



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

STUDIE VLIVU DESIKAČNÍCH LÁTEK NA ADSORPCI VLHKOSTI

RESEARCH OF THE EFFECT OF DESICANTS ON MOISTURE ADSORPTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mojmír Němec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Patrik Elbl

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Mojmír Němec**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Patrik Elbl**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studie vlivu desikačních látek na adsorpci vlhkosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vlhkost je jednou z nejdůležitějších vlastností tuhých paliv, která společně s hořlavinou a popelovinou tvoří hrubý rozbor. Pro uchovávání vzorků během stanovování hrubého rozboru se výhradně používá exsikátor, který je naplněn desikantem pro pohlcování vlhkosti. Práce bude zaměřena na popsání metod měření vlhkosti tuhých paliv, shrnutí různých druhů desikačních látek a na experimentální stanovení rychlosti pohlcování vlhkosti desikačních látek.

Cíle bakalářské práce:

- Popis různých metod stanovování vlhkosti tuhých paliv.
- Popis exsikátoru a desikačních látek.
- Studie vlivu desikačních látek na rychlost pohlcování vlhkosti v laboratorním exsikátoru.

Seznam doporučené literatury:

SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. Energetické parametry biomasy: projekt. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2007, 91 s. ISBN 978-80-214-3493-6.

PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-86534-06-5.

ŠAFARÍK, Pavel a Magda VESTFÁLOVÁ. Termodynamika vlhkého vzduchu. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016, 208 stran. ISBN 978-80-01-06020-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Desikační látky jsou speciální materiály, které mají schopnost efektivně pohlcovat vlhkost z okolního prostředí. Desikační látky jako silikagel nebo molekulární síto se často využívají v laboratorních aplikacích, například pro stanovení vlastností tuhých paliv. Úvod rešeršní části je věnován popisu těchto vlastností. Práce následně popisuje metody sloužící k stanovení vlhkosti v tuhých palivech. Hlavní část práce je věnována exsikátorům spolu s desikačními látkami, které tvoří stěžejní část při procesu určení vlhkosti v tuhých palivech. Experimentální část se zabývá zkoumáním vlivu různých desikačních látek na rychlost pohlcování vzdušné vlhkosti v exsikátoru za laboratorních podmínek. Úbytek vlhkosti v exsikátoru je měřen pomocí zařízení SHT4x Smart Gadget, které je spolu s desikantem umístěno do exsikátoru. Výstupem experimentálního měření jsou rychlostní křivky pohlcování vlhkosti různých desikačních činidel pro navážky desikantů o hmotnosti 50 g, 100 g, 150 g, 200 g a 250 g. V závěru práce jsou naměřené křivky jednotlivých desikačních látek mezi sebou porovnány z hlediska účinnosti.

Klíčová slova

Exsikátor, desikační látka, vlhkost, adsorpce, silikagel

ABSTRACT

Desiccants are special materials that can effectively adsorb moisture from the surrounding air or space. Desiccants such as silica gel or molecular sieve are often used in laboratory applications, for example to determine the properties of solid fuels. The introduction of the research section is devoted to the description of these properties. The thesis then describes the methods used to accurately determine the moisture in solid fuels. The main part of the thesis is devoted to desiccators together with desiccants, which form a significant part in the process of determining moisture in solid fuels. The experimental part deals with the investigation of the effect of different desiccants on the rate of air moisture depletion in the desiccator under laboratory conditions. The moisture loss in the desiccator is measured using the SHT4x Smart Gadget, which is placed in the desiccator together with the desiccant. The output of the experimental measurements are the moisture uptake rate curves of different desiccants for desiccant weights of 50 g, 100 g, 150 g, 200 g and 250 g. At the end of the thesis, the measured curves of the different desiccants are compared with each other in terms of efficiency.

Keywords

Desiccator, desiccant, moisture, adsorption, silica gel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NĚMEC, Mojmír. *Studie vlivu desikačních látek na adsorpci vlhkosti* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149222>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Patrik Elbl.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Studie vlivu desikačních látek na adsorpci vlhkosti**“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, které tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Patriku Elblovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Chtěl bych také poděkovat rodině a blízkým za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Paliva	12
1.1 Paliva a jejich rozdělení	12
1.1.1 Tuhá fosilní paliva	12
1.1.2 Tuhá biomasa	12
1.2 Hrubý rozbor paliva	13
1.2.1 Vlhkost	13
1.2.2 Popelovina	14
1.2.3 Hořlavina	14
1.2.4 Spalné teplo	15
1.2.5 Výhřevnost	15
1.3 Metody stanovení vlhkosti tuhých paliv	16
1.3.1 Gravimetrická metoda	17
1.3.2 Gravimetrická metoda pro tuhá biopaliva	17
1.3.3 Destilační metoda	19
1.3.4 Odporová metoda	20
1.3.5 Kapacitní metoda	20
1.3.6 Karl Fisherova titrační metoda	21
1.3.7 Spektrometrická metoda NIR	22
2 Exsikátor a desikační látky	23
2.1 Rozdělení exsikátorů podle materiálu	23
2.1.1 Skleněný exsikátor	23
2.1.2 Polykarbonátové a polypropylenové exsikátory	23
2.1.3 Akrylátová skříň	24
2.2 Rozdělení exsikátorů podle metody vysoušení	24
2.2.1 Standardní exsikátor	24
2.2.2 Standardní exsikátor pro čištění vzduchu	24
2.2.3 Automatizovaný exsikátor pro čištění vzduchu	25
2.2.4 Vakuový exsikátor	26
2.3 Desikační látky	26
2.3.1 Silikagel	27
2.3.2 Molekulární síto	28
2.3.3 Síran vápenatý	28
2.3.4 Aktivovaný oxid hlinitý	28
2.3.5 Bentonitový jíl	28
2.3.6 Oxid vápenatý	29
2.3.7 Bromid lithný	29
2.3.8 Kyselina sírová	29
2.3.9 Hydroxid sodný	29
2.4 Srovnání adsorpcí jednotlivých desikačních látek	30
3 Metody a měření	32
3.1 Popis využitých zařízení	32

3.1.1	Exsikátor s plastovým hmatníkem	32
3.1.2	Laboratorní váha KERN KB 10000-1N.....	32
3.1.3	Laboratorní sušárna Venticell 111 – ECO LINE	32
3.1.4	Pec laboratorní komorová LAC L 15/12 s regulátorem HT250	32
3.1.5	SHT4x Smart Gadget	33
3.2	Stanovení objemu exsikátoru	36
3.3	Stanovení hmotnosti vodní páry uvnitř uzavřeného exsikátoru	36
3.4	Metodika stanovení rychlosti adsorpce jednotlivých desikantů v exsikátoru	37
3.5	Určení množství vytlačeného vzduchu.....	38
3.5.1	Výpočet vytlačeného množství vzduchu síranem vápenatým a oxidem vápenatým	39
3.6	Stanovení rychlosti adsorpce silikagelu	40
3.7	Stanovení rychlosti adsorpce molekulárního síta	42
3.8	Stanovení rychlosti adsorpce bentonitového jílu.....	43
3.9	Rychlosti adsorpce síranu vápenatého	44
3.10	Stanovení rychlosti adsorpce oxidu vápenatého	46
3.11	Srovnání adsorpčních rychlostí jednotlivých desikantů pro navážku o hmotnosti 250 g.....	47
3.12	Pořízení snímků struktury použitých desikantů mikroskopem VHX-7000 ...	49
ZÁVĚR.....		50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ a ZKRATEK		58

ÚVOD

Látky schopné pohlcovat vlhkost jsou v různých formách lidstvem využívány už po staletí. Už starověké civilizace využívaly například sůl k pohlcení vlhkosti a vhodnému zakonzervování potravin. S narůstajícími požadavky na tato vysoušedla byly vytvořeny desikační látky, které oproti čistě přírodním materiálům jsou schopny pohlcovat okolní vlhkost. Jednou z nejpoužívanějších desikačních látek je silikagel, který byl patentován v roce 1919 a využit během první světové války v plynových maskách při adsorpci plynů a par. Adsorpce je jev, při kterém dochází k zachycování plynů nebo kapalin na povrchu pevné látky. Později byly také vytvořeny speciální nádoby, které sloužily k uchování materiálů citlivých na vlhkost spolu s desikačními látkami. Ve 20. století se používání desikačních látek spolu s exsikatory stalo běžnou součástí v mnoha vědeckých a technických odvětvích, mezi které se řadí např. farmaceutický, elektronický, dopravní, vojenský a energetický průmysl. V dnešní době existují špičkové společnosti, které neustále vyvíjejí účinnější desikační látky pro udržení materiálů citlivých na vlhkost v suchém prostředí.

Tuhá paliva jsou nadále významným a spolehlivým zdrojem energie napříč mnoha průmyslovými odvětvími. Při využitích tuhých paliv je potřeba znát jejich složení, a to včetně jejich fyzikálních a chemických vlastností. Hrubý rozbor umožňuje získat přehled o energetickém využití paliva.

V první části je popsán stručný přehled o rozdělení tuhých paliv, včetně hrubého rozboru. Po rozdělení metod, kterými se stanovuje vlhkost tuhých paliv, je zde uveden podrobnější popis vybraných metod podle aktuálně platných státních norem (ČSN). Jak bylo v úvodu nastíněno, jednou z hlavních částí této práce je ucelený přehled používaných exsikatorů spolu s desikačními látkami. Popisováno je zde rozdělení exsikatorů podle materiálu, metody vysoušení a také jejich vhodné využití v praxi. V dnešní době existuje řada různých desikačních látek, které se liší svými vlastnostmi a využitím.

Hlavním cílem této bakalářské práce je stanovit experimentálně rychlost pohlcování vlhkosti různých desikačních látek, a to u silikagelu, molekulárního síta, bentonitového jílu, síranu vápenatého a oxidu vápenatého v laboratorním exsikatoru. Dále u každé desikační látky bude pozorována změna v rychlosti pohlcování při nárůstu hmotnosti navážky. Každý testovaný desikant je specifický svou regenerační teplotou. Při regeneraci dochází k obnovení schopnosti pohlcovat vzdušnou vlhkost, jelikož dojde k odpaření pohlcené vodní páry v pórech desikantu. Regenerace desikačních látek je klíčová pro stanovení stejné počáteční pozice pro všechny zkoumané látky. K měření relativní vlhkosti ovzduší bylo využito zařízení SHT4x Smart Gadget. Tento experiment probíhal při standardních laboratorních podmínkách s minimálním výkyvem teplot. V závěru práce jsou shrnuta a popsána naměřená data získaná během experimentu. Zajímavým výstupem je zjištění, jaká je minimální doba potřebná pro vysoušení vnitřního objemu exsikatoru pro bezpečné uložení pozorovaných vzorků.

1 Paliva

1.1 Paliva a jejich rozdělení

Palivo je látka, která má v sobě vázanou chemickou energii. Vázanou energii v palivu je možné v důsledku chemické reakce mezi palivem a kyslíkem uvolnit. Hořením paliva se uvolňuje chemická energie v podobě tepla a světla. Paliva je možné rozdělit podle jejich původu [1].

Rozdělení paliv podle původu:

- Fosilní paliva – černé uhlí, hnědé uhlí, ropa, zemní plyn.
- Obnovitelné – biomasa, štěpka, bioplyn.
- Odpadní – vzniklá působením lidské činnosti.

Rozdělení fosilních paliv podle skupenství:

- Tuhá – antracit, lignit, rašelina.
- Kapalná – ropa, benzín, petrolej.
- Plynná – zemní plyn, vodní plyn, svítiplyn [2]; [3].

1.1.1 Tuhá fosilní paliva

Fosilní paliva vznikala z odumřelých těl rostlin a živočichů po miliony až desítky milionů let. Tato biomasa prošla složitým fyzikálně chemickým procesem podpořeným vysokou teplotou a tlakem. Na základě geologického stáří od sebe rozlišujeme hnědé a černé uhlí. Mladší hnědé uhlí obsahuje více vodíku, kyslíku a méně uhlíku, jelikož je méně prouhelněné než uhlí černé. Meziprodukt při vzniku uhlí se nazývá rašelina, která už tak energeticky významná není a využívá se více pro zlepšení kvality půdy než jako palivo [1].

Uhlí se podle množství uhlíku sestupně rozděluje na antracit, bituminózní uhlí, subbituminózní uhlí a lignit. Antracit představuje nejkvalitnější uhlí s nejvyšší výhřevností, obsah uhlíku se pohybuje mezi 86 % až 97 %, zatímco lignit s podílem mezi 25 % až 35 % uhlíku se řadí mezi uhlí s nejnižší výhřevností. Ložiska s lignitem nebyla vystavena vysokým teplotám a tlaku po dostatečně dlouhou dobu, následkem čehož vznikla drobná struktura s vysokým obsahem vlhkosti. Antracit se používá nejvíce v kovoprůmyslu, zatímco lignit spíše k výrobě elektřiny nebo se přeměňuje na syntetický zemní plyn [4].

1.1.2 Tuhá biomasa

Biomasa je substance biologického původu, která vzniká přímo nebo nepřímo působením sluneční energie při fotosyntéze. Nejdůležitějším parametrem, který se u biomasy zjišťuje, je vlhkost. Pokud je obsah sušiny menší než 50 % jedná se o mokrou biomasu, zvýší-li se obsah sušiny nad 50 % bude se jednat o biomasu suchou. Pro přeměnu biomasy na využitelnou energii existují základní technologie. Termochemické přeměny (spalování, zplyňování a pyrolýzu¹) a biochemické přeměny (alkoholové a metanové kvašení). Další možností je přeměnit biomasu mechanicky (štipání, drcení, lisování, peletování apod.) a chemicky (esterifikace surových

¹ Zahřívání za omezeného přístupu vzduchu [1].

olejů). Poslední možností způsobu využití biomasy k energetickým účelům je získávání odpadního tepla při zpracování biomasy (kompostování, aerobní čištění odpadních vod, anaerobní fermentace pevných organických odpadů apod.) [5].

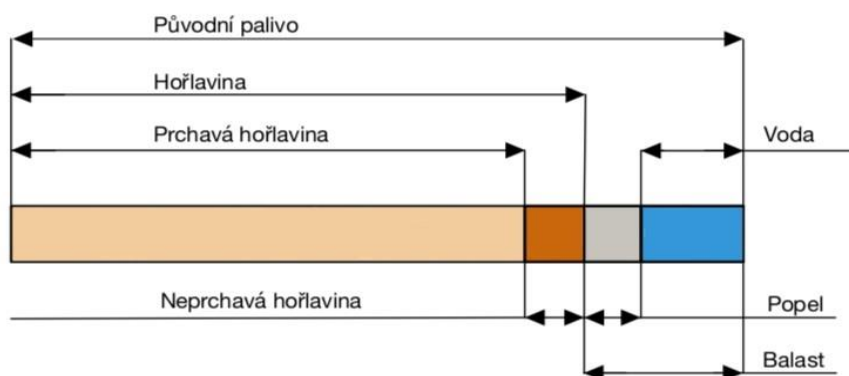
Dřevo se historicky řadí mezi nejstarší palivo, které člověk začal využívat. Pro produkci biopaliva se vytvářejí tzv. energetické lesy a plantáže, kde rostou hlavně rychle rostoucí stromy, např. topoly, jasany a vrby. Využití nalézají i paliva ze slámy obilovin a olejnin spolu s dalšími energeticky bohatými rostlinami jako seté konopí a křídlatka. Vysušené plodiny se lisují do kvádrů či válců o hmotnosti 500 kg. Komunální odpad spolu s dřevem a zbytky zemědělských plodin se přeměňuje na směs hořlavých kapalin a plynů pyrolýzou. Zplyňováním dřeva je možné získat dřevěné uhlí. Pro výrobu dřevěného uhlí se však převážně využívá pyrolýza [1].

1.2 Hrubý rozbor paliva

Základním charakteristickým rysem, který určuje složení paliv, je hrubý rozbor. Tato metoda určuje poměr mezi hořlavinou (h), popelovinou (A) a vodou (W) obsaženými v palivu. Tento poměr vyjadřujeme vztahem (1.1) [3].

$$h + A + W = 100\% \quad (1.1)$$

Schematické zobrazení jednotlivých složek tuhého biopaliva viz obr. 1.



Obr. 1 Složení tuhého biopaliva; upraveno dle [6].

1.2.1 Vlhkost

Nedílnou součástí tuhého paliva je vlhkost. Vlhkost paliva vyjadřuje obsah vody, která se v palivu nachází. Slouží jako ukazatel základní garanční vlastnosti paliva [7].

Geologicky starší černé uhlí má celkovou vlhkost v rozmezí 3–10 %, zatímco hnědé uhlí (mostecké) 26–40 % viz tab. 1 [2]. Přítomnost vody je nežádoucí, jelikož snižuje výhřevnost paliva a zatěžuje dopravu. Při spalování pohlcuje část uvolněného tepla a zvyšuje tvorbu dehtu [8].

Tab. 1 Celková vlhkost tuhých paliv [2].

Druh paliva	Celková vlhkost [%]
Kvalitní černé uhlí (ostravské)	3–10
Kladenské černé uhlí	12–18
Starší hnědé uhlí (mostecké)	26–40
Mladší hnědé uhlí (sokolovské)	25–49
Lignit	40–55
Čerstvá rašelina	80–90
Rašelina na vzduchu sušená	20–35

Rozdělení podle způsobu vázání vody na palivo:

- přimíšená voda – lze ji mechanicky oddělit odkapáváním nebo odstředěním
- hrubá voda – odstranění proběhne při laboratorní teplotě s relativní vlhkostí (RH) vzduchu asi 50 %
- voda povrchová – lpí na povrchu zrn a nelze ji mechanicky odstranit
- volná voda – skládá se z přimíšené, hrubé a povrchové vody
- zbytková voda – je obsažena v kapilárách paliva. Jedná se o část, která zůstane po odstranění hrubé vody. Přesnou hodnotu zjišťujeme vysušením paliva na 105 °C
- chemicky vázaná voda – zjišťujeme až po spálení paliva
 - hydrátová – je vázaná na popelovinu
 - okludovaná – malé množství je adsorptivně vázané na hořlavinu
- veškerá voda – skládá se z hrubé, zbytkové a povrchové vody [2]; [3].

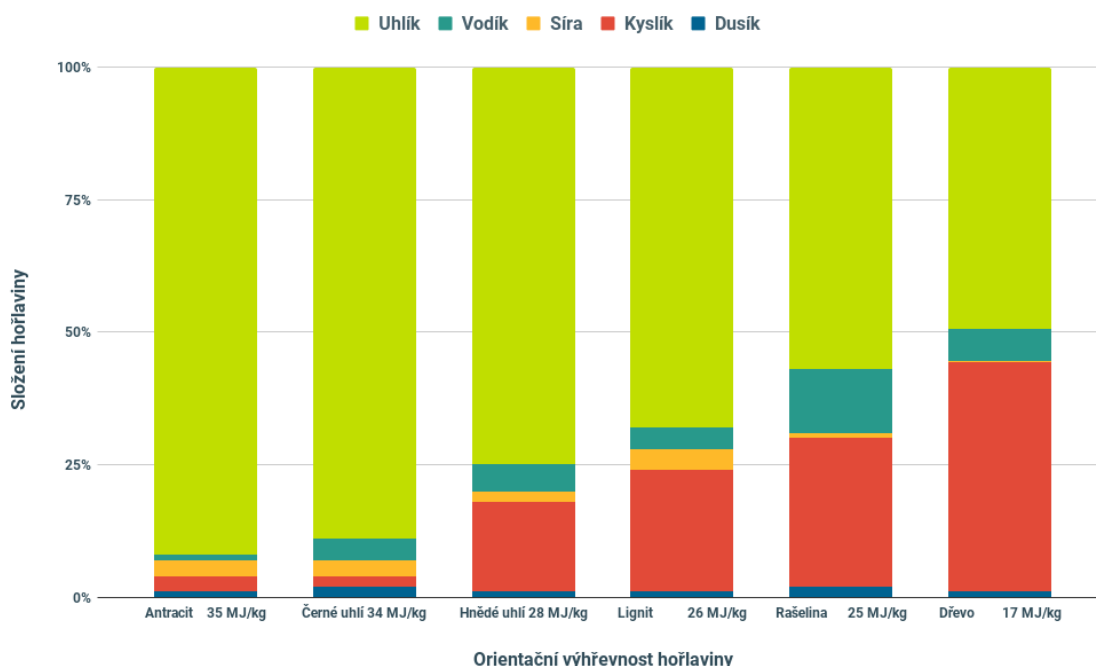
1.2.2 Popelovina

Popelovina je spolu s vodou součástí balastu a balast je ta část paliva, která nepředstavuje žádné energetické využití. Nadměrné množství vody a popeloviny zhoršuje kvalitu paliva. Palivo se tak hůře spaluje a celková tepelná energie je menší. Příčinou jsou minerální látky obsažené v palivu jako (křemičitany, uhličitany a sírany) [9].

