



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## ZPŮSOBY ODLUČOVÁNÍ VLHKOSTI METHODS OF MOISTURE SEPARATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VOJTĚCH POKORNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ HEJČÍK, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Vojtěch Pokorný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Způsoby odlučování vlhkosti**

v anglickém jazyce:

### **Methods of moisture separation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V klimatizačních systémech dopravních prostředků dochází díky ochlazování vzduchu ke kondenzaci vzdušné vlhkosti na površích chladičů. Není takto zkondenzovaná vlhkost odstraněna, dochází k jejímu unášení proudícím vzduchem, což snižuje komfort a bezpečnost posádky dopravního prostředku.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zpracovat literární rešerši způsobů a zařízení, využívaných k úpravě stlačeného vzduchu a to za účelem snižování vlhkosti.

Seznam odborné literatury:

[www.schneider-bohemia.cz](http://www.schneider-bohemia.cz)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Hejčík

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 2.12.2010

L.S.



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **Abstrakt**

V úvodní části této práce jsou popsány obecné vlastnosti vlhkého vzduchu. Dále je uvedeno vyjádření vlhkosti, důležité pro určení stavu ve kterém se vzduch nachází. Hlavní částí práce je rozbor způsobů, které vedou ke snižování vlhkosti vzduchu se znázorněním jednotlivých dějů v Mollierově diagramu. V závěru práce jsou rozebrána zařízení, využívaná ke snižování vlhkosti vzduchu v praxi.

## **Abstract**

General properties of moist air are written in introductory part of this final thesis. It includes description of moisture, this is important for determination the state in which the air is. The main part of this thesis are analysis methods, which are leading to reduce moisture in the air. These processes are illustrated in the Molliere diagram. In the final part are the moisture separation systems, which we can use in practice.

## **Klíčová slova**

Vlhký vzduch, Odlučování vlhkosti, Sušiče vzduchu

## **Key words**

Moist air, Moisture separation, Air Dryers

## **Bibliografická citace**

POKORNÝ, V. *Způsoby odlučování vlhkosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

## **Prohlášení o původnosti práce**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Způsoby odlučování vlhkosti vypracoval samostatně za použití odborné literatury a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu na konci práce.

.....  
Datum

.....  
Jméno a příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a příjemné prostředí při studiu. Děkuji také vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D. za dobrý přístup ke studentovi, cenné rady a konzultace.

## Obsah

Úvod.....	9
1    Základní fyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu .....	10
1.1    Daltonův zákon .....	10
1.2    Stavy vlhkého vzduchu .....	11
1.3    Vypařování a kondenzace .....	11
2    Vyjádření vlhkosti vzduchu .....	12
2.1    Celkový tlak vzduchu .....	12
2.2    Veličiny určující stav páry nezávisle na vzduchu.....	12
2.3    Poměrné veličiny mezi hmotností páry a vzduchu .....	13
2.4    Veličiny získávané měřením.....	14
2.5    Entalpie vlhkého vzduchu.....	14
2.6    Diagramy pro zjišťování stavů vlhkého vzduchu .....	15
3    Způsoby odlučování vlhkosti.....	17
3.1    Izobarické úpravy vlhkého vzduchu .....	17
3.1.1    Ochlazování s kondenzací, odloučením vlhkosti a ohřevem .....	17
3.1.2    Odvlhčování adsorpcí .....	19
3.1.3    Míšení dvou proudů vzduchu .....	21
3.2    Neizobarické úpravy vlhkého vzduchu.....	23
3.2.1    Odloučení vlhkosti stlačením vzduchu .....	23
4    Zařízení používaná pro odlučování vlhkosti.....	25
4.1    Kondenzační sušiče vzduchu .....	26
4.2    Adsorpční sušiče vzduchu .....	29
4.3    Membránové sušiče vzduchu.....	31
Závěr .....	32
Seznam použitých zdrojů.....	33
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	35

## Úvod

Vlhký vzduch přináší řadu problémů ale i výhod. Má značný vliv na lidský organismus, příliš suchý či vlhký vzduch může způsobit zdravotní komplikace.

Vysoká vlhkost představuje velký problém v domácnostech, kde způsobuje vlhnutí stěn, vznik plísní či rozpad zdiva. Ti z nás, kteří nosí brýle, se o existenci vlhkosti sami přesvědčí, když v zimě z chladného prostředí vejdou do vytopené místnosti (pokud má povrch brýlí nižší teplotu než je hodnota rosného bodu vzduchu v místnosti - vysvětlení významu rosného bodu a souvisejících pojmů je součástí této práce).

Dalším nemalým problémem vyšší vlhkosti vzduchu je koroze kovů. Zejména výrobní komplexy musí řešit korozi mechanických součástí strojů nebo skladovaného materiálu. K