar heating and cooling by a thermochemical process. First experiments of a prototype storing 60 kWh by a solid/gas reaction. *Solar Energy* 2008;82:623-36.
- [6] N'Tsoukpoe, K., Liu, H., Le Pierres, N., Luo, L. A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable energy Reviews*. Elsevier. [online]. 29. května 2009, [cit. 11. listopadu 2014].
- [7] Choc, M., Kolář, S., Korger, M., Viktorin, Z. *Teorie a stavba sušáren s konvektivním přestupem tepla*. Praha: Ediční středisko SVÚSS, Praha 9 – Běchovice, 1982.
- [8] Hlavačka, V., Valchář, J., Viktorin, Z. *Tepelně technické pochody v systémech plyn-tuhé částice*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [9] Míka, V. *Základy chemického inženýrství*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [10] SKOČILAS, Jan. *Oběhová experimentální sušárna. Návod ke cvičení (PRO I)*. ČVUT Praha, 2013.
- [11] Solární kolektory – přednáška. [online].
Dostupné z: http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/studijni_materialy/aze/p2-solarni_kolektory.pdf
- [12] Solární kolektory trubicové – prospekt firmy Regulus spol. s r.o. [online].
Dostupné z: <file:///C:/Users/betak/Downloads/Trubicove-kolektory-vakuove-A3-CZ.pdf>
- [13] Solar Trockung – Solare Prozesswaerme. [online].
Dostupné z: <http://www.grammer-solar.com/cms/de/produkte-und-leistungen/spezielle-anwendungen/solartrocknung.html>

- [14] Jumbosolar – Technische Daten. Grammer Solar. [online].
Dostupné z: http://www.download.grammer-solar.com/gdownloads/Deutsch/II_SolarLuft/06-Datenblaetter/TechnischeDaten_JumboSolar_0150101002-DE.pdf
- [15] Zpěrné získávání tepla – Wikipedia. [online].
Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C4%9Bn%C3%A9_z%C3%ADsk%C3%A1v%C3%A1n%C3%AD_tepla#nep.C5.99.C3.ADm.C3.A9_.28kapalina_-_vzduch.29
- [16] Vaněk, D. Energetická bilance vybrané stavby a návrh na její optimalizaci – Diplomová práce. ČVUT Praha, 2005.
- [17] Fialková, I. Vybrané state z potravinářské techniky. Praha: Edinčí středisko ČVUT, Praha 6, 1990.
- [18] Ladener, H., Späte, F. Solární zařízení. Grada Publishong, 2003.
- [19] Hořejší, J. Tepelná čerpadla pro každého I. [online].
Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/953-tepelna-cerpadla-pro-kazdeho-i>