Pokud při hoření paliva není přítomno dostatečné množství kyslíku nastává nedokonalé spalování. Při nedokonalém spalování vznikají kromě oxidu uhličitého a vodní páry také kouř, saze a popel. Pro srovnání uhelný popel je pro lidské zdraví škodlivější než dřevěný popel. Uhelný popel obsahuje širší škálu toxických a radioaktivních látek mezi, které patří olovo, arsen, rtuť a kadmium. Pravidelné vystavování těmto látkám zvyšuje riziko vzniku respiračních onemocnění [10].

1.2.3 Hořlavina

Palivo je složeno z hořlaviny a balastu. Hořlavina je složka v palivu, která při hoření uvolňuje teplo. Hořlavina se skládá z prchavého podílu a tuhého uhlíku. Prchavý podíl se uvolňuje při začátku spalování a hraje významnou roli při vznícení paliva a stabilizaci celého spalovacího procesu. Z elementárního rozboru lze popsat, že mezi aktivní hořlavé látky nacházející se v palivu patří uhlík C, vodík H a síra S. Nehořlavé látky jsou: dusík N, kyslík O. Celkové porovnání výhřevnosti daných paliv je zobrazeno v obr. 2. Nejmladší dřevo obsahuje cca 45 % uhlíku, 40 % kyslíku a 5 % vodíku. Dřevo s vyšším obsahem prchavé hořlaviny se rychleji zapálí a hoří větším plamenem. Zatímco geologicky starší antracit obsahuje cca 90 % uhlíku, 4 % vodíku a nepatrné množství zbytkových prvků [2]; [9].



Obr. 2 Srovnání prvkového složení hořlaviny různých paliv včetně jejich výhřevnosti [9].

1.2.4 Spalné teplo

„Spalné teplo (Q_s) je množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení měrné jednotky paliva (kg/m^3), přičemž vlhkost v palivu obsažená nebo při spalování vzniklá zůstává ve fázi kapalné (kondenzuje).“ [11].

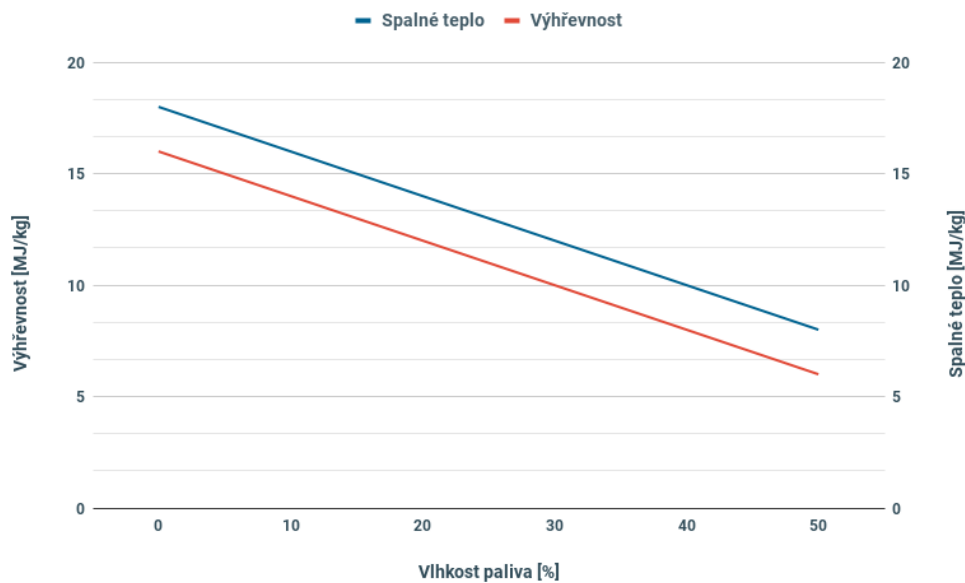
Definice platí za předpokladu, že produkty spalování se skládají z plynného kyslíku, oxidu uhličitého, dusíku, oxidu siřičitého, vody v kapalném stavu nasycené oxidem uhličitým za reakčních podmínek ve spalovací nádobě a popela v tuhém stavu, a to při referenční teplotě [12].

Spalné teplo je vždy vyšší než výhřevnost o hodnotu výparného tepla. Hodnota se stanovuje kalorimetricky nebo výpočtem [11].

1.2.5 Výhřevnost

„Výhřevnost (Q_i) je množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení měrné jednotky paliva (kg/m^3), přičemž vlhkost v palivu obsažená nebo při spalování vzniklá je ve fázi plynné (vypařuje se).“ [11].

Výhřevnost je závislá na množství aktivních prvků hořlaviny (uhlík, vodík, síra). Vyšší množství těchto aktivních prvků zvětší celkovou výhřevnost paliva. Konkrétně u surového dřeva se pohybuje obsah vody mezi (40–60) %. Po dvou letech sušení (tedy nejvhodnější pro spalování) klesne obsah vody pod 20 %. Výhřevnost se průměrně po dvou letech zvedne z 8,5 MJ/kg dřeva přibližně na 13,1 MJ/kg dřeva. Závislost výhřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti je přímo úměrná vlhkosti paliva. Tuto závislost popisuje obr. 3 [9].



Obr. 3 Závislost výhřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti [9].

Výpočet výhřevnosti ze změřeného spalného tepla se určí podle rovnice (1.2) [3].

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H^r) \quad (1.2)$$

Kde Q_s je spalné teplo, W^r je obsah vody v palivu, r je kondenzační teplo vody, H^r je obsah vodíku v surovém palivu [5].

1.3 Metody stanovení vlhkosti tuhých paliv

V této kapitole budou řešeny metody měření vlhkosti v tuhých palivech. Ve většině případů se setkáme s látkami, které jsou hygroskopické². Proto je vhodné rozdělit vlhkosti v materiálu na relativní rovnovážnou vlhkost a absolutní vlhkost daného paliva [13].

- Relativní rovnovážná vlhkost látek – popisuje okamžitý rovnovážný stav paliva s relativní vlhkostí okolního prostředí. V tomto stavu se vlhkost materiálu dále nemění. Materiál žádnou vlhkost nepřijímá ani nevydává.
- Absolutní materiálová vlhkost – udává procentuální obsah vody z celkové hmotnosti materiálu [13].

Pro přepočítání relativní vlhkosti z celkové hmotnosti vzorku se využívá vztah (1.3) [8].

$$W^{rel} = 1 - \frac{1}{1+W^{abs}} \quad (1.3)$$

Kde W^{rel} je relativní rovnovážná vlhkost, W^{abs} je absolutní materiálová vlhkost [8].

² Látky, které jsou schopny absorbovat nebo adsorbovat vodu z okolního prostředí.

Rozdělení metod měření vlhkosti podle specifických kritérií:

1. Metody přímé
 - a. Stanovení vlhkosti oddělením vody od pevné fáze
 - i. gravimetrická metoda
 - ii. destilační metoda
2. Metody nepřímé
 - a. Odezva některých chemických reakcí
 - b. Pohltivost elektromagnetického záření vysokých frekvencí
 - i. spektrometrická metoda (NIR)
 - ii. metoda pohlcování gama a rentgenového záření
 - iii. měření útlumu mikrovlnné energie
 - iv. metoda nukleární magnetické rezonance (NMR)
3. Měření jiných veličin v souvislosti s obsahem vody
 - a. Dochází ke změnám elektrických vlastností materiálu
 - i. odporová metoda
 - ii. kapacitní metoda
 - iii. indukční metoda
 - b. Dochází ke změnám tepelných vlastností materiálu
 - i. změna součinitele tepelné vodivosti

Metody přímé řadíme mezi metody destruktivní, kdy je třeba odebrat vzorek z celkového objemu materiálu [14].

Metody nepřímé nezjišťují zbytkovou vlhkost materiálu přímo, ale detekují ji na základě jejích fyzikálních vlastností. Tyto vlastnosti se mění podle toho, jestli byl materiál vysušen nebo zvlhčen. Senzory jsou závislé na přesné kalibraci podle druhu měřeného materiálu [15].

1.3.1 Gravimetrická metoda

Slouží k přesnému určení vlhkosti paliva na základě zvážení vzorku před a po sušení. Jedná se o metodu destruktivní a časově náročnější. Během procesu není možnost spojitě zaznamenat celý průběh měření vlhkosti. Tato metoda se nepoužívá u nehomogenních směsí [14].

Vzorec pro obecný výpočet vlhkosti paliva gravimetrickou metodou (1.4) [14].

$$W_{abs} = \frac{m_w - m_o}{m_o} \quad (1.4)$$

Kde m_w je hmotnost vlhkého vzorku, m_o je hmotnost absolutně suchého vzorku [14].

1.3.2 Gravimetrická metoda pro tuhá biopaliva

Podstatou této metody konkrétně pro tuhá biopaliva je sušit vzorek v sušárně ve vzduchové atmosféře při teplotě 105 °C, dokud nebude hmotnost konstantní. Po zvážení a zjištění úbytku hmotnosti vypočítáme obsah vody v procentech [16].

Tato metoda podle normy ISO 18134 se skládá ze tří specifických norem.

1. Celková voda – referenční metoda

Přípravené zkušební vzorky se v obalu přenesou na prázdný čistý plech, kde se rovnoměrně rozprostřou tak, aby 1 g materiálu pokryl plochu 1 cm². Před zahříváním je nutné plech se zkušebním podílem zvážit s předností na 0,1 g. Obdobně zvážíme referenční plech beze vzorku,

který slouží ke korekci vztlaku způsobeného menší hmotností horkého plechu. Následně oba plechy umístíme do sušárny přehřáté na (105 ± 2) °C. Sušení se zastavuje v případě, že mezi dvěma následujícími váženími v intervalu 1 hodiny se absolutní hmotnost sušeného vzorku nezmění o více než 0,2 %. Oba plechy se pak vyjmou ze sušárny a zváží [16].

Výpočet obsahu vody pro vlhký stav je charakterizován vztahem (1.5) [16].

$$M_{ari} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (1.5)$$

Kde m_1 je hmotnost prázdného plechu použitého pro zkušební podíl, m_2 je hmotnost plechu se zkušebním podílem před sušením, m_3 je hmotnost plechu se zkušebním podílem po sušení, m_4 je hmotnost referenčního plechu před sušením, m_5 je hmotnost referenčního plechu po sušení [16].

Pro výpočet obsahu vody předsušeného materiálu existuje vztah (1.6) [16].

$$M_T = M_p + M_r \cdot \left(1 - \frac{M_p}{100}\right) \quad (1.6)$$

Kde M_p je úbytek vody předsušením, M_r je zbylá voda stanovená v předsušeném vzorku.

2. Celková voda – zjednodušená metoda

Tato druhá varianta zjištění obsahu celkové vody ve zkušebním vzorku u tuhých biopaliv se používá při běžné kontrole, která nevyžaduje nejpřesnější výsledek. Pokud se nám nepovede provést zkrácení vzorků rychle, je třeba je dodatečně předsušit. Celkový podíl vzorků by měl mít minimálně 300 g. Na začátku zvážíme prázdný čistý plech s přesností 0,1 g. V tomto případě zanedbáváme působení vztlaku na plech, proto druhý referenční plech zanedbáme. Další postup je identický s referenční metodou.

Výpočet obsahu vody ve zkušebním podílu je uveden vzorcem (1.7) [17].

$$M_{arj} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (1.7)$$

Kde m_1 je hmotnost prázdného plechu použitého pro zkušební podíl, m_2 je hmotnost plechu se zkušebním podílem před sušením, m_3 je hmotnost plechu se zkušebním podílem po sušení.

3. Obsah vody v analytickém vzorku pro obecný rozbor

Postup začíná vysušením prázdné váženky s víčkem při teplotě (105 ± 2) °C. Váženka se následně zváží s přesností na 0,1 mg. Po přidání zkušebního podílu se váženka s víčkem opět zváží. Zkušebním podílem jsou v tomto případě malé částice tuhého biopaliva, které jsou velmi hygroskopické. Do sušárny vložíme váženku se vzorkem a vedle umístíme samostatně víčko. Sušíme do té doby, než bude rozdíl hmotností mezi dvěma váženími provedených během 1 hodiny menší než 1 mg. Okamžitě po vyjmutí ze sušárny se váženka přikryje víčkem a vloží do exikátoru. Po ustálení na laboratorní teplotu vyjmemu celou váženku a vážíme s přesností na 0,1 mg. Celý proces provádíme dvakrát. Výsledky by se neměly lišit o více než 0,2 % absolutní vlhkosti [18].

Výpočet obsahu vody ve zkušebním podílu vzorku pro počítáme vzorcem (1.8) [18].

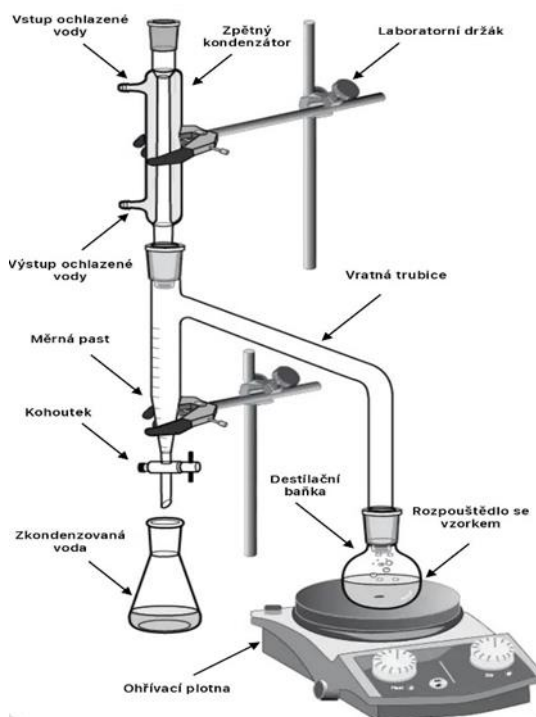
$$M_{ad} = \frac{(m_j - m_k)}{(m_j - m_i)} \cdot 100 \quad (1.8)$$

Kde m_i je hmotnost prázdné váženky a víčka, m_j je hmotnost váženky se zkušebním vzorkem a víčka před sušením, m_k je hmotnost váženky se zkušebním vzorkem a víčka po sušení [18].

1.3.3 Destilační metoda

Zkoumaný vzorek se destiluje v rozpouštědle ohřáté nad bod varu vody v destilační baňce. Vypařená voda a rozpouštědlo společně zkondenzují v zpětném kondenzátoru. Zkondenzované množství vody nesmísené s rozpouštědlem stečené do měrné pasti se následně změří. Použité rozpouštědlo má obvykle vyšší teplotu varu než voda. Destilace probíhá do doby, dokud padající kapky rozpouštědla nejsou čiré a objem vody není konstantní. Zkouška se provádí v inertní atmosféře, čímž je odstraněno riziko oxidace vzorku se vzduchem. Mezi nejpoužívanější rozpouštědla se řadí benzen, toluen a xylen [14]; [19].

Při volbě rozpouštědel s xylenem nebo toluenem, které mají menší hustotu, než voda využijeme Dean-Starkův aparát viz obr. 4. V měrné pasti dojde vlivem nesmísitelnosti rozpouštědla s vodou k rozdělení obou kapalin. Ve spodní část zůstane voda a v horní rozpouštědlo. V případě zvednutí hladiny nad spodní část vratné trubice dojde navrácení rozpouštědla zpět do destilační baňky. Hladinu vody lze korigovat kohoutkem ve spodní části měrné pasti. Tento destilační přístroj byl vynalezen v roce 1920 pro stanovení obsahu vody v ropě [19]; [20].



Obr. 4 Dean-Starkův aparát [20].

Konkrétně pro xylenovou destilační zkoušku s navázkou paliva se zrny menšími než 3 mm, o hmotnosti (30–60) g s přesností 0,1 g, využijeme (150–200) cm² technického bezvodého xylenu s bodem varu okolo 120 °C. Měrná past se naplní až po okraj xylenem nasyceným vodou. Po destilaci se veškerá voda určí odečtením na stupnici měrné pasti a vydělením hmoty tohoto objemu hmotou navážky paliva [21].

Jedná se o vysoce přesnou metodu určení vlhkosti v palivech. Nevýhodou je náročná příprava vzorku s poměrnou dlouhou dobou destilace [14].

1.3.4 Odporová metoda

Tato nepřímá metoda se využívá pro odhad vlhkosti vzorku řeziva. K měření je potřeba elektrický odporový vlhkoměr, který je zapotřebí seřadit podle druhu a teploty dřeva určeného k měření. Izolované elektrody se zarazí do 0,3násobku šířky vzorku v minimální vzdálenosti 300 mm od obou konců. Měřicí místo nesmí obsahovat kůru a suky [22].

Měřený odpor závisí na geometrii, druhu a teplotě dřeva. Měření ovlivňuje poloha a materiál elektrod. Měřit lze při průchodu stejnosměrného nebo střídavého proudu. V případě průchodu stejnosměrného proudu vzniká polarizační efekt, který vyvolá přechodnou odezvu v měřeném odporu. Navrhuje se tedy měnit pravidelně polaritu elektrod, tedy připojit střídavý proud. Výsledný odpor se vypočítá zprůměrováním posledních sedmi hodnot [23].

1.3.5 Kapacitní metoda

Jedná se o další způsob, jak zjistit vlhkost řeziva nepřímou metodou. Využívá se ruční kapacitní vlhkoměr s rovnou povrchovou plochou kondenzátorových desek. Před prvním měřením je potřeba uvést přístroj do výchozího nastavení pomocí kalibrační desky. Po vhodném nastavení podle druhu měřeného dřeva musí být zabráněno vzniku vzduchové mezery mezi měřicím přístrojem a povrchem dřeva. Měříme ve vzdálenosti 300 mm od okraje, při kratší délce vzorku uprostřed v místě bez povrchových vad [24].

Přesný princip kapacitního měření je založen na činnosti kondenzátoru. Obsah vody se detekuje na základě změny relativní permitivity materiálu, jelikož vzdálenost desek, povrch kondenzátoru a permitivita vakua zůstávají při měření konstantní. Voda má relativní permitivitu 80, zatímco materiály jako piliny, pelety a štěpky mají relativní permitivitu mezi hodnotami 2 až 7. Tento rozdíl relativních permitivit umožní stanovit množství vody v daném materiálu pomocí kapacitního měření [15]].

Měřicí zařízení pro metody, kde dochází ke změnám elektrických vlastností materiálu jsou zobrazeny na obr. 5.

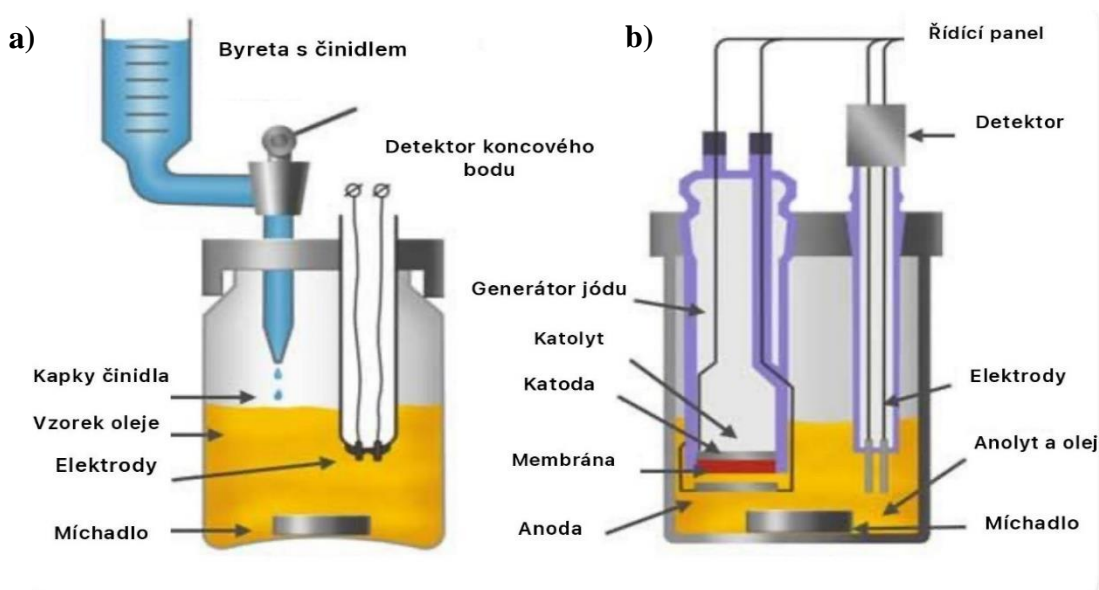


Obr. 5 a) Odporový měřič vlhkosti Greisinger, b) Kapacitní měřič vlhkosti Voltcraft [25].

1.3.6 Karl Fisherova titrační metoda

Jedná se o analytickou metodu používající coulometrickou nebo volumetrickou titrací³ k určení množství vody ve vzorku. V principu jde o redoxní reakci vody s jódem a oxidem siřičitým za vzniku oxidu sírového a jodovodíku. Při spotřebě veškeré vody ve vzorku dojde k náhlému poklesu proudu [26].

Jednosložkové činidlo KF titrační metody se skládá z jódu, oxidu siřičitého a imidazolu. Všechny tyto látky jsou rozpuštěny ve vhodném alkoholu, který slouží jako rozpouštědlo. Dvousložkové činidlo KF titrační metody obsahuje navíc metanol. Rychlost KF titrace u dvousložkového činidla může být dvakrát nebo třikrát vyšší než u jednosložkového činidla [26].



Obr. 6 a) Zařízení využívající KF volumetrickou metodu, b) Zařízení využívající KF coulometrickou metodu; upraveno dle [26].

Volumetrická titrační metoda je vhodná pro vzorky s vysokým obsahem vody. Nejpřesnějších výsledků lze dosáhnout, pokud je přítomnost vody alespoň 10 mg. Během volumetrické metody se titrační činidlo přidává do vzorku byretou. Zařízení využívající volumetrickou titrační metodu je znázorněno na obr. 6 a). [26]. Jediným rozdílem u coulometrické titrační metody je generování titračního činidla elektrochemicky v titrační nádobě [27]. Coulometrická metoda je schopna detekovat koncentraci již u 10 μg vody ve vzorku, zařízení je zobrazeno na obr. 6 b) [26].

Výhodou KF titrace je vysoká přesnost a preciznost. Snadná příprava vzorku s krátkou dobou trvání analýzy. Metoda je univerzální a vhodná pro pevné, kapalné a plynné látky. KF titrace se využívá především v potravinářském farmaceutickém a ropném průmyslu pro kvantitativní analýzu celkového obsahu vody [26].

³ Chemická analýza schopná určit obsah vody, přidáním přesného množství činidla o známé koncentraci [27].

1.3.7 Spektrometrická metoda NIR

Jedná se o metodu využívající vlny o vlnové délce blízké frekvenci infračerveného záření, které pokrývají spektrum v rozmezí 700 nm až 2500 nm. Všechny spektrometrické metody fungují na Lambert-Beerově zákoně, který definuje kolik světla může daná látka absorbovat na základě její chemické koncentrace. Každý elektron v různých látkách potřebuje odlišné množství energie, aby se dostal do excitovaného stavu⁴, tzv. elektronový přechod, které je možno měřit. U NIR spektroskopie dochází v molekule k absorpci vlnové délky blízké frekvenci infračerveného záření, která celou molekulu rozvibruje. Konkrétně molekula vody se skládá ze dvou částečně kladně nabitých atomů vodíku spojených s částečně záporně nabitým atomem kyslíku. Pokud je molekula vody vystavena tomuto specifickému infračervenému záření, je excitována do tří různých stavů: asymetrického protažení, symetrického protažení a nůžkového ohybu [28].

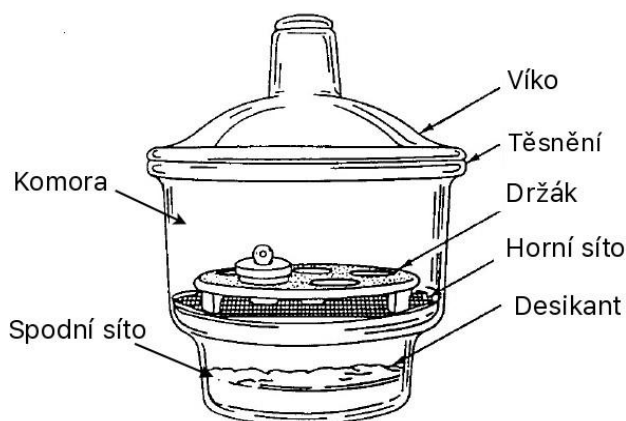
Před měřením je potřeba přístroj zkalibrovat. Pro každou vlnovou délku existuje řada numerických konstant a měření probíhá zvlášť pro jednotlivou kombinaci analyzovaného produktu a parametru. Z naměřených dat a zvolených kalibračních konstant vyčíslí mikroprocesor výsledky analýzy [14]. NIR spektrometrie patří mezi rychlejší metody s vysokou přesností a citlivostí [28].

⁴ Elektron je ve stavu s vyšší energií, která je následně uvolněna ve formě elektromagnetického záření, aby došlo k jeho návratu do normálního stavu [28].

2 Exsikátor a desikační látky

Exsikátor je vzduchotěsná nádoba, uvnitř které je udržován vzduch s nízkou vlhkostí, a to pomocí desikační látky, která se nachází ve spodní části exsikátoru. Využívá se pro chlazení vytápěných předmětů a také pro skladování již vysušených vzorků, které nesmí být vystaveny vlhkosti vyskytující se volně v atmosféře [29].

Schematicky popsany model na obr. 7 má tradiční kopulovitý tvar. Víko přiléhá k těsnění, které obsahuje silikonový kroužek, u něhož není potřeba využívat vakuové mazivo. Exsikátor obsahuje horní síto, na kterém je držák vhodný pro umístění kelímku s vysušeným vzorkem. Spodní síto slouží pro položení desikantu na dno komory [30]. Síta se obvykle vyrábějí z polypropylenu nebo nerezové oceli [31].



Obr. 7 Popis standardního exsikátoru; upraveno dle [32].

2.1 Rozdělení exsikátorů podle materiálu

2.1.1 Skleněný exsikátor

Skleněný exsikátor je vyrobený obvykle z borosilikátového skla. Kombinace bóru, oxidu křemičitého, sodíku a vápna, dokáže odolat extrémním a kolísavým teplotám, aniž by se zhoršila mechanická pevnost a změnily rozměry nádoby. Sklo je opticky průhledné a má velmi dlouhou životnost [33].

Riziko představuje kyselina fluorovodíková s koncentrovanou kyselinou fosforečnou, které mohou narušit mechanickou stabilitu [34].

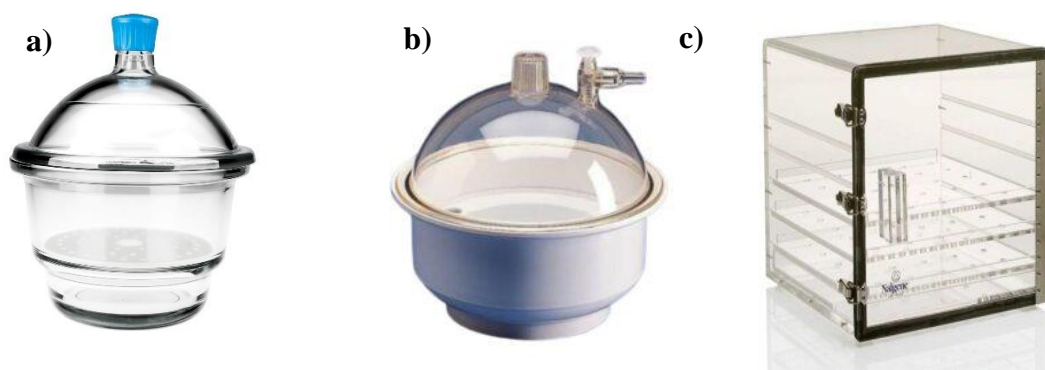
2.1.2 Polykarbonátové a polypropylenové exsikátory

Tyto exsikátory vyrobené z plastu jsou odolné vůči nárazům a implozi. Odolávají též vysokým vakuovým tlakům [31]. Na obr. 8 b) je víko tvořeno z průhledného polykarbonátu doplněného uzavíracím kohoutkem, kterým je možné připojit vývěvu pro odsávání vzduchu. Polypropylenová komora zajistí nepropustnost pro všechna pevná vysoušedla, včetně zředěných kyselin a zásad. Exsikátor je díky nízké hmotnosti dobře přemístitelný [34].

2.1.3 Akrylátová skříň

Desikačním činidlem kromě silikagelu může být i inertní plyn, např. dusík. Skříň je výhodná pro sušení nebo skladování většího množství vzorků zároveň. Police jsou nastavitelné pro uchování vzorků různých velikostí [31].

Jednotlivé druhy jsou zobrazeny na obr. 8:



Obr. 8 a) Skleněný exsikátor s plastovým hmatníkem od Verkonu [35], b) polykarbo-
nátový exsikátor od Kartell, c) akrylátová skříň od Nalgene [31].

2.2 Rozdělení exsikátorů podle metody vysoušení

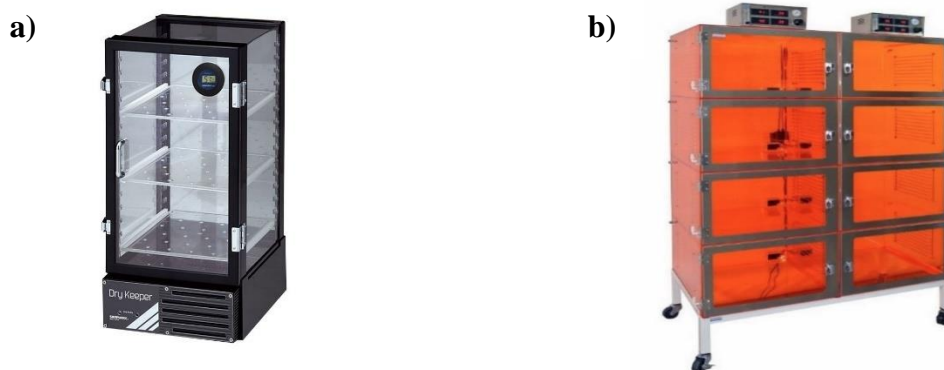
2.2.1 Standardní exsikátor

Je to typický laboratorní exsikátor, kde je vyžadováno ruční monitorování a obsluha. Vlhkost je ze vzduchu adsorbována pomocí desikační látky. Při úplném nasycení desikační látky je třeba provést regeneraci ohřevem. Výhodou je použití jakéhokoliv typu desikační látky např. silikagelových kuliček nebo aktivního uhlí. Vzhledem k nízké hmotnosti je manipulace jednoduchá. Standardní exsikátor je zobrazen na obr. 8 a) [36].

2.2.2 Standardní exsikátor pro čištění vzduchu

Využívá stálého průtoku inertního plynu (suchý dusík nebo stlačený vzduch) přes průtokoměr k udržení nízké vlhkosti. Náhradou vlhkého vzduchu za suchý docílíme rychleji snížení stávající vlhkosti než s běžnými desikačními látkami. Využíváme to hlavně u objemnějších exsikátorů a vícekomorových skříní. Relativní vlhkost může klesnout při dané teplotě až na 0 % RH, uvnitř komory se vytvoří přetlak a bezprašné prostředí, které je pro uchování určitých vzorků nutné.

Nevýhodou může být stále manuální sledování vysoušeného vzorku. Také cena inertního plynu v porovnání s klasickým desikantem. Při provozu je vhodné zajistit správnou ventilaci laboratoře. Znázornění exsikátoru pro čištění vzduchu na obr. 8 c) [36]; [30].



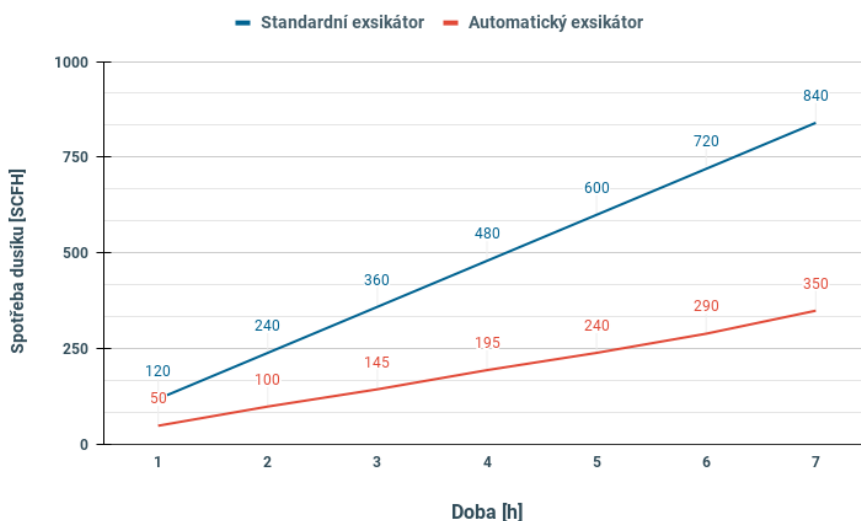
Obr. 9 a) Elektrický exsikátor firmy Dry-Keeper [37], b) Automatizovaný exsikátor pro čištění vzduchu firmy Cleatech [30].

Exsikátor s automatickou regenerací desikační látky

Jedná se o standardní exsikátor doplněný elektrickými ventilátory a ohřivačem, které nepřetržitě regenerují desikační látku, aby se zabránilo nasycení komory vlhkostí. Výhodou je zde přesná regulace vlhkosti, která se provádí automaticky. Při procesu se využívají silikagelové kuličky, které vydrží až tisíce regeneračních cyklů [36]. Exsikátor firmy Dry-Keeper znázorněný na obr. 9 a) udržuje relativní vlhkost na úrovni (30–40) % RH. Absorpční doba trvá půl hodiny, potom následuje půlhodinová regenerace silikagelu [34].

2.2.3 Automatizovaný exsikátor pro čištění vzduchu

Funkčností se neliší od standardního exsikátoru pro čištění vzduchu. Systém nepřetržitě monitoruje relativní vlhkost a na základě změn řídí průtok inertního plynu, aby byla udržena nastavená hodnota relativní vlhkosti. Výhodou je zde výrazný pokles spotřeby inertního plynu, který sníží potřebné provozní náklady. Na obr. 9 b) je znázorněn exsikátor firmy Cleatech. Srovnání spotřeby dusíku standardního oproti automatickému exsikátoru značky Cleatech pro čištění vzduchu je na obr. 10. Spotřeba dusíku je vyjádřena ve standardní kubické stopě za hodinu [30].

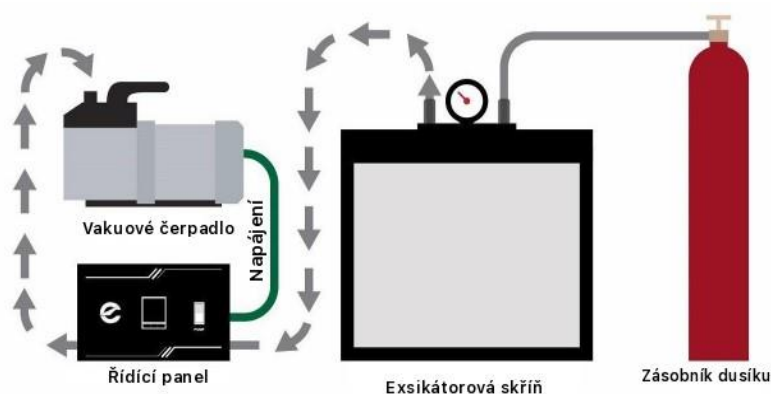


Obr. 10 Porovnání spotřeb dusíku standardního oproti automatickému exsikátoru firmy Cleatech pro čištění vzduchu [30].

2.2.4 Vakuový exsikátor

Odvádí vzduch a vlhkost z komory pomocí vakuového čerpadla. Vznikne ultra suché prostředí s minimální hladinou kyslíku. Využíváme ho pro komponenty, které nemohou být vloženy do sušících pecí z důvodu zvýšené teploty. Podtlak umožní vypařování vody při nižších teplotách. Po otevření vakuového exsikátoru lze díky čerpadlu vakuum rychle obnovit. Ideální využití nalezne v méně vlhké místnosti se vzorky vhodnými pro dlouhodobé skladování. V opačném případě je potřeba provádět nepřetržité vakuové cykly [36].

Místo vakuového čerpadla lze vysušit vzduch pomocí desikační látky jako u standardního exsikátoru [31]. Schematické zobrazení vakuového exsikátoru, který je navíc napojen na nádrž s dusíkem, je na obr. 11.



Obr. 11 Schéma vakuového exsikátoru [30].

2.3 Desikační látky

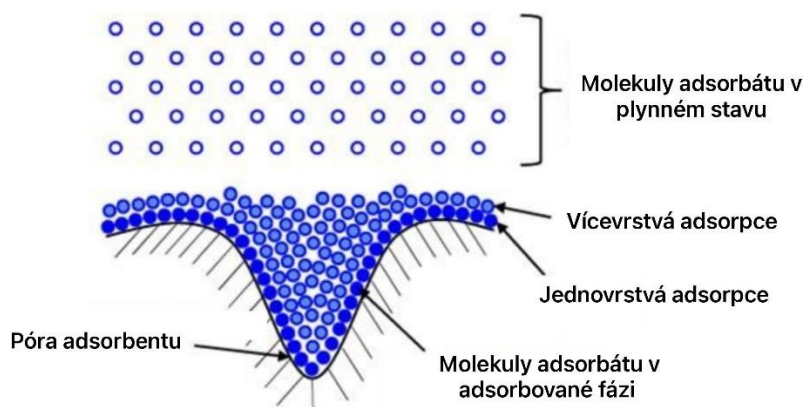
Desikant je látka schopna adsorbovat nebo absorbovat vodu, čímž začne vysušovat své okolí. Adsorpce a absorpce mohou probíhat i současně. Desikantem je tedy hygroskopický materiál, který je schopný pohlcovat vodu z okolního prostředí až do svého maximálního nasycení. Většina vysoušedel jsou pevné látky, ale i některé kapaliny, např. aceton, alkohol a kyselina sírová, které také pohlcují vlhkost [38].

Adsorpce je proces, při kterém se na povrch pevné látky (zřídka na povrch kapalné látky) zachytí adsorbát (molekula nebo iont) vyskytující se v plynném nebo kapalném skupenství [39]. Rychlost procesu závisí především na ploše a teplotě povrchu. Za nižší teploty pravděpodobněji probíhá adsorpce, jelikož látka s menší vnitřní energií má částice s menší kinetickou energií. Dochází k tvorbě vazeb, či jiných intermolekulárních sil. Mezi příklady adsorpce patří adsorpce vody na silikagelu, molekulárním sítu nebo přilnutí stříbra ke sklu k vytvoření povrchu zrcadla [40].

Naopak u absorpce dochází k rozpouštění nebo difúzi molekul nebo iontů do celého objemu materiálu. Mezi příklady absorpce patří rozpouštění kyslíku ve vodě a absorpce oxidu uhličitého ze vzduchu hydroxidem sodným [40]; [41].

Vzdálenosti molekul uvnitř póru adsorbátu jsou za podobných tlakových a teplotních podmínek zřetelně kratší než v plynné fázi. Hustota adsorbátu v adsorbované fázi se tak blíží hustotě kapaliny. Proces adsorpce srovnávající relativní hustoty adsorbátu mezi plynnou a adsorbovanou fází je znázorněn na obr. 12. Schopnost desikační látky rychle adsorbovat vodní páru závisí především na velikosti pórů, protože v závislosti na jejich velikosti mohou v pórech kondenzovat i další molekuly. Makropóry ($2 < d < 50$ nm) slouží k propojení vnějšku granule

k mikropórům ($d < 2$ nm), právě jejich vhodná kombinace vede k vytvoření efektivního desikantu [42].



Obr. 12 Proces adsorpce srovnávající hustoty adsorbátu mezi plynnou a adsorbovanou fází; upraveno dle [42].

2.3.1 Silikagel

Silikagel neboli oxid křemičitý (SiO_2) je minerál, který se přirozeně vyskytuje v přírodě jako písek. Písek je krystalický a neporézní, zatímco silikagel je nekystalický a s vysokou porézností. Silikagel se vyrábí synteticky chemickou reakcí mezi kyselinou sírovou (H_2SO_4) a křemičitanem sodným (Na_2SiO_3). Silikagel je inertní, nehořlavý, netoxický, ve vodě nerozpustný desikant. Obvyklý je kuličkový nebo granulový tvar. Velikost zrn se pohybuje průměrně od 0,5 mm do 6,0 mm. Větší zrna jsou vhodná pro dynamické sušení, kdy vzduch plynule protéká [43].

Průměrná velikost jednotlivých pórů je 24 nm. Díky silné afinitě⁵ k molekulám vlhkosti je silikagel schopný nasávat vlhkost i při teplotách nižších než 105 °C, samozřejmě při vyšších teplotách se schopnost adsorpce zpomalí. Nejlépe silikagel funguje při pokojových teplotách a vyšší relativní vlhkosti. Společnou vlastností s jílem je možnost adsorbovat jiné sloučeniny než vodu, a to amoniak, alkoholy, aromáty a diolefiny. Silněji adsorbované sloučeniny vytlačí slaběji držené sloučeniny, pokud dojde k navázání více složek zároveň [44].

Silikagel se díky regeneruje na svou původní hmotnost zahřátím na 100 °C až 120 °C v sušárně. Tímto procesem si silikagel obnovuje svou schopnost adsorbovat vlhkost. Pro teplotu 120 °C se doporučuje doba potřebná k plné regeneraci okolo 2 hodin. Regeneraci lze provádět opakovaně. Vysoká účinnost pohlcovat vlhkost se zachovává i po více provedených regeneračních cyklech. Pokud by byla použita teplota nad 200 °C, jemná vnitřní struktura silikagelu by byla poškozena, čímž by silikagel ztratil svou schopnost adsorpce [45].

Silikagel se pro určité případy indikuje chloridem kobaltnatým (CoCl_2), který má v suchu tmavě modrou barvu a při nasycení vlhkostí se přeměňuje na fialovou. Barva se začne měnit při adsorpci 8 % RH z okolí [44].

⁵ Míra přitažlivosti molekul za účelem vytvoření sloučeniny [70].

2.3.2 Molekulární síto

Molekulární síto je tvořeno porézními krystalickými hlinitokřemičitany. Síto převyšuje svou afinitou silikagel, proto je schopno adsorbovat molekuly vody z plně nasycené kuličky silikagelu. Velikost jednotlivých pórů je stejná a pohybuje se od 0,3 nm do 1,0 nm. Každá velikost má své využití, např. síto 3A má otvory o velikosti 0,3 nm, schopné adsorbovat vodní páru, čpavek (NH_3) a polární kapaliny, ale většinu uhlovodíků už schopno pojmout není. Struktura síta 5A adsorbuje už normální uhlovodíky a alkoholy. Síto má vynikající schopnost zachycovat vodní páru až do teplot převyšujících 225 °C a dokáže rychle snížit relativní vlhkost prostředí [44]. Regenerační teplota se pohybuje mezi 200 °C až 315 °C, v závislosti na použitém typu síta, kdy je doporučováno pomalé zahřívání [46].

Molekulární síto je vytvořeno kubickou mřížkou tvořenou křemíkem a hliníkem spojenými kyslíkovými můstky. Molekuly s malými průměry jsou schopny se adsorbovat do nitra pórů, zatímco molekuly větší, než póry jsou vyřazeny. Teplota použitá pro regeneraci závisí na typu použitého síta. Využívá se hlavně v lékařství, v zemědělství a v chemickém průmyslu [47].

2.3.3 Síran vápenatý

Vznik síranu vápenatého (CaSO_4) je podmíněn řízenou dehydratací sádry. Své uplatnění nalézá v laboratořích, je chemicky stabilní, nerozpadá se, netoxický, nekorozivní a při vyšších teplotách neuvolní adsorbovanou vodu do okolí. Tato ekonomicky výhodná varianta adsorbuje pouze 10 % své váhy ve formě vlhkosti s možností opětovné regenerace, která se projeví na životnosti [44].

Z článku “Effect of high temperatures on gypsum-based composites“ vyplývá, že teplota vhodná pro dehydrataci síranu vápenatého bez narušení schopnosti pohlcovat vlhkost se pohybuje mezi 190 °C a 200 °C [48].

2.3.4 Aktivovaný oxid hlinitý

Aktivovaný oxid hlinitý (Al_2O_3) je svými vlastnostmi nejvíce podobný silikagelu. Při průchodu vzduchu přes aktivovaný oxid hlinitý dojde k adsorpci vody mezi drobnými otvory. Vzduch, který projde filtrem s tímto desikantem, je zcela vysušen. Regenerace probíhá při teplotě okolo 95 °C. Využití našel ve vojenské technice, konkrétně ve vojenských plynových maskách díky své schopnosti efektivně eliminovat nepříjemné pachy [49].

2.3.5 Bentonitový jíl

Bentonitový jíl je přirozeně se vyskytující minerál, který vznikl zvětráváním a sedimentací usazenin sopečného popela. Hlavní složkou tvořící bentonit je montmorillit vápenatý, proto se v některých publikacích uvádí pod názvem montmorillonitový jíl. Po vytěžení ze země se zpracuje a vysuší do podoby sypkých granulí [50].

Bentonit se dokáže opakovaně regenerovat i při velmi nízkých teplotách bez nárůstu objemu a následné ztráty funkčnosti. Adsorpce u bentonitu funguje efektivně do asi 50 °C, při vyšší teplotě se jeho schopnost adsorbovat vlhkost snižuje. Patří mezi nejlevnější variantu desikačních látek [44].

2.3.6 Oxid vápenatý

Oxid vápenatý (CaO), neboli nehasené vápno se vyrábí z kalcinovaného vápna, které je schopno adsorbovat maximálně 28 % relativní vlhkosti. Výhodou je schopnost adsorpce mnohem většího množství vodní páry při nízké vlhkosti. Řadí se však mezi pomalý desikant, kdy dosažení maximální kapacity trvá dny a během této doby nabobtná. Využití nalezl spíše v baleních s dehydratovanými potravinami [44]. Výrobce oxidu vápenatého uvádí, že k regeneraci síranu vápenatého dochází při 1000 °C [51].

2.3.7 Bromid lithný

Bromid lithný (LiBr) je chemicky vyráběná sloučenina lithia a bromu. Vyrábí se kombinací kyseliny bromovodíkové a uhličitanu lithného, tyto chemikálie vzájemně interagují až po přidání vody. Jedná se též o desikační látku vhodnou k odstranění vlhkosti z prostředí. Zajímavostí je, že se jedná formu soli podobně jako chlorid sodný, ale odlišuje se právě vysoce hygroskopickou povahou. Čím vyšší je teplota vody, tím se stává rozpustnějším např. při 0 °C je rozpustnost 143 g/100 ml a při 20 °C se rozpustnost zvýší na 166,7 g/100 ml. Nejčastěji se využívá jako odvlhčovač v klimatizačních systémech, kde kromě vlhkosti absorbuje i teplo. Mimo jiné se používá i v chladničkách pro absorpci dalších par. Ve farmaceutickém průmyslu se s ním syntetizuje řada léků [52].

2.3.8 Kyselina sírová

Kyselina sírová (H₂SO₄) patří mezi vysoce hygroskopické látky, které při absorpci vody z prostředí zvyšují svůj objem. Při absorpci dochází k ředění celkové koncentrace kyseliny. Při experimentu, kde bylo malé množství kyseliny sírové umístěno v lahvičce pod zásobníkem odděleným membránou, aby nedošlo ke smáčení vody, byl zjišťován nárůst celkového objemu po dobu šesti měsíců. Udržovaná vlhkost měla hodnotu 95 % RH, takže horní vrstva kyseliny neustále pohlcovala vodní páru a vytvářela tak gradient ve spodní části, který poháněl další difuzi molekul vody. Dle provedeného experimentu zjistili, že rychlost absorpce kyseliny sírové se nijak významně nemění při úbytku koncentrace oxidu siřičitého. Experimentálně byla též zjištěna významná produkce tepla, jelikož se jedná o exotermickou reakci a znatelný nárůst celkového objemu. Kyselina sírová po šesti měsících zvýšila svůj objem sedmkrát v prostředí o 95 % RH. Experiment by měl být využit pro pochopení role absorpce vody na výkon chemických filtračních zařízení pro oxid siřičitý [53].

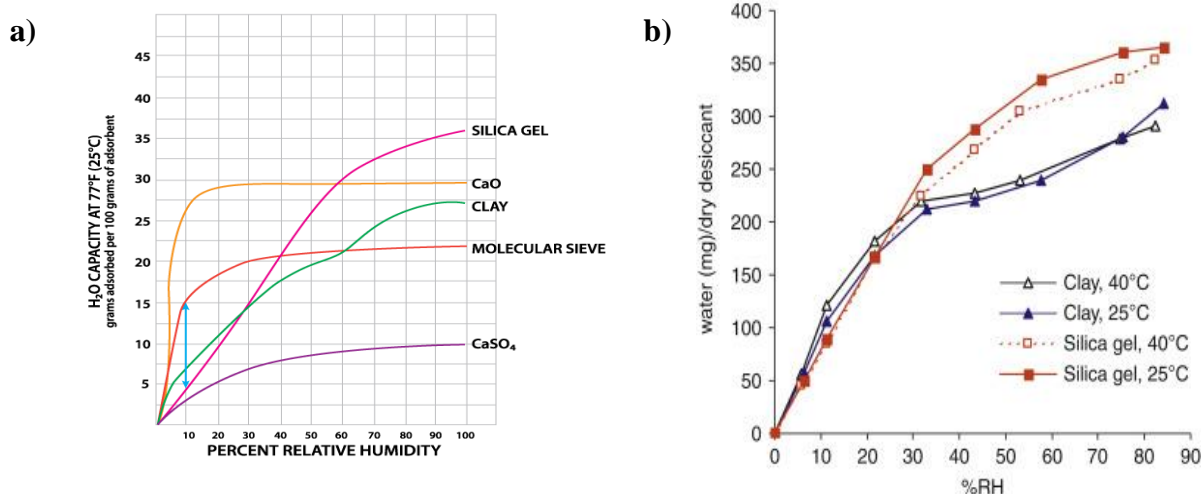
Kyselina sírová je žíravá a ve vyšších koncentracích působí jako oxidační a dehydratační činidlo. Využívá se při výrobě hnojiv, čištění odpadních vod a chemické výrobě. K varu dochází při teplotě 337 °C a k tání při 10 °C, je též extrémně korozivní [54].

2.3.9 Hydroxid sodný

Hydroxidu sodného, jiným názvem louh je bílá pevná vysoce žíravá anorganická sloučenina. Je vysoce rozpustný ve vodě se schopností absorbovat vlhkost navíc s oxidem uhličitým ze vzduchu. Čistý hydroxid sodný je bezbarvý s teplotou tání 318 °C. Podobnou vlastností s kyselinou sírovou je uvolnění velkého množství tepla při reakci s vodou, které může představovat bezpečnostní riziko. Při reakci hydroxidu sodného s kyselinou chlorovodíkovou vzniká chlorid sodný [55].

2.4 Srovnání adsorpci jednotlivých desikačních látek

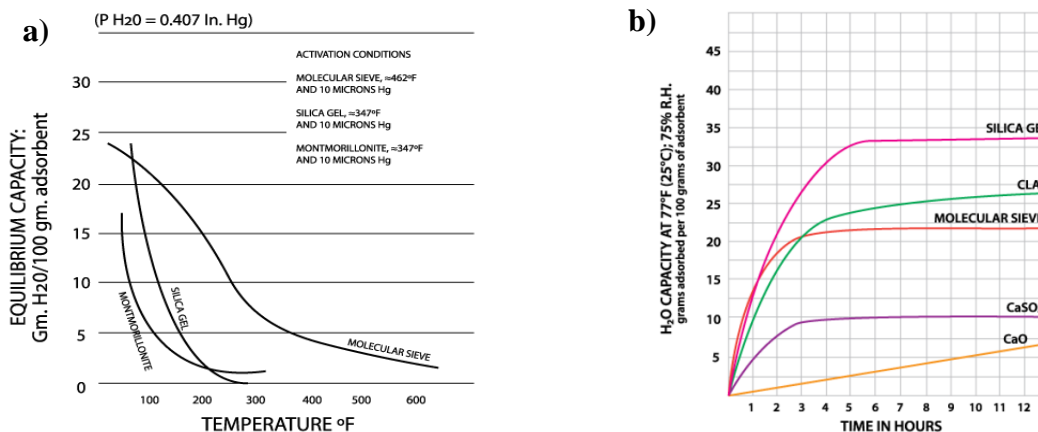
Následující grafy na obrázcích 13 a 14 znázorňují chování jednotlivých desikačních látek v závislosti na relativní vlhkosti, teplotě a čase. Silikagel je tvořen amorfni mikroporézní strukturou, která obsahuje otvory o různých velikostech, přibližně mezi 0,3 nm až 6 nm. Tato rozsáhlá plocha výborně přitahuje a zadržuje vodu adsorpcí spolu s kapilární kondenzací, a to umožňuje adsorbovat až 35 % své hmotnosti ve formě vlhkosti. Silikagel převyšuje schopností pohlcovat vzdušnou vlhkost všechny zmíněné desikanty při zvýšené RH větší než 60 % RH. Při RH menší než 60 % RH je znatelně lepší oxid vápenatý, který je schopen adsorbovat až 30 % své hmotnosti ve formě vzdušné vlhkosti, viz obr. 13 a). Při zvýšené teplotě se adsorbční kapacita zmenšuje, dokonce za teploty okolo 200 °F vykazuje bentonitový jíl stejnou adsorbční kapacitu jako silikagel, což lze pozorovat na obr. 14 a). Na obr. 14 a) je taky patrné, že adsorbční kapacita molekulárního síta při 280 °F je stále okolo 10 %. Při srovnání silikagelu a jílu je patrné, že jíl dokáže vlhkost adsorbovat lépe než silikagel při nižší vlhkosti do 30 % RH, viz obr. 13 a). Prokazatelně nejrychlejší možná adsorpce a udržitelnost pohlcené vlhkosti při zvýšených teplotách z uvedených desikantů má při stejném množství navážky molekulární síto. Viz obr. 14 a) [56].



Obr. 13 a) Závislost adsorbované vlhkosti pro různé desikační látky při 25 °C a navážce 100 g [56], b) Adsorpční izotermy vlhkosti silikagelu a bentonitového jílu [57].

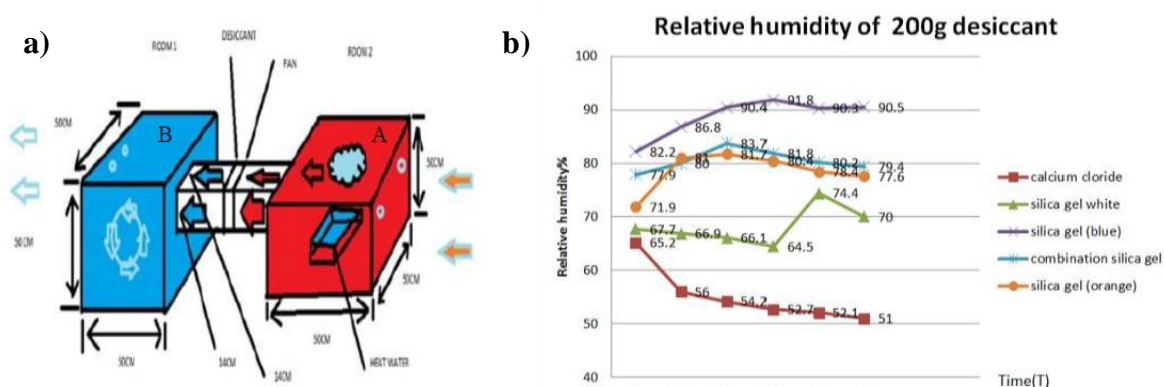
Zmíněný oxid vápenatý vykazuje nejlepší adsorbční schopnosti při nízkém procentu RH okolního prostředí, proto se hojně využívá při uskladnění dehydrovaných potravin, kde je zvýšená vlhkost nepřipustná. Nevýhodou je jeho extrémně pomalá schopnost adsorbovat vlhkost, jak je patrné z obr. 14 b). Pro dlouhodobé skladování se z hlediska pohlcení největšího množství vzdušné vlhkosti na množství desikantu jeví z obr. 14 b) silikagel, jíl a molekulární síto [56].

Článek s názvem „Packaging Selection for Solid Oral Dosage Forms“, který se zabývá ochranou léčiv před vzdušnou vlhkostí, uvádí adsorbční izotermy silikagelu a bentonitového jílu, viz obr. 13 b). Na obr 13 b) je doplněno a rozšířeno chování silikagelu a bentonitového jílu pro odlišné teploty při změně procenta RH. Konkrétně při zvýšené teplotě o 15 °C oproti původním 25 °C u silikagelu dochází poklesu adsorbční kapacity. Zatímco u bentonitového jílu o teplotě 40 °C je možné pozorovat nepatrný nárůst adsorbční kapacity oproti jílu o teplotě 25 °C až do 75 % RH, následně dochází k obrátu. Z uvedeného obr. 13 b) vyplývá, že teplota je významným ukazatelem kvality používaného desikantu [57].



Obr. 14 a) Graf závislosti adsorbční kapacity 100 g desikantu na teplotě, b) Graf závislosti adsorbované vlhkosti při 25 °C a 75 % RH 100 g desikantu na čase [56].

Poslední zmíněná studie s názvem „Comparison for humidity absorption using various silica gel in experimental chambre“ se zabývá porovnáním čtyř 200 g navážek silikagelu (bílý, modrý, oranžový silikagel) vůči jedné 200 g navážce s chloridem vápenatým. Poslední navážka silikagelu obsahovala kombinaci všech zmíněných druhů silikagelu. Silikagel byl vložen do PVC trubky spojující dvě uzavřené malé experimentální komory o objemu 0,125 m³, viz obr. 15 a). V jedné ze dvou zmíněných trubek se nacházela rychlovarná konvice sloužící jako výparník pro výrobu páry. Pára se následně přes malý ventilátor dostávala přes silikagel v PVC trubce do druhé komory. Zjišťovalo se, jak dané desikanty pohlcují a snižují vlhkost pomocí senzoru relativní vlhkosti uvnitř utěsněných komor. Cílem experimentu bylo dosáhnout poklesu z prostředí o 90 až 100 % RH na 50 % až 60 % RH. Snímač zaznamenal každých pět minut celkem tři hodnoty, z kterých následně vytvořil průměrnou hodnotu, která se použila k vytvoření grafu na obr. 15 b). Při tomto experimentu obstál nejlépe chlorid vápenatý, který při přechodu vzduchu z komory o 90 % až 100 % RH poklesl na 51 % RH za 30 minut. Bílý silikagel se za 30 minut ustálil na 70 % RH. V závěru tedy nejlepší volbou pro účinné snížení vlhkosti bylo využití chloridu vápenatého. U chloridu vápenatého dochází k absorpci vlhkosti, což vede k změně z pevné formy na kapalnou. Proto pro optimalizaci celého zařízení by bylo potřeba chlorid vápenatý sušit [58].



Obr. 15 a) Experimentální komora pro oxid křemičitý, b) Graf závislosti adsorbované vlhkosti 200 g čtyř typů desikantů na čase [58].

3 Metody a měření

V první části budou zobrazeny a popsány laboratorní pomůcky, které byly využity při stanovení rychlosti pohlcování vlhkosti jednotlivými desikačními látkami. V druhé části bude popsána metodika průběhu měření. Experimentální měření probíhalo ve fakultní laboratoři č. 314 Energetického ústavu odboru energetického inženýrství FSI v Brně.

3.1 Popis využitých zařízení

3.1.1 Exsikátor s plastovým hmatníkem

Tento laboratorní exsikátor od firmy Verkon vyrobený z borosilikátového skla splňuje normu ČSN 70 4300. Skládá se z nevrтанého víka s plastovým hmatníkem, komory a porcelánové desky. Celý exsikátor je z borosilikátového skla s nízkou teplotní roztažností Boro 3.3. Vykazuje vysokoteplotní a chemickou odolnost. Strukturu mohou rozleptat kyselina fluorovodíková, koncentrovaná kyselina trihydrogenfosforečná. Korozi spustí střídání kyselého a alkalického prostředí. Exsikátor je zobrazen na obr. 8 a) [35].

3.1.2 Laboratorní váha KERN KB 10000-1N

Váha s rozměry 150 x 170 mm² schopna měřit nejmenší dílek s přesností 0,1 g. Maximální váživost je 10100 g. Přípustná teplota se pohybuje v rozmezí 10–40 °C s maximální vlhkostí prostředí 80 % RH. Vážicí prostor je omezen na 90 x 40 mm² [59]. Laboratorní váha KERN KB 10000-1N je zobrazena na obr. 16 b) [59].

3.1.3 Laboratorní sušárna Venticell 111 – ECO LINE

Jedná se o přesnou a rychlou laboratorní sušárnu s objemem komory 111 litrů, viz obr. 16 a). S teplotním rozsahem od +10 °C nad okolní teplotu do 250/300 °C. Systém nucené cirkulace vzduchu dokáže homogenně rozložit teplotu v celém objemu komory při všech procesech ohřívání, sterilizace a sušení materiálu. Maximální přípustné zatížení na jednotlivé síto je 20 kg/síto. Doba náběhu na teplotu 250 °C je 53 minut [60].

3.1.4 Pec laboratorní komorová LAC L 15/12 s regulátorem HT250

Tato laboratorní pec, viz obr. 16 c), disponuje neustálým přísunem a odtahem čerstvého vzduchu. Hlavní průchod vzduchu je umožněn skrz větrací komín v zadní části pece. V dutinách keramických desek jsou bezpečně uloženy topné spirály, které jsou dostatečně chráněny před možným poškozením v důsledku vzniklých agresivních výparů uvolněných ze vsádky. Maximální možná teplota, které lze dosáhnout, je 1200 °C. Náběh na vysoké teploty je rychlý a nehluchý. Vnitřní objem činí 15 l. Ovládání je zajištěno pomocí řídicí jednotky HT250 [61].



Obr. 16 a) Laboratorní sušárna Venticell 111 – ECO LINE [60], b) Laboratorní váha KERN KB 10000-1N [59], c) Pec laboratorní komorová LAC L 15/12 s regulátorem HT250 [61].

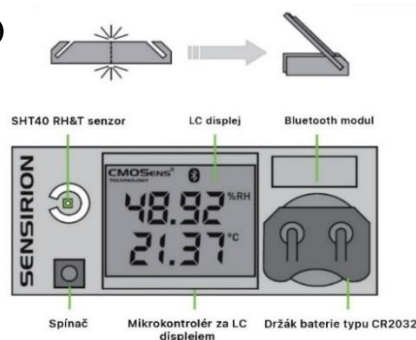
3.1.5 SHT4x Smart Gadget

Jedná se o poměrně malé zařízení zobrazené na obr. 17 a) o rozměrech 75 mm x krát 32 mm x krát 0,8 mm schopné díky senzoru SHT40 měřit vlhkost a teplotu v reálném čase. Zařízení je schopno komunikovat prostřednictvím technologie Bluetooth přes aplikaci Sensirion MyAmbience, která je dostupná na smartphonech s operačním systémem Android nebo iOS. SHT4x Smart Gadget zobrazuje naměřené hodnoty v reálném čase na LCD displeji, zároveň tyto hodnoty ukládá do své vestavěné paměti. Periodu měření lze nastavit v uvedené aplikaci. Zařízení je napájeno baterií typu CR2032, která je schopna napájet zařízení díky nízkoenergetickému režimu delší dobu. Schéma SHT4x Smart Gadget je znázorněno na obr. 17 b) [62].

a)



b)

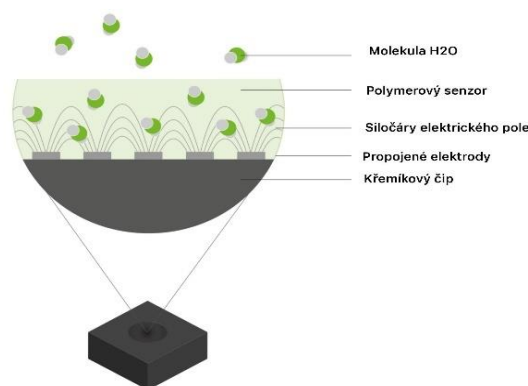


Obr. 17 a) Zařízení SHT4x Smart Gadget, b) Schéma zařízení SHT4x Smart Gadget; upraveno dle [62].

Pro SHT4x Smart Gadget a podobné RHT snímače (snímače schopné detekovat relativní vlhkost a teplotu) neexistuje žádný společný dohodnutý standard pro specifikaci. Proto je důležité uvést, jak lze naměřené výsledky chápat [63].

Senzorová komponenta schopná detekovat relativní vlhkost se skládá z polymeru, který absorbuje a desorbuje molekuly vody v závislosti na okolních podmínkách. Kondenzátor je realizován pomocí vzájemně propojené struktury elektrod, viz obr. 18. Technologie použitá pro detekci teploty je uskutečněna skrze umístění teplotní senzor na bipolárním přechodu křemíkového čipu. Tento proces vstupu plynných molekul do pevného materiálu je poměrně sofisti-

kovaný a nese s sebou mnoho zvláštních jevů. V praxi se tyto speciální jevy zjednodušily a integrovaly do těchto snímačů. Přesnost snímačů relativní vlhkosti lze popsat třemi různými nezávislými pojmy. Jedná se o kalibraci, hysterezi a dlouhodobý drift [64].



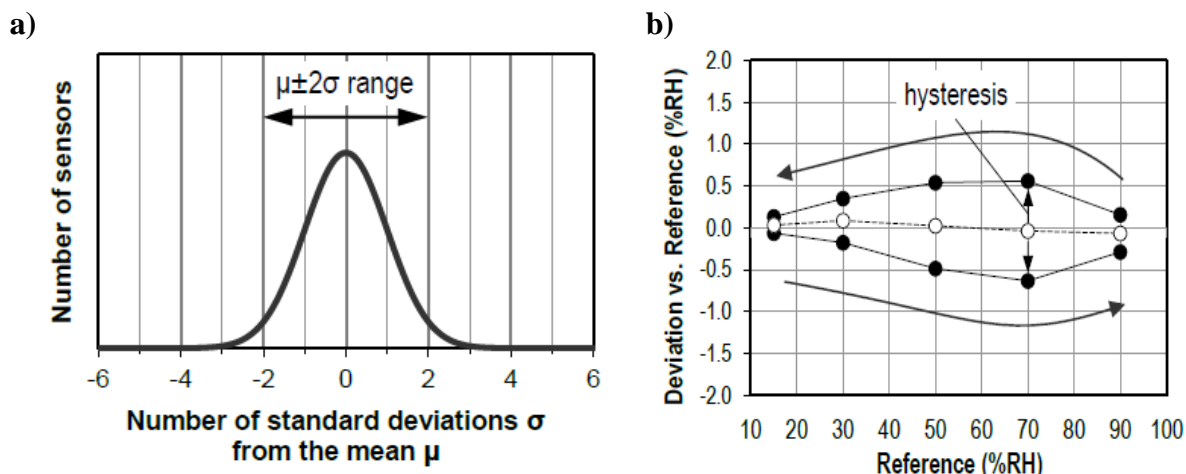
Obr. 18 Propojení elektrod s vrstvou polymeru [64].

Kalibrační přesnost poskytuje informace o odchylce jednotlivých údajů snímače v rovnovážném stavu vůči vysoce přesné referenční hodnotě stanovené v době kalibrace. Rozdělení přesnosti pro určitý počet vyrobených snímačů se řídí normálním rozdělením charakterizovaným průměrnou hodnotou μ a směrodatnou odchylkou σ , viz obr. 19 a).

Hystereze je rozdíl naměřených hodnot snímače v určitém bodě záznamu, který vzniká mezi suchým a vlhkým prostředím. Jinak řečeno, snímače vlhkosti jsou schopny ukládat nedávná měření do své paměti. Čidla na suchý vzduch mají přiřazený záporný posun, zatímco čidla na vlhký vzduch mají kladný posun. Výsledná hystereze je zobrazena na obr. 19 b) jako dráha mezi naměřenou suchou a vlhkou hodnotou prostředí při zdržení 40 minut v každém bodě. Černé tečky znázorňují suché a vlhké prostředí, zatímco prázdné představují střední hodnotu (přesnost kalibrace). Pro upřesnění hystereze je způsobena složením a konstrukcí snímače. Hystereze je brána jako doplňková hodnota.

Poslední parametr upřesnění přesnosti představuje dlouhodobý drift, který vyjadřuje stárnutí snímače. Stárnutí vede ke vzniku náhodné odlišnosti mezi měřenou a referenční hodnotou. Tento drift se určuje vystavením senzoru vysoké teplotě (125 °C) po dobu 408 hodin. Ekvivalentním postupem je také stárnutí tohoto zařízení při 25 °C po mnohem delší době z určité rovnice. Následně se vybere senzor s největší hodnotou driftu stanovenou experimentálně. Tato hodnota se podělí matematicky zjištěnou hodnotou. Výsledek je hodnota představující dlouhodobý drift za rok [63].

Po individuálním testování a kalibrování je SHT4x Smart Gadget identifikovatelný podle specifického sériového čísla. Po kalibraci přístroj musí splnit standardy firmy Sensirion. Tab. 2 s hodnotami specifikující snímač SHT4x Smart Gadget [65].

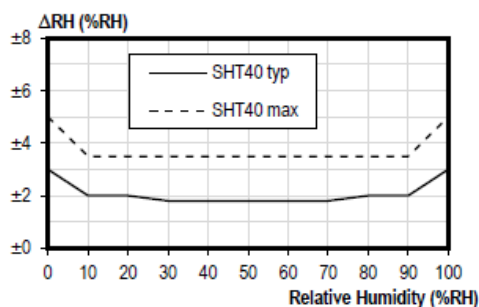


Obr. 19 a) Graf normálního rozdělení počtu snímačů na počtu směrodatných odchylek, b) Graf hystereze [63].

Tab. 2 Specifikace senzoru SHT40 [64].

Relativní vlhkost	SHT4x	Jednotky
Obvyklá odchylka při 30 %-70 % RH	$\pm 1,8$	% RH
Maximální odchylka 30 %-70 % RH	$\pm 3,5$	% RH
Provozní rozsah hodnot	0-100	% RH
Doba odezvy	4	s
Dlouhodobý drift	<0,25	% RH/rok
Hystereze při 25 °C	$\pm 0,8$	% RH

Obvyklá odchylka ovlivní nejvíce přesnost měření relativní vlhkosti, jelikož se v průběhu experimentu bude měnit v závislosti na okolních podmínkách v laboratoři. Z tab. 2 uvedené výrobcem vyplývá, že v prostředí s 30 % až 70 % RH se bude obvyklá odchylka pro naměřené hodnoty pohybovat okolo $\pm 1,8$ % RH. Pro popis rychlosti pohlcování vlhkosti v laboratorním exsikátoru je klíčové znát chování senzoru SHT40 při nízkých hodnotách procent RH. Toto chování senzoru v prostředí od 0 do 100 % RH je zobrazeno na obr. 20 a). Na grafu lze vidět prudký nárůst směrodatné odchylky z ± 2 % RH při 10 % až 20 % RH na ± 3 % RH při 0 až 10 % RH. Při experimentu probíhající v laboratoři bude brána v potaz obvyklá odchylka v rozmezí $\pm 2,5$ % RH, jelikož okolní vlhkost bude měřena při nízkých hodnotách RH [65].



Obr. 20 Přesnost přístroje v závislosti na velikosti relativní vlhkosti [65].

3.2 Stanovení objemu exsikátoru

Objem exsikátoru s plastovým hmatníkem od firmy Verkon byl stanoven pomocí gravimetrické metody. Víko exsikátoru bylo samostatně zváženo na laboratorní váze KERN KB 10000-1N s přesností 0,1 g. Víko bylo naplněno vodou až po okraj a následně zvážena jen hmotnost vody obklopující exsikátor. Obdobně byla zvážena komora exsikátoru spolu s porcelánovým víkem. Hmotnost vody zaplňující prostor v exsikátoru byla sečtena. Výpočet je dán podílem hmotnosti ku hustotě vody, viz (3.1).

$$V_{vz} = \frac{m}{\rho_v} \quad (3.1)$$

$$V_{vz} = \frac{2,342}{997} = 2,35 \text{ dm}^3$$

Kde V_{vz} je vnitřní objem exsikátoru, m je hmotnost vody v exsikátoru, ρ_v je hustota vody.

3.3 Stanovení hmotnosti vodní páry uvnitř uzavřeného exsikátoru

Důležitou částí je stanovení hmotnosti vody, která se nachází uvnitř exsikátoru při laboratorních podmínkách. V první řadě je potřeba zjistit maximální množství vodní páry, které se při naměřené teplotě a atmosférickém tlaku nachází v laboratoři.

Z online kalkulačky pro tlak syté vodní páry zjistíme, že při teplotě 21 °C a standardním atmosférickém tlaku je tlak syté vodní páry 2488 Pa [66]. Parciální tlak syté vodní páry je potom součinem relativní vlhkosti 22,5 % RH a tlaku syté páry. Měrná vlhkost je vypočtena ze vztahu (3.3). Celková hustota vzduchu potřebná pro výpočet celkové hmotnosti vlhkého vzduchu je odvozena ze stavové rovnice ideálního plynu (3.4). Výsledná hmotnost vody nacházející se v exsikátoru je určena rozdílem celkové hmotností vlhkého vzduchu a hmotností suchého vzduchu (3.7).

$$p_p = \varphi \cdot p_p^s \quad (3.2)$$

$$p_p = 0,225 \cdot 2488 = 559,8 \text{ Pa}$$

Kde p_p je parciální tlak vodní páry, φ je relativní vlhkost, p_p^s je parciální tlak syté vodní páry.

$$x_p = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{p_p}{p - p_p} \quad (3.3)$$

$$x_p = \frac{287}{462} \cdot \frac{p_p}{p - p_p} = 0,622 \cdot \frac{595,125}{101\,325 - 595,125} = 3,46 \text{ g} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$$

Kde x_p je měrná vlhkost, r_v je molární plynová konstanta suchého vzduchu, r_p je molární plynová konstanta vodní páry, p je atmosférický tlak.

$$\rho_{celk} = \frac{p}{r_v \cdot T} \quad (3.4)$$

$$\rho_{celk} = \frac{101\,325}{287 \cdot 294,15} = 1,196 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Kde ρ_{celk} je hustota vlhkého vzduchu, T je teplota.

$$m_{celk} = \rho_{celk} \cdot V_{vz} \quad (3.5)$$

$$m_{celk} = 1,196 \cdot 0,00235 = 2,8098 \text{ g}$$

$$m_v = \frac{m_{celk}}{1 + x_p} \quad (3.6)$$

$$m_v = \frac{0,002809}{1 + 0,00346} = 2,7993 \text{ g}$$

$$m_p = m_{celk} - m_v \quad (3.7)$$

$$m_p = 2,8098 \cdot 10^3 - 2,7993 \cdot 10^3 = 9,7 \text{ mg}$$

Kde m_{celk} je hmotnost vlhkého vzduchu, m_v je hmotnost suchého vzduchu, m_p je hmotnost vodní páry [67].

Za těchto daných podmínek se v prázdném exsikátoru nachází přibližně 9,7 mg vody při teplotě 21 °C a standardním atmosférickém tlaku. Výpočet byl proveden v programu SMath Studio.

3.4 Metodika stanovení rychlosti adsorpce jednotlivých desikantů v exsikátoru

První krok, který je pro celé měření klíčový, je zajistit dokonalou vzduchotěsnost exsikátoru. Z toho důvodu se na těsnící okraje zabroušeného skla víka a komory aplikuje menší množství Ramsay tuku, což zajistí dostatečně hladký posuv v horizontálním směru. Víko při uzavírání je přitlačeno dostatečnou silou ke komoře. U správně uzavřeného exsikátoru je okraj čistý bez vzniklého zákalu [68]. Smartphone byl připojen pomocí Bluetooth skrze aplikaci MyAmbience na zařízení SHT4x Smart Gadget. Před samotným měřením bylo promazáno uložisko obsahující předešlá měření. Následně se nastavila perioda záznamu na 10 s pro zařízení SHT4x Smart Gadget.

Obecný postup měření:

1. Před každým měřením byla použita desikační látka zregenerována v sušárně.
2. Následně byla desikační látka rychle vyjmuta ze sušárny (jednotky minut) a uskladněna ve vzduchotěsné nádobě.
3. Na laboratorní váze KERN KB 10000-1N s přesností 0,1 g se navážila požadovaná hmotnost navážky. Manipulace s desikantem proběhla co nejrychleji pro zajištění co nejpřesnějších výsledků.
4. Navážený desikant byl přesypán do exsikátoru. Pro desikační látky v sytké formě se vytvořila miska o zanedbatelné hmotnosti z alobalu ve tvaru dna exsikátoru. Tato miska byla umístěna s navážkou na dno exsikátoru.

5. Na porcelánovou misku uvnitř exsikátoru bylo umístěno zařízení SHT4x Smart Gadget.
6. Komora byla uzavřena víkem exsikátoru.
7. Po ukončeném měření byla naměřená data stáhnuta přes aplikaci MyAmbience do mobilního zařízení.
8. Naměřená data byla zpracována v aplikaci Google Sheets.

Výše uvedený postup byl experimentálně využit při stanovování rychlosti pohlcování vlhkosti uvnitř exsikátoru pro silikagel, molekulární síto, bentonitový jíl, síran vápenatý dihydrát a oxid vápenatý. Tab. 3 popisuje množství jednotlivých navážek a regenerační teploty pro použité desikační látky. První navážka začínala na 50 g a po pravidelném navyšování o 50 g se měření ukončilo 250 g navážkou. Adsorpční izotermy jednotlivých hmotností desikantu byly následně sloučeny do společného grafu. Laboratorní experiment proběhl u všech desikantů za stálé teploty okolo 21 °C. Uvažován byl standardní atmosférický tlak 101 325 Pa pro všechna měření.

Tab. 3 Přehled testovaných desikačních látek s regeneračními teplotami.

	Silikagel	Moleku- lární síto	Bentoni- tový jíl	Síran vápe- natý dihydrát	Oxid vápe- natý
Regenerační teplota [°C]	105	240	105	195	1000
Hustota [kg.m ⁻³]				2960	3340
Označení	Silikagel	Sieve 4A	Clay	CaSO ₄	CaO

3.5 Určení množství vytlačeného vzduchu

Po přidání navážky desikantu o určité hmotnosti do vnitřního objemu exsikátoru je potřeba vzít v úvahu, že určité množství vzduchu v exsikátoru bude vytlačeno. Toto množství vytlačeného vzduchu při objemu exsikátoru 2,35 dm³ není zanedbatelné. Tento předpoklad byl zjištěn až po půlce proběhlých měření, tudíž možnost vkládat do exsikátoru materiál o známém objemu při snižujícím se množství navážky nebylo možné realizovat.

Druhou variantou, kterou bylo možné zpřesnit měření, by bylo vypočítat „objemový korekční koeficient“, který nám umožní vykompenzovat objemové ztráty vlhkého vzduchu v exsikátoru. V tomto objemovém koeficientu by bylo potřeba stanovit objem vytlačeného vzduchu. Dále by bylo potřeba zjistit matematickou formu adsorpční izotermy pro každou desikační látku. Tyto komplikované úkony by možná vedly ke zlepšení naměřených výsledků, ale bylo by potřeba se celou problematikou zabývat komplexně na pomezí kinetiky vnitřních dějů plynu. Pro každou navážku desikantu by byla vypočítána nová hodnota objemového korekčního koeficientu. Po uskutečnění vlastního průzkumu se nepodařilo najít vhodnou variantu začlenění tohoto korekčního koeficientu do výpočtu.

Podle zjištěných hustot pro síran vápenatý a oxid vápenatý byl vypočítán vytlačený objem vzduchu z exsikátoru. Silikagel a molekulární síto mají proměnlivou hustotu v závislosti na velikosti částic. U použitého zakoupeného bentonitového jílu nebyla hustota dohledána, různé internetové zdroje stanovují příliš velký interval, proto nebudou zmíněné desikanty počítány.

Nejdříve je potřeba vypočítat objem desikantu pro 250 g navážku. Ukázkový postup bude uveden na síranu vápenatém, viz (3.9). Rozdílem objemů prázdného exsikátoru stanoveného z rovnice (3.1) a exsikátoru s 250 g navážkou síranu vápenatého je vypočten počáteční objem vzduchu při začátku měření (3.10).

3.5.1 Výpočet vytlačeného množství vzduchu síranem vápenatým a oxidem vápenatým

Na základě zjištěné hodnoty pro hustotu síranu vápenatého a oxidu vápenatého, viz tab.4, je možné vypočítat objem vytlačeného vzduchu z exsikátoru. Počáteční hodnota, která se nebude lišit od naměřených hodnot, bude pro navážku o hmotnosti 250 g. Podle Archimedova zákona platí, že po přidání desikantu do exsikátoru bude objem vzduchu nahrazen právě objemem, který zaujímá desikant. Tudíž předpoklad je takový, že při přidání většího množství desikantu bude rychlost adsorpce nejen urychlena množstvím desikantu, ale také úbytkem vlhkého vzduchu, a do určité míry ovlivní výsledky měření [69].

Ukázkový postup bude uveden na síranu vápenatém, viz (3.9). Rozdílem objemů prázdného exsikátoru stanoveného z rovnice (3.1) a exsikátoru s 250 g navážkou se síranem vápenatým je vypočten počáteční objem vzduchu v exsikátoru (3.10). Nyní lze vypočítat úbytek vlhkého vzduchu pro navážku s 200 g síranu, čímž srovnáme navýšení objemu vzduchu, který nastal v důsledku odebrání 50 g z původní 250g navážky síranu, viz rovnice (3.11). Pokud se do exsikátoru vloží 200 g síranu vápenatého, objem vzduchu se přibližně zvýší o 0,7 % ve srovnání s hmotností 250 g. Zatímco pokud bude přidáno 50 g navážky oxidu vápenatého, pak dojde k navýšení objemu vzduchu přibližně o 3 %.

$$V_d = \frac{m_d}{\rho_d} \quad (3.9)$$

$$V_d = \frac{0,25}{2960} = 8,446 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Kde m_d je hmotnost navážky síranu vápenatého, ρ_d je hustota síranu vápenatého.

$$V_{vd} = (V_{vz} - V_{250g}) \quad (3.10)$$

$$V_{vd} = 2,35 - 0,0846 = 2,264 \text{ dm}^3$$

$$V_k = \frac{V_{vd} - V_o}{V_{vd}} = \frac{V_{vd} - \frac{m_d}{\rho_d}}{V_{vd}} \quad (3.11)$$

$$V_k = \frac{2,264 - \frac{0,05}{2960}}{2,264} = 0,992$$

Kde V_o je odebraný objem z počáteční navážky síranu vápenatého, V_k je úbytek vlhkého vzduchu v exsikátoru.

Po zjištění množství vytlačeného objemu vzduchu by bylo možné vkládat materiál o přesně stanoveném objemu do exsikátoru. Jak bylo uvedeno, kvůli časovým důvodům tato úprava nebyla realizována. Ve finále by však nemuselo dojít k výraznému ovlivnění závěrečného naměřeného výsledku, jelikož faktorů, které rychlost pohlčení množství vlhkosti v exsikátoru je více.

Tab. 4 Úbytek objemu vzduchu v exsikátoru po vložení desikantu.

Název desikantu	50 g	100 g	150 g	200 g	250 g
Síran vápenatý dihydrát	0,970	0,978	0,985	0,993	1
Oxid vápenatý	0,974	0,980	0,987	0,993	1

3.6 Stanovení rychlosti adsorpce silikagelu

Během experimentu byl použit modrý silikagel pro exsikátory od firmy Penta s velikostí granulí v rozmezí 3 mm až 8 mm. První část experimentu spočívá v regeneraci silikagelu. Silikagel rovnoměrně rozprostřený na hliníkové misce se vloží do sušárny Venticell 111, a to podle doporučení na teplotu 105 °C po dobu 24 hodin, aby byla zaručena nejlepší možná regenerace, viz obr. 21 a), b). Po vyjmutí ze sušárny se silikagel přesype do původní nádoby.

Bylo provedeno celkem pět měření. Při prvním měření se do kádinky naváží na laboratorní váze KERN KB 10000-1N 50 g silikagelu. Následně se celý objem z kádinky přesype do skleněného exsikátoru od firmy Verkon. Na horní síto se položí SHT4x Smart Gadget od firmy Sensirion. Relativní vlhkost je v daný moment v exsikátoru a laboratoři stejná do doby, než dojde k uzavření komory víkem. Ihned po uzavření začne silikagel adsorbovat vzdušnou vlhkost v ustáleném objemu vzduchu uzavřeného exsikátoru.

a)



b)



Obr. 21 a) Hliníková miska s rozprostřeným silikagelem v laboratorní sušárna Venticell 111 b) Laboratorní sušárna Venticell 111 nastavená na regenerační teplotu 105 °C.

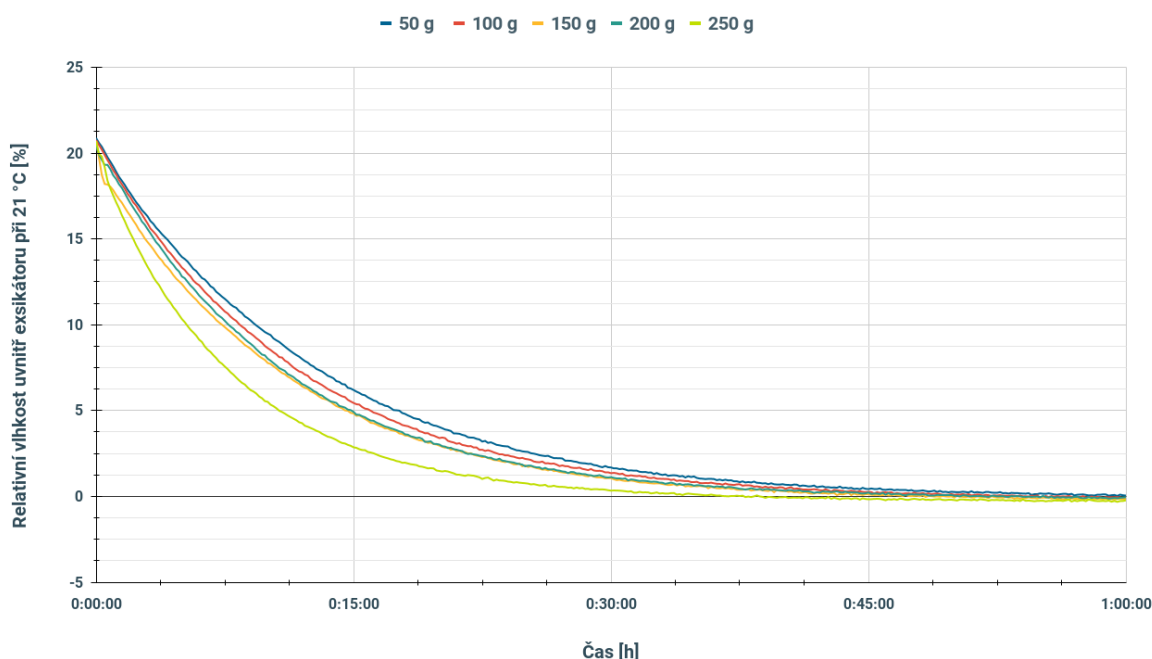
Průběh měření rychlosti pohlcení vlhkosti byl zaznamenán v rozmezí zhruba 4 hodin než došlo k výměně navážky. Předpoklad, že se jedná o desikant s rychlou adsorpcí, vycházel z obr. 14 b) z kapitoly 2.4. První měření bylo zahájeno dne 8. února 2023 navážkou 50 g silikagelu. Následující den 100 g atd. Během těchto prvních měření bylo zjištěno, že teplota laboratoře se měnila pouze minimálně, a to v rozmezí 20,0 °C až 21,5 °C. Zatímco relativní vlhkost v těchto zimních dnech klesala reálně pod 18 % RH. Tyto podmínky byly nevyhovující, proto bylo měření zopakováno během března. Dalším faktorem, kvůli němuž bylo měření opakováno, byl výpadek v záznamu, pokud data nebyla stažena do tří dnů, kvůli výpadku v ukládání paměti. Tento výpadek byl způsoben velkou kapacitní zátěží na zařízení, jelikož interval pro měření byl právě 10 s.

Výsledný graf je zaznamenán na obr. 22. Laboratorní experiment proběhl za stálé teploty okolo 21 °C. Uvažován byl standardní atmosférický tlak 101 325 Pa, počáteční vlhkost byla u všech navážek silikagelu měřena od 20,5 % RH. Relativní vlhkost 20,5 % RH odpovídá podle

ukázkového výpočtu z kapitoly 3.3 množství 8,8 mg vody v uzavřeném exsikátoru pouze s porcelánovou deskou a měřicím zařízením SHT4x o celkovém vnitřním objemu 2,350 dm³. Na základě proběhlého měření byla vytvořena tab. 5, která shrnuje a srovnává jednotlivé navážky. Oblastí zájmu je zjištění doby, kdy dojde k úplné adsorpci vlhkosti v exsikátoru.

Navážka o hmotnosti 150 g v realitě neměla maximální adsorbované množství vlhkosti 1,02 % RH/10 s. Po uzavření exsikátoru vlhkost začala výrazně klesat, jelikož vlhkost v okolí byla asi o 2 % RH menší, než bylo prvotně zaznamenáno. Jakmile se průběh ustálil, tak bylo v čase 2 min a 20 s po uzavření naměřena adsorpce 0,3 % RH/10 s. Jak je patrné z počátečních hodnot, záznam byl cíleně řazen od největší společné naměřené relativní vlhkosti silikagelu a bentonitového jílu. V některých dnech bylo měření problematické, takže se po dohodě s vedoucím silikagel znovu zregeneroval a provedlo se reparativní měření. U navážky s 200 g silikagelu byl naměřen téměř totožný trend rychlosti pohlcování vlhkosti. Nejzajímavější skok v rychlosti pohlcení veškeré vlhkosti byl zaznamenán u navážky o hmotnosti 250 g. Vlhkost pod 10 % RH klesla za 23 min a 10 s, což bylo způsobeno nesprávně naměřenou počáteční relativní vlhkostí, která v realitě odpovídala spíše 19 % RH než 20,5 % RH.

Průměrná rychlost byla vypočítána z rozdílu počáteční hodnoty relativní vlhkosti a koncové hodnoty (tedy 1 % RH) podělenou dobou, než došlo k poklesu pod 1 % RH. Čistě 0 % RH bylo problematické naměřit, docházelo zčásti ke zkreslení naměřených hodnot a též k nárůstu odchylky snímače vlhkosti. Průměrný nárůst rychlosti adsorpce po přidání 50 g silikagelu byl okolo 0,5 % RH/min pro navážky v rozmezí 50 g až 150 g. Pro navážky v rozmezí 200 g až 250 g by bylo vhodné provést experiment ještě jednou.



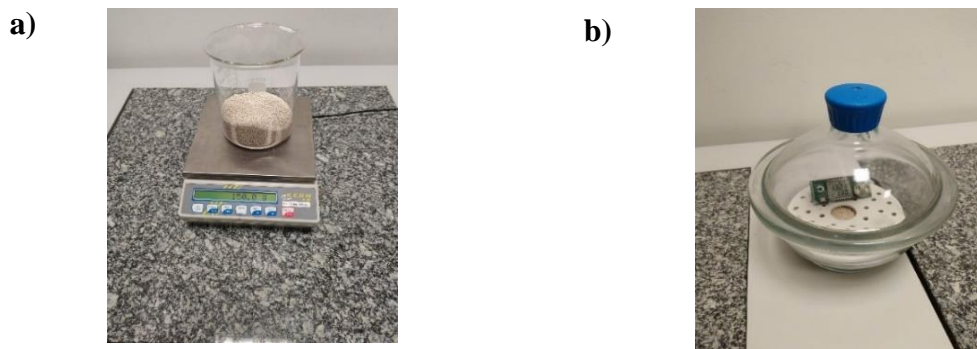
Obr. 22 Rychlost adsorpce vlhkosti silikagelu v uzavřeném exsikátoru při 21 °C.

Tab. 5 Vlastnosti silikagelu při experimentálním měření.

Hmotnost navážky [g]	Max adsorbovaná vlhkost [% RH/10 s]	Adsorbovaná vlhkost za 10 min [% RH/10 min]	Čas potřebný k vysušení pod 1 % RH [min]	Průměrná rychlost adsorpce [% RH/min]
50	0,31	11,40	36,17	0,55
100	0,32	12,13	33,50	0,59
150	0,38	12,93	30,33	0,65
200	0,52	12,54	30,83	0,63
250	0,80	15,19	23,17	0,85

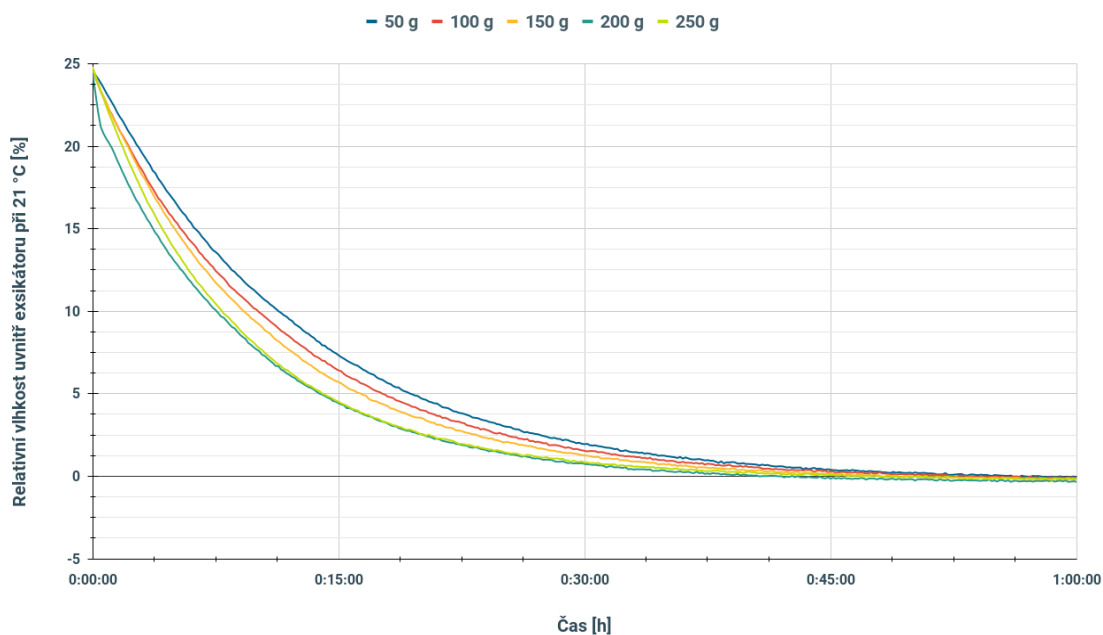
3.7 Stanovení rychlosti adsorpce molekulárního síta

Další zkoumanou látkou bylo molekulární síto 4A. Jedná se o cenově nejdražší používaný desikant. Regenerace probíhala v laboratorní komorové peci LAC L 15/12, zde byl nastaven program s hodinovým náběhem na teplotu 240 °C. Na této teplotě rozprostřené granule molekulového síta na hliníkové misce setrvaly po dobu 8 h. Po vychladnutí bylo možné zahájit měření. Postup měření je uvedený v kapitole 3.4. Fotografie zachycující vážení síta a uzavřený exsikátor jsou na obr. 23.



Obr. 23 a) Vážení navážky molekulárního síta o hmotnosti 150 g na váze KERN KB 10000-1N b) Uzavřený exsikátor s navážkou molekulárního síta.

Relativní vlhkost ovzduší při zahájení experimentu byla vyšší než u silikagelu, proto naměřené výsledky budou srovnány se síranem vápenatým. Při 24,5 % RH, standardním atmosférickém tlaku a teplotě 21 °C se v prázdném exsikátoru nacházelo 10,5 mg vody. Graf popisující rychlost pohlcování vlhkosti molekulárním sítem je zobrazen na obr. 24. Srovnání rychlosti adsorpce jednotlivých navážek je zobrazeno v tab. 6. Maximální adsorbovaná vlhkost za 10 s byla naměřena u 250 g navážky. Při navážce o hmotnosti 200 g opět došlo rychlejšímu poklesu vlhkosti v důsledku reálně nižší skutečné vlhkosti v ovzduší. K ustálení tohoto výkyvu došlo po 30 s od uzavření exsikátoru, reálně tedy bylo pohlceno 0,41 % RH za dobu 10 s. Z naměřených dat doby potřebné k vysušení lze vyvodit, že při zvýšení množství použitého síta o 50 g došlo k urychlení celkové doby asi o 2 min. U zmíněných 200 g by bylo měření vhodné zopakovat, ale lze předpokládat, že by došlo k pohlcení pod 1 % RH do 30 min od uzavření exsikátoru. U prvních tří navážek 50 g až 150 g došlo k pravidelnému nárůstu adsorbované vlhkosti o 1 % RH během prvních 10 min. Předpoklad, že se jedná o účinný desikant, byl potvrzen.



Obr. 24 Rychlost adsorpce vlhkosti molekulárního síta v uzavřeném exsikátoru při 21 °C.

Tab. 6 Vlastnosti molekulárního síta při experimentálním měření.

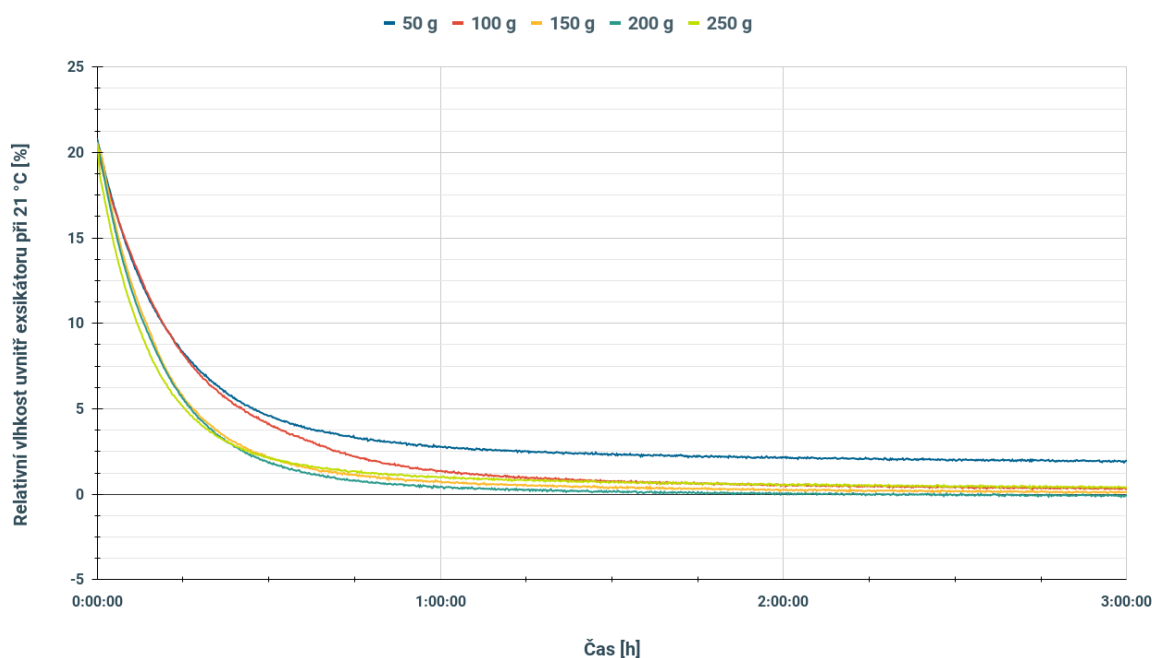
Hmotnost navážky [g]	Max. adsorbovaná vlhkost [% RH/10 s]	Adsorbovaná vlhkost za 10 min [% RH/10 min]	Čas potřebný k vysušení pod 1 % RH [min]	Průměrná rychlost adsorpce [% RH/min]
50	0,34	13,51	37,33	0,63
100	0,43	14,52	34,50	0,68
150	0,43	15,22	32,17	0,73
200	0,41	16,76	27,50	0,85
250	0,51	16,90	28,83	0,83

3.8 Stanovení rychlosti adsorpce bentonitového jílu

Bentonitový jíl byl cenově nejlevnější desikant z používaných desikantů. Hlavní motivace pro použití vycházela z obr. 13, kdy se jíl jevil svou adsorbční schopností lepší variantou než silikagel při nižší RH, jelikož však zdroj neuváděl přesné informace o použitém typu bentonitového jílu, byl použit běžně dostupný bentonitový jíl s názvem MVDE Bentonite. Regenerační teplota jílu byla stejná jako u silikagelu tedy 105 °C.

Měření bylo zahájeno při přibližně 20,5 % RH, aby bylo možné umožnit srovnání se silikagelem z kapitoly 3.3. Výsledný graf popisující rychlost adsorpce bentonitového jílu je zobrazen na obr. 25. V tomto případě se nejednalo o granulový desikant byla vytvořena miska z alobalu o velikosti spodní části exsikátoru, do které byla navážka o dané hmotnosti vsypána.

Rozpoložení jednotlivých adsorpčních izoterm v tomto případě je poněkud odlišné. Počítalo se zjistit, že 50g navážka byla nedostatečná a nedokázala ani po 23 h snížit RH pod 1 % RH. Zaznamenaný interval zobrazuje pokles vlhkosti během 3 h od uzavření exsikátoru víkem. Pro zmíněnou navážku 50 g docházelo pouze k oscilaci hodnot okolo 1 % RH až 2 % RH. Navážka o hmotnosti 200 g dosáhla nejrychleji adsorpce vlhkosti pod 1 % RH za dobu 1 h a 13 minut. Během prvních 10 minut nebylo u žádné navážky jílu pohlceno více vlhkosti než u jakékoliv z předešlých navážek silikagelu, viz tab. 7.



Obr. 25 Rychlost adsorpce vlhkosti bentonitového jílu v uzavřeném exsikátoru při 21 °C.

Podle obr. 25 si lze také všimnout, že pokles během prvních 30 min byl u navážek v rozmezí 150 g až 250 g obdobný a jen nepatrně se lišil. Plocha, která je schopna efektivně pojmout přebytečnou vlhkost, je na nejvrchnější ploše desikantu, která se při větší navážce zvětšovala v důsledku tvaru exsikátoru. Celkovou rychlost adsorpce tak ovlivnilo i rozložení nasyceného jílu, kdy byla vrchní plocha vždy zarovnána lžičkou, aby nedocházelo ke vzniku dalších dutin, které by zkreslily naměřené hodnoty. Největší průměrné rychlosti adsorpce bylo dosaženo u 200 g navážky, což mohlo být zapříčiněno právě nedostatečně zarovnaným povrchem oproti předešlým navážkám. Narušení povrchu bylo pravděpodobně způsobeno při vkládání misky s navážkou do spodní části exsikátoru. Pro učinění lepšího závěru by bylo vhodné provést více měření pro navážky o stejné hmotnosti, kde došlo k výrazným odlišnostem. Bylo by potřeba jíl při opakovaném používání opět regenerovat, což z časových důvodů nebylo možné provést.

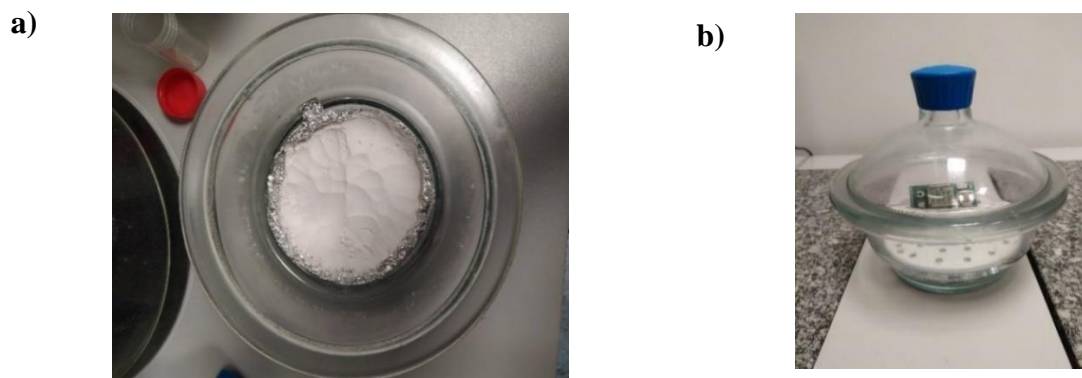
Tab. 7 Vlastnosti bentonitového jílu při experimentálním měření.

Hmotnost navážky [g]	Max adsorbovaná vlhkost [% RH/10 s]	Adsorbovaná vlhkost za 10 min [% RH/10 min]	Čas potřebný k vysušení pod 1 % RH [min]	Průměrná rychlost adsorpce [% RH/min]
50	0,31	9,94	180,00	0,11
100	0,34	9,53	72,67	0,27
150	0,39	11,71	48,83	0,40
200	0,33	11,73	40,17	0,48
250	0,35	12,95	57,67	0,34

3.9 Rychlosti adsorpce síranu vápenatého

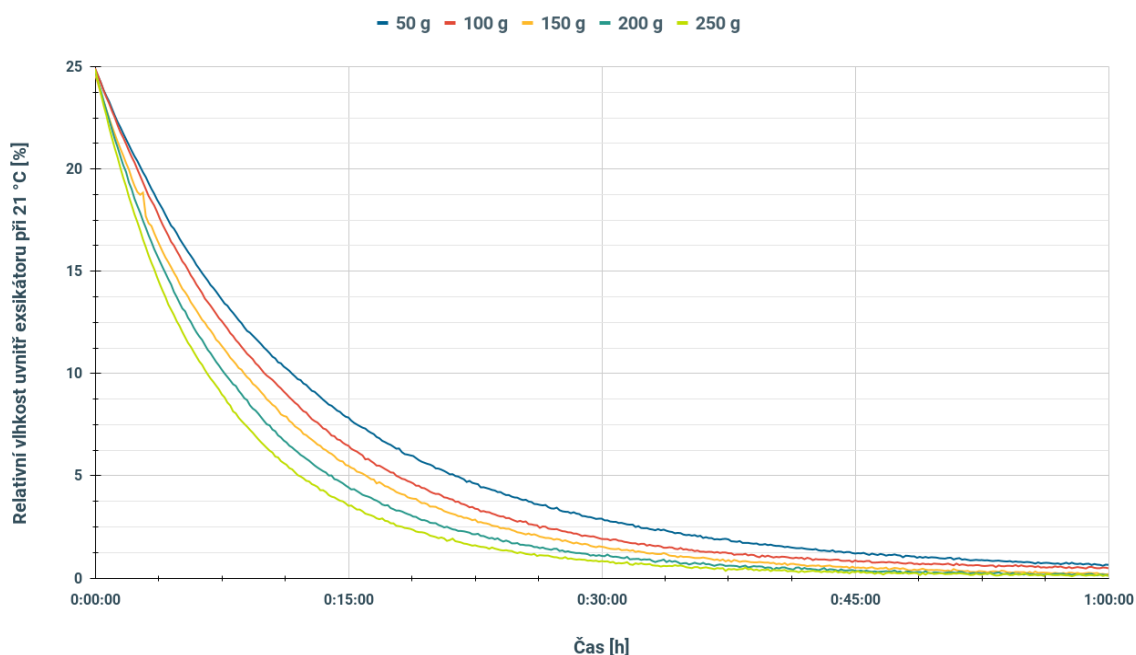
V případě práškové formy desikantu byla navážka vsypána do misky z alobalu. Navyšující navážky byly rovnoměrně rozprostřeny na předchozí. Síran vápenatý s min. 98 % čistotou byl zakoupen od firmy P-lab. Jelikož se jedná o chemikálii, tak při manipulaci bylo z preventivních

důvodů pracováno s brýlemi, ochrannými rukavicemi a rouškou. Regenerace proběhla v laboratorní komorové peci LAC L 15/12. Náběh na regenerační teplotu 195 °C trval 1 h, doba setrvání na této teplotě byla stanovena na 8 h. Na obr. 26 a) lze vidět zarovnanou horní plochu nové navážky síranu. Uzavřený exsikátor spolu s měřicím přístrojem SHT4x lze vidět na obr. 26 b). Naměření hodnoty byly zaznamenávány přibližně při 24,5 % RH a teplotě 21 °C, kdy se v prázdném exsikátoru nacházelo 10,5 mg vody.



Obr. 26 a) Navážka síranu vápenatého uvnitř exsikátoru b) Uzavřený exsikátor s navážkou síranu vápenatého.

Maximální adsorbovaná vlhkost během měřeného desetisekundového intervalu byla podle předpokladu naměřena u 250 g navážky. U navážky s hmotností 150 g došlo v 3. minutě k naměření chybné hodnoty 1,15 % RH. Správná hodnota maximální adsorbované vlhkosti byla naměřena v prvních 20 s, a to 0,49 %RH/10 s. Adsorbovaná vlhkost během prvních 10 min odpovídá po navýšení 50g navážky nárůstu asi o 1,2 % RH/10 min. I když se opět pracovalo se sypkou formou jako v případě bentonitového jílu, výsledky zde nebyly tolik ovlivněny špatně zarovnanou horní plochou. Na obr. 27 lze pozorovat adsorpční izotermy jednotlivých navážek síranu vápenatého.



Obr. 27 Rychlost adsorpce vlhkosti síranu vápenatého v uzavřeném exsikátoru při 21 °C.

Při srovnání s molekulárním sítem, které bylo též měřeno při počáteční relativní vlhkosti 24,5 % RH bylo dosaženo poměrně překvapivých výsledků. Síran vápenatý při 200 g navážce byl schopný, co do adsorbované vlhkosti v prvních 10 minutách překonat síto o hmotnosti 250 g. Síran vápenatý o hmotnosti 200 g pojal 17,1 % RH/10 min, zatímco molekulární síto adsorbovalo 16,8 % RH/10 min. V průměrně rychlosti adsorpce byl síran horší než síto, jen navážka s 250 g síranu dosáhla úplně stejné průměrné rychlosti adsorpce, a to 0,85 % RH/min, jako 200 g, viz tab. 8. Z toho lze vyvodit, že síran je schopný pojmout více vlhkosti při vyšších hodnotách RH, avšak po snížení vlhkosti prostředí znatelně zpomalí. Z naměřených hodnot ke zlomu došlo při snížení RH pod 6 % RH, kdy síto bylo schopnou pojmout v těchto podmínkách desetiny procenta RH/10 s, zatímco síran už jen setiny procenta RH/10 s. Další faktor, který je potřeba zohlednit, že síran byl zakoupen zcela nový a byl zregenerován poprvé, zatímco síto bylo už v laboratoři nějakou dobu používáno.

Tab. 8 Vlastnosti síranu vápenatého při experimentálním měření.

Hmotnost navážky [g]	Max adsorbovaná vlhkost [% RH/10 s]	Adsorbovaná vlhkost za 10 min [% RH/10 min]	Čas potřebný k vysušení pod 1 % RH [min]	Průměrná rychlost adsorpce [% RH/min]
50	0,38	13,62	48,67	0,49
100	0,38	14,90	41,17	0,58
150	0,49	15,69	35,50	0,67
200	0,52	17,15	31,17	0,76
250	0,58	18,38	28,00	0,85

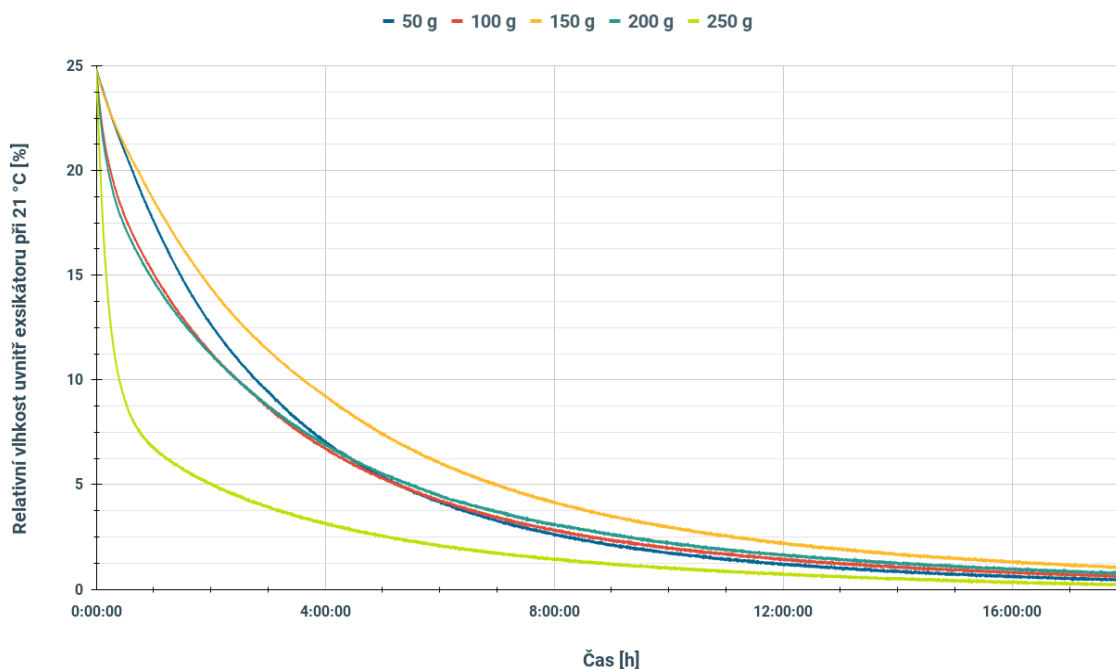
3.10 Stanovení rychlosti adsorpce oxidu vápenatého

Poslední měřenou látkou byl práškový oxid vápenatý s minimálně 96 % čistotou byl zakoupen od firmy P-lab. Manipulace s tímto desikantem opět probíhala obdobně jak v příkladu se síranem vápenatým. Regenerace probíhala v laboratorní komorové peci LAC L 15/12 s náběhem na teplotu 1000 °C za 1 h a 10 min. Po dosažení této teploty byl desikant ponechán v peci po dobu 2 hodin. Následující den, kdy došlo k vychladnutí regenerované navážky byl desikant přesypán do uzavíratelné nádoby.

Podle předešlé rešerše se mělo jednat o nejpomalejší desikant, viz kapitola 2.4 obr. 14 b. Tento předpoklad byl potvrzen. Během prvních měření provedených po regeneraci oxidu vápenatého bylo zjištěno, že schopnost adsorbovat vzdušnou vlhkost se rapidně zhoršila. Například první navážka o hmotnosti 50 g byla schopna snížit relativní vlhkost uvnitř exsikátoru pod 10 % RH až za 20 h. Po týdnu se stav zlepšil a u navážky s 250 g oxidu vápenatého se povedlo snížit relativní vlhkost pod 10 % RH za přibližně 3 h. Navážky v rozmezí 100 g až 200 g se nepovedl zaznamenat korektně celkový průběh měření, jelikož zařízení SHT4x Smart Gadget po 3 dnech průběžně promázávalo data a celkový průběh adsorbce vlhkosti se nepovedlo korektně zaznamenat. Po 14 dnech došlo k ustálení adsorbčních izoterm oxidu vápenatého, které byly následně použity na vytvoření obr. 28. Zhoršení rychlosti adsorbce oxidu vápenatého bylo pravděpodobně způsobeno regenerací na 1000 °C.

Celkový interval adsorpce vlhkosti oxidem vápenatý zobrazuje pokles vlhkosti během 18 h od uzavření víka na obr. 28. Srovnání rychlosti adsorpce jednotlivých navážek je popsáno v tab. 9. Nejpomalejší rychlost adsorpce byla naměřena u navážky o hmotnosti 150 g. Měření s navážkou o hmotnosti 150 g probíhalo po 14 dnech od regenerace, pokles pod 1 % RH byl naměřen až po 17 h. Nejrychlejší adsorpce byla naměřena u navážky s hmotností 250 g, snížení vlhkosti pod 1 % RH bylo dosaženo po 9 h a 49 min. Měření s 250 g oxidu vápenatého bylo

provedeno 23 dní po proběhlé regeneraci, během této doby byl desikant uskladněn ve vzduchotěsné nádobě, která byla otevřena pouze při provádění opakovaných měření. Navážka oxidu vápenatého o hmotnosti 200 g byla schopna pojmout za 10 min pouze 4,23 % RH, zatímco navážka s 250 g 9,48 % RH. Obr. 28 dokazuje, že vhodnost tohoto desikantu se pro běžné laboratorní úkony nehodí z důvodu pomalé schopnosti adsorbovat vzdušnou vlhkost, průměrná rychlost adsorpce se u všech navážek pohybovala okolo 0,03 % RH/min.



Obr. 28 Rychlost adsorpce vlhkosti oxidu vápenatého v uzavřeném exsikátoru při 21 °C.

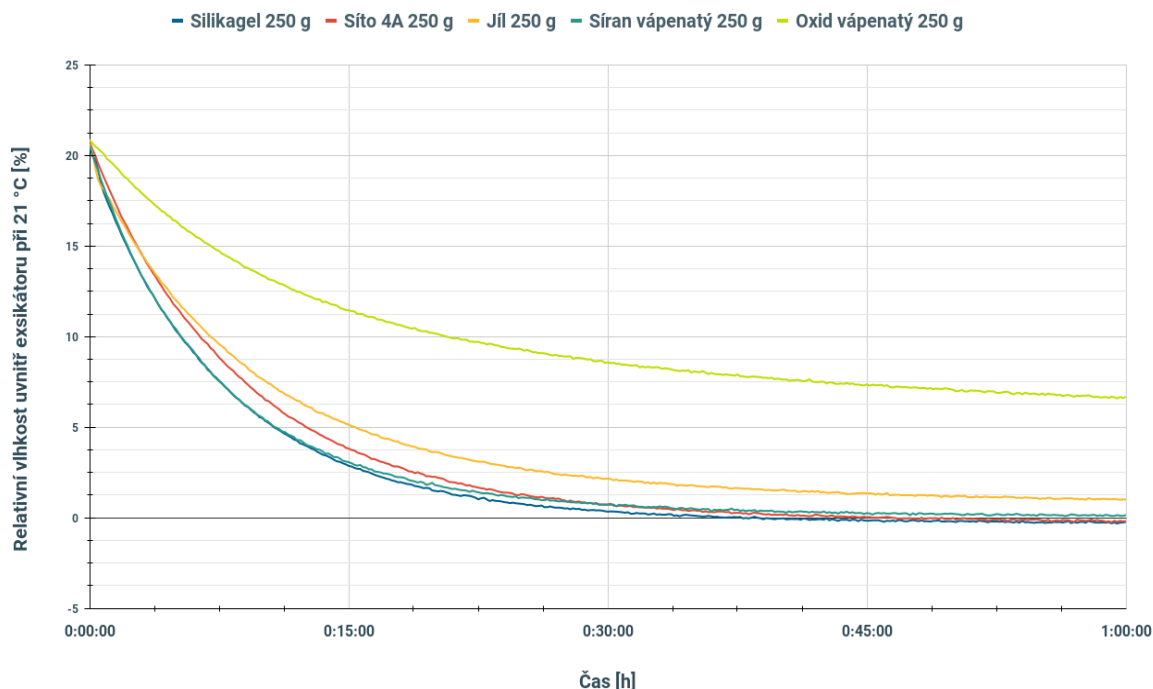
Tab. 9 Vlastnosti oxidu vápenatého při experimentálním měření.

Hmotnost navážky [g]	Max adsorbovaná vlhkost [% RH/10 s]	Adsorbovaná vlhkost za 10 minut [% RH/10 min]	Čas potřebný k vysušení pod 1 % RH [min]	Průměrná rychlost adsorpce [% RH/min]
50	0,14	1,47	767,70	0,03
100	0,15	3,79	856,00	0,03
150	0,14	1,55	1029,30	0,02
200	0,17	4,23	922,20	0,03
250	0,27	9,48	589,50	0,04

3.11 Srovnání adsorpčních rychlostí jednotlivých desikantů pro navážku o hmotnosti 250 g

Pro předešlá měření byl vytvořen obr. 29, který srovnává adsorpční rychlosti použitých desikačních látek pro navážku o hmotnosti 250 g. Kvůli nízkým teplotám v zimních měsících bylo měření se silikagelem bentonitovým jílem prováděno při 20,5 % RH, které nemohly být regulovány. Zatímco molekulární síto, síran vápenatý a oxid vápenatý, díky vhodným podmínkám

mohly být srovnány mezi sebou od počáteční vlhkosti 24,5 % RH. Pro srovnání rychlostí adsorpce u všech desikačních látek pro navážku o hmotnosti 250 g bude uvažována počáteční vlhkost 20,5 % RH.



Obr. 29 Rychlost adsorpce vlhkosti desikantů v uzavřeném exsikátoru při 21 °C.

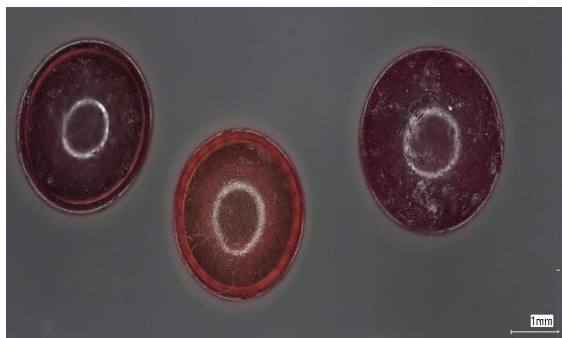
Desikantem, který byl schopen při hmotnosti navážky 250 g pojmout nejvíce vlhkosti během prvních 10 minut byl silikagel, jednalo se o 15,2 % RH/10 min. Síran vápenatý s adsorbovanou vlhkostí 15 % RH/10 min byl pomalejší viz tab. 10. Bentonitový jíl s průměrnou rychlostí adsorpce 0,34 % RH/min měl poloviční průměrnou rychlost adsorpce oproti silikagelu, molekulárnímu sítu typu 4A a síranu vápenatému. Silikagel při 21 °C byl velice účinný, ale ztratil přibližně 60 % své adsorpční kapacity oproti molekulárnímu sítu, což v případě, že se jedná o krátkodobé uchování zkoumaného materiálu citlivého na vlhkost lze tolerovat. Nejhuře dopadl oxid vápenatý, který se svou průměrnou rychlostí adsorpce 0,03 % RH/min je přibližně 11,3krát pomalejší desikant než bentonitový jíl. Bentonitový jíl je, však stále 2,2krát pomalejší než síran vápenatý.

Tab. 10 Porovnání vlastností desikantů při experimentálním měření.

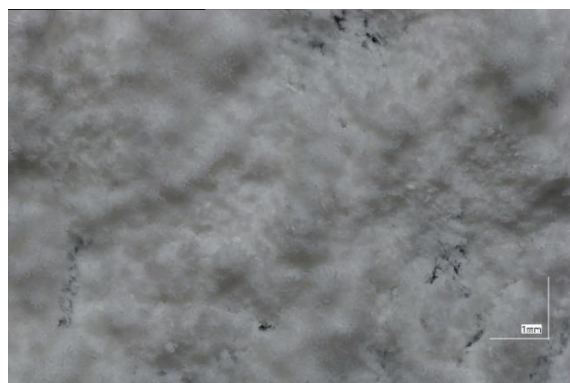
Název desikantu	Max adsorbovaná vlhkost [% RH/10 s]	Adsorbovaná vlhkost za 10 min [% RH/10 min]	Čas potřebný k vysušení pod 1 %RH [min]	Průměrná rychlost adsorpce [% RH/min]
Silikagel	0,80	15,19	23,17	0,85
Sieve 4A	0,44	14,07	27,33	0,72
Clay	0,35	12,95	57,67	0,34
CaSO4	0,51	15,02	26,17	0,75
CaO	0,26	7,51	585,67	0,03

3.12 Pořízení snímků struktury použitých desikantů mikroskopem VHX-7000

Pro pořízení snímků struktury desikantů byl využit mikroskop VHX-7000 series, který se nachází v laboratoři čistého prostředí 416 b. S mikroskopem bylo manipulováno za přítomnosti vedoucího. Vybrané vzorky z použitých desikantů byly nasnímány pomocí objektivu se středním zvětšením do hlavy VHX-E100: 100x až 500x. Na obr. 30, 31 a 32 lze vidět pořízené snímky. Na obr. 30 a) lze vidět 3 zrna silikagelu o průměru zleva 3 mm, 2,6 mm a 3,1 mm. Obr. 30 b) ukazuje celkem 12 zrn molekulárního síta 4A, přičemž největší zrno má průměr 3,3 mm a nejmenší má průměr 1,7 mm.



Obr. 30 a) Silikagel 12,2 x 5,5 mm b) Molekulární síto 10,5 x 7,4 mm.



Obr. 31 a) Bentonitový jíl 5,7 x 7 mm. b) Síran vápenatý 9,7 x 6,1 mm.



Obr. 32 Oxid vápenatý 5,5 x 3,5 mm.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala schopností různých desikačních látek adsorbovat vzdušnou vlhkost uvnitř uzavřeného exsikátoru. Hlavním cílem této práce bylo stanovit rychlosti pohlcování vlhkosti pro různé desikační látky. V rámci experimentů byly testovány tyto desikační látky silikagel, molekulární síto, bentonitový jíl, síran vápenatý a oxid vápenatý. Navíc byl zkoumán vliv hmotnosti navážky na rychlost pohlcování vlhkosti. Získané výsledky dokázaly, že rychlost pohlcování vlhkosti se liší v závislosti na použité desikační látce a její hmotnosti.

Úvodní část práce byla věnována tuhým palivům a stanovení jejich vlastností. Stanovení obsahu vlhkosti v tuhých palivech je důležité pro stanovení kvality tuhých paliv. V práci jsou shrnuty nejčastěji používané metody pro stanovení vlhkosti tuhých paliv. Práce obsahuje ucelený přehled exsikátorů, které se v praxi běžně používají. Následující kapitola představující desikační látky, kde jsou mimo jiné popsány desikanty, které byly následně využity pro experimentální měření. Kapitola uzavírá srovnání adsorpčních izoterem jednotlivých desikačních látek v závislosti na relativní vlhkosti, teplotě a čase.

V závěrečné části práce metody a měření je popsána využívaná laboratorní technika. Na provedení experimentu byl použit exsikátor s plastovým hmatníkem vyrobený z borosilikátového skla. Kvůli omezenému vnitřnímu prostoru bylo použito zařízení SHT4x se senzorem pro měření relativní vlhkosti SHT40. Senzor SHT40 měří relativní vlhkost na základě detekce změn elektrické kapacity v polymerní vrstvě, která je citlivá na vlhkost. Nicméně, při nízkých hodnotách relativní vlhkosti je důležité vzít v úvahu obvyklou odchylku senzoru SHT40, která se pohybuje v rozmezí $\pm 2,5$ % RH. Podrobnější popis zařízení je rozebrán v kapitole 3.1.5. Zařízení SHT4x bylo vzhledem k možnostem vhodnou a ekonomicky dostupnou variantou, pomocí které bylo možné experiment uskutečnit.

Rychlost pohlcování vlhkosti v laboratorním exsikátoru byla experimentálně měřena u silikagelu, molekulárního síta, bentonitového jílu, síranu vápenatého a oxidu vápenatého. Všechny zkoumané desikanty byly před měřením regenerovány. Pro každou látku byl dodržen identický postup popsáný v kapitole 3.4, aby byla naměřená data, co nejpřesnější a mohla se mezi sebou relevantně porovnávat. Na základě provedených experimentů byl sestaven graf závislosti adsorbované vlhkosti v uzavřeném exsikátoru na čase pro každou testovanou desikační látku. Celkem bylo provedeno pět měření pro každý, přičemž hmotnost navážky byla postupně navyšována o 50 g. První měření adsorpce vlhkosti začínalo při hmotnosti navážky 50 g a poslední měření končilo při hmotnosti navážky 250 g.

Všechny použité desikanty byly vyneseny do společného grafu pro navážku o hmotnosti 250 g. Použité desikanty mohly být srovnávány pouze v případě, že byla počáteční vlhkost konstantní. Vzhledem k tomu, že silikagel s bentonitovým jílem byly měřeny ve dnech, kdy relativní vlhkost v laboratoři měla maximálně hodnotu 21 % RH, byl začátek měření pro všechny desikanty zvolen při 20,5 % RH. Na základě provedeného experimentu s uvažovanou hmotností navážky 250 g lze vyvodit následující závěry. Nejrychlejším desikantem schopným adsorbovat vzdušnou vlhkost byl silikagel, který dosáhl adsorpce za 23 minut. Druhým nejrychlejším desikantem schopným pohltit vlhkost byl síran vápenatý, který potřeboval 26 minut. Molekulární síto se překvapivě umístilo na třetím místě, adsorpce trvala 27 minut. Oxid vápenatý adsorboval vzdušnou vlhkost po dobu 9 hodin a 45 minut. Z výsledků je patrné, že se oxid vápenatý se pro laboratorní úkony nehodí.

Nejvhodnějšími desikanty z hlediska manipulace byl zvolen silikagel a molekulární síto, které umožňovaly efektivní a pohodlnou manipulaci. Síran vápenatý a oxid vápenatý nejsou pro lidské zdraví zcela nezávadné a při manipulaci vyžadují dodržení příslušných pokynů bezpečného zacházení. Nejlevnější používaný desikant byl bentonitový jíl, nicméně z hlediska účinnosti se vyplatí použít o něco dražší silikagel. Vzhledem k tomu, že v této práci nebyla

podrobně zkoumána životnost použitých desikačních látek v průběhu opakovaných regeneračních cyklů, je vhodné v budoucích studiích věnovat pozornost právě tomuto aspektu. Důkladné zhodnocení životnosti by přineslo další užitečné informace.

Závěrem lze říct, že pro dosažení přesnějších výsledků by bylo vhodné zajistit u všech proběhlých měření stejné množství vlhkosti v ovzduší. Použité zařízení SHT4x by bylo možné nahradit přesnějším zařízením, jelikož se jeho přesnost při nízkých hodnotách relativní vlhkosti zhoršovala. Výsledky provedených měření poskytují praktické poznatky o schopnostech adsorpce různých desikantů. Z experimentu vyplývá, že při stanovování hrubého rozboru je klíčové dodržet dobu, po kterou je zkoumaný vzorek umístěn v exsikátoru s odpovídajícím desikantem. Tato správná doba je zásadní pro dosažení přesných výsledků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AUGUSTA, Pavel, Soňa KRÍTKOVÁ a Marta ĎURIŠOVÁ. *Velká kniha o energii*. Praha: L.A. Consulting Agency, 2001, 583 s., fotogr. ISBN 80-238-6578-1.
- [2] MIŠKOVSKÝ, Miroslav. *Paliva, úprava paliv a spalování*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971, 233 s.
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání čtvrté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2022, 141 stran : ilustrace, grafy. ISBN 978-80-214-6093-5.
- [4] Coal explained. In: *Eia* [online]. 2022 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/>
- [5] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-86534-06-5.
- [6] VITÁZEK, Ivan a Božena VITÁZKOVÁ. SELECTED PHYSICAL PROPERTIES OF SOLID BIOFUELS. *Journal on Processing and Energy in Agriculture* [online]. 165-168 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1821-4487/2012/1821-44871204165V.pdf?fbclid=IwAR1VRLBTcxZATjYyrVyrK80aCfLLBpv9NpC-QonLv63qN6jdBzybXH6UWns>
- [7] LYČKA, Zdeněk. Výměna kotlů - specifické vlastnosti pevných paliv. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2019 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/19513-vymena-kotlu-specificke-vlastnosti-pevných-paliv>
- [8] OCHRANA, Ladislav a Jiří KUBÍČEK. LISÝ MARTIN. *Energie z biomasy: Sborník příspěvků ze semináře*. 1. vyd. Brno: VUT FSI, 2003, 136 s. ISBN 8021425431.
- [9] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1) aneb palivo, tvorba znečišťujících látek a spalování jako vztah muže a ženy. In: *Tzbinfo* [online]. VŠB TU Ostrava, 2012 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [10] Ash. In: *Energy Education* [online]. University of Calgary [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Ash?fbclid=IwAR1hgZQxqX_uV2NdzUpky_sC68dUz5Gb-R8667KuDe2z_qD9QwA2nVBts1M
- [11] KLEČKOVÁ, Zuzana. *Pece a energetické hospodářství: studijní opora* [online]. První. VŠB Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2023-01-23]. ISBN 978-80-248-3371-2. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/23_Pece_a_energeticke_hospodarstvi/Kleckova_Pece_a_energeticke_hospodarstvi.pdf
- [12] ČSN EN ISO 18125. *Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

- [13] ENERGIE Z BIOMASY BRNO, Česko 2005) a Marek BALÁŠ. *Energie z biomasy IV: sborník příspěvků ze semináře*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005, 144 s. : il. ISBN 80-214-3067-2.
- [14] BALÁŠ, Marek a Jiří MOSKALÍK. *Měření vlhkosti paliv. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X*. VUT v Brně. ISSN 978-80-214-4027-2.
- [15] STOLL, Michael. How does a capacitive moisture measurement work?. In: *ACO* [online]. Wutöschingen, 2017 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: https://www.acoweb.de/en/how-does-a-capacitive-moisture-sensor-work?utm_source=ekotechnikacom&utm_medium=article&utm_campaign=ekotechnikacom
- [16] ČSN EN ISO 18134-1. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 1: Celková voda - Referenční metoda*. ČSN EN ISO 18134-: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [17] ČSN EN ISO 18134-2. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 2: Celková voda - Zjednodušená metoda*. Druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [18] ČSN EN ISO 18134-3. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 3: Obsah vody v analytickém vzorku pro obecný rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [19] FETZER, W. R. Determination of Moisture by Distillation. *Analytical Chemistry*. American Chemical Society, 1951, **23**(8), 1062-1069. ISSN 0003-2700. Dostupné z: doi:10.1021/ac60056a004
- [20] Azeotropic distillation (Dean-Stark). In: *Chemistry Online* [online]. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.chemistry-online.com/lab/azeotropic-distillation/>
- [21] CIBULKA, Jaroslav a Vladimír BAŠUS. *Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 924 s., [4] s. barev. obr. příl. : il.
- [22] ČSN EN 13183-2. *Vlhkost vzorku řeziva - Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou*. 01.10.2002. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [23] *Novel Wood Resistance Measurement Method Reducing the Initial Transient Instabilities Arising in DC Methods Due to Polarization Effects* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: doi:10.3390/electronics8111253
- [24] ČSN EN 13183-3. *Vlhkost vzorku řeziva - Část 3: Odhad kapacitní metodou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [25] *Conrad* [online]. Hirschau [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/>
- [26] Karl Fischer Titration: easy principle, 2 types, advantages, limitations. In: *Chemistry Notes* [online]. [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: https://chemistnotes.com/analytical_chemistry/karl-fischer-titration-principle/

- [27] Karl Fischer Coulometric Titration Explained and Illustrated. In: *Machinery Lubrication* [online]. Noria Corporation [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/594/karl-fischer-coulometric-titration>
- [28] What Is NIR Spectroscopy?: How It Works, Benefits & Applications. In: *Tec5USA* [online]. [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://www.tec5usa.com/nir-spectroscopy/>
- [29] SEELY, Oliver. Proper Use of a Desiccator. In: *Chemistry LibreTexts* [online]. California, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Demos_Techniques_and_Experiments/General_Lab_Techniques/Proper_Use_of_a_Desiccator
- [30] Desiccator: Vacuum Desiccator. In: *Cleatech Scientific* [online]. [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://www.cleatech.com/desiccator/>
- [31] WAKELING, Lucy. A simple guide to desiccators. In: *The Laboratory People* [online]. Cambridge [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://camblab.info/a-simple-guide-to-desiccators/>
- [32] Glass Desiccator. In: *HaiOu Saintifik* [online]. Kinrara Industrial Park [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://haiousaintifik.com/product/desiccator/>
- [33] How borosilicate glass continues to fuel science and invention after 125 years. In: *Glassonweb* [online]. Krea Ltd [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://www.glassonweb.com/news/how-borosilicate-glass-continues-fuel-science-and-invention-after-125-years>
- [34] DESICCATOR: Definition, Use, Function and Price. In: *ALPHAPEDIA* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.alphapedia.net/desiccator/>
- [35] Exsikátor s plastovým hmatníkem dle normy ČSN, SIMAX. In: *Verkon* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/exsikator-s-plastovym-hmatnikem-dle-normy-csn-simax/?highlight=Exsik%C3%A1tor+s+plastov%C3%BDm+hmatn%C3%ADkem+dle+normy+%C4%8CSN%2C+SIMAX>
- [36] Desiccator Selection Guide: Bel-Art Secador Desiccant Types. In: *Terra Universal - Cleanrooms, Pass-Throughs, Hoods, Desiccators, Gloveboxes* [online]. [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://www.terrauniversal.com/blog/Desiccator-Selection-Guide-Bel-Art-Secador-Desiccant-Types/>
- [37] DRY-KEEPER™ DESICCATOR CABINETS, ELECTRIC. In: *Chemglass* [online]. [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://chemglass.com/dry-keeper-desiccator-cabinets-electric>
- [38] What Is a Desiccant? Definition and Examples. In: *Science Notes and Projects* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://sciencenotes.org/what-is-a-desiccant-definition-and-examples/?fbclid=IwAR3uY4Ip8a_YPSKKro8kss2YBrrCrjPiTOfi2A17b0uImxTYPFODqkfrKpw

- [39] ARTIOLI, Y. Adsorption. In: *Encyclopedia of Ecology* [online]. Elsevier, 2008, s. 60-65 [cit. 2023-05-25]. ISBN 9780080454054. Dostupné z: doi:10.1016/B978-008045405-4.00252-4
- [40] Adsorption vs Absorption - Differences and Examples. In: *Science Notes and Projects* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://sciencenotes.org/adsorption-vs-absorption-differences-and-examples/>
- [41] Absorption (chemistry). In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_\(chemistry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_(chemistry))
- [42] CEVALLOS, Oscar R. Adsorption Characteristics of Water and Silica Gel System for Desalination Cycle. *KAUST Research Repository* [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: doi:10.25781/KAUST-B72K8
- [43] FAQ. In: *Silica Gel Direct* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.silicageldirect.com.au/faq/#:~:text=Desiccant%20is%20a%20hydrating%20agent,occurs%20in%20nature%20as%20sand.>
- [44] Desiccant Types. In: *SorbentSystems* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: https://www.sorbentsystems.com/desiccants_types.html?fbclid=IwAR3pU5JgcjgtS6liKi4N8tLEKSc9A48yT1a6M7Z1suNNVAnKy6OKgKhrzcY
- [45] CHANDRADHAS, Susheel. How To Dry Silica Gel. In: *Beyondphototips* [online]. [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.beyondphototips.com/recharge-silica-gel-crystals/>
- [46] Molecular Sieves. In: *Merck* [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/technical-documents/technical-article/chemistry-and-synthesis/reaction-design-and-optimization/molecular-sieves>
- [47] Molecular Sieve Desiccant All You Need to Know. In: *Jalon* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.jalonzeolite.com/molecular-sieve-desiccant-application-all-you-need-to-know/>
- [48] DOLEŽELOVÁ, Magdaléna, Lenka SCHEINHERROVÁ, Jitka KREJSOVÁ a Alena VIMMROVÁ. Effect of high temperatures on gypsum-based composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **168**, 82-90 [cit. 2023-03-16]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.101
- [49] A Comprehensive Introduction To Water Desiccant Material Types. In: *Jalon* [online]. 2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.jalonzeolite.com/water-desiccant-material-types-101/>
- [50] Desiccants Desi Pak Bentonite Clay and Silica gel. In: *Clariant Ltd.* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.clariant.com/en/Solutions/Products/2017/08/29/21/25/White-Paper-Bentonite-Desiccants>
- [51] OXID VÁPENATÝ: pálené vápno. In: *P-LAB* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.p-lab.cz/oxid-vapenaty>

- [52] Lithium Bromide (LiBr): Structure, Properties, Interesting Facts. In: *Turito* [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.turito.com/blog/chemistry/lithium-bromide>
- [53] KIRADJIEV, Kristian B., Vladimiro NIKOLAKIS, Ian M. GRIFFITHS, Uwe BEUSCHER, Vasudevan VENKATESHWARAN a Christopher J. W. BREWARD. A Simple Model for the Hygroscopy of Sulfuric Acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. American Chemical Society, 2020, **59**(10), 4802-4808. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/acs.iecr.9b06018
- [54] THE PROPERTIES OF SULPHURIC ACID. In: *Unacademy* [online]. [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://unacademy.com/content/neet-ug/study-material/chemistry/the-properties-of-sulphuric-acid/>
- [55] Sodium hydroxide. In: *Wikipedia* [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_hydroxide
- [56] Chart Compositions. In: *SorbentSystems* [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: https://www.sorbentsystems.com/desiccants_charts.html
- [57] CHEN, Y. Packaging Selection for Solid Oral Dosage Forms. In: *Developing Solid Oral Dosage Forms* [online]. Elsevier, 2017, s. 637-651 [cit. 2023-03-24]. ISBN 9780128024478. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-802447-8.00023-6
- [58] MUHAMAD DAMANHURI, Amir Abdullah. *Comparison for humidity absorption using various silica gel in experimental chamber*. 2016.
- [59] Laboratorní přesná váha KERN KB 10000-1N. In: *Gapa váhy* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.gapa-vahy.cz/produkty-laboratorni-presna-vaha-kern-kb-10000-1n-detail-12370#>
- [60] VENTICELL 111 - ECO line. In: *BMT Medical Technology s.r.o.* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.bmt.cz/venticell-61-venticell-111---ecoline18>
- [61] Pec laboratorní komorová LAC L, horizontální. In: *Verkon* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/pec-laboratorni-komorova-lac-l-horizontalni/>
- [62] SHT4x Smart Gadget User Guide. In: *Sensirion* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/F8D0AE28/617BC2FB/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT4x_Smart-Gadget_User-Guide.pdf
- [63] Sensor Specification Statement and Testing Guide: Understanding and testing the specifications of RHT sensors. In: *Sensirion* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/13FA5FD4/6163F845/Sensirion_AppNotes_Sensors_Specification_Statement.pdf
- [64] Humidity sensors: Experts in environmental sensing. In: *Sensirion* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/0800F291/623B46D3/Sensirion_Humidity_Brochure_Web.pdf

- [65] Datasheet – SHT4x: 4th Gen. In: *Sensirion* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://sensirion.com/media/documents/33FD6951/640B22DB/Datasheet_SHT4x.pdf
- [66] Water Vapor Pressure Calculator. In: *Herramientasingeneria* [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/waterVapourPressure/waterVapourPressure.html>
- [67] ŠAFAŘÍK, Pavel a Magda VESTFÁLOVÁ. *Termodynamika vlhkého vzduchu*. 1.vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN ISBN 978-80-01-06020-9.
- [68] Using a Desiccator. In: *Wired Chemist* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.wiredchemist.com/chemistry/instructional/laboratory-tutorials/using-a-desiccator>
- [69] Online conversions, calculations and formulas. In: *Aqua-Calc* [online]. [cit. 2023-04-28].
- [70] Affinity - Terminology of Molecular Biology for affinity – GenScript. In: *GenScript* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.genscript.com/biology-glossary/8371/affinity>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ a ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A	popelovina	%
h	hořlavina	%
H ^r	obsah vodíku v surovém palivu	%
m	hmotnost vody v exsikátoru	kg
m ₁	hmotnost prázdného plechu použitého pro zkušební podíl	g
m ₂	hmotnost plechu se zkušebním podílem před sušením	g
m ₃	hmotnost plechu se zkušebním podílem po sušení	g
m ₄	hmotnost referenčního plechu před sušením	g
m ₅	hmotnost referenčního plechu po sušení	g
m _{celk}	hmotnost vlhkého vzduchu	g
m _i	hmotnost prázdné váženky a víčka	g
m _j	hmotnost prázdného plechu použitého pro zkušební podíl	g
m _k	hmotnost váženky se zkušebním vzorkem a víčka před sušením	g
m _o	hmotnost absolutně suchého vzorku	g
m _p	hmotnost vodní páry	
m _v	hmotnost suchého vzduchu	g
m _w	hmotnost vlhkého vzorku	g
m _d	hmotnost navážky síranu vápenatého	g
M _{ad}	obsah vody ve zkušebním podílu pro analytickou metodu	%
M _{ari}	obsah vody ve zkušebním podílu pro referenční metodu	%
M _{arj}	obsahu vody ve zkušebním podílu pro zjednodušenou metodu	%
M _p	úbytek vody předsušením	%
M _T	obsah vody předsušeného materiálu	%
M _r	zbylá voda stanovená v předsušeném vzorku	%
Q _s	spalné teplo	kJ · kg ⁻¹
p	atmosférická tlak	Pa
p _p	parciální tlak vodní páry	Pa
p _p [“]	parciální tlak syté vodní páry	Pa
Q _i ^r	výhřevnost	kJ · kg ⁻¹
r	kondenzační teplo	kJ · kg ⁻¹

r_p	molární plynová konstanta vodní páry	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
r_v	molární plynová konstanta suchého vzduchu	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	teplota	$^{\circ}C$
V_d	objem navážky síranu vápenatého	m^3
V_k	úbytek vlhkého vzduchu v exsikátoru	%
V_o	odebraný objem z počáteční navážky	m^3
V_{vd}	počáteční objem vzduchu v exsikátoru	m^3
V_{vz}	vnitřní objem exsikátoru	m^3
W^r	obsah vody v palivu	%
W^{abs}	absolutní materiálová vlhkost	%
W_{abs}	definiční vzorec vlhkosti paliva	%
W^{rel}	relativní rovnovážná vlhkost	%
x_p	měrná vlhkost	$g \cdot kg_{sv}^{-1}$
ρ_d	hustota síranu vápenatého	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_v	hustota vody	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{celk}	hustota vlhkého vzduchu	$kg \cdot m^{-3}$
φ	relativní vlhkost	%
RH	relativní vlhkost	
T	teplota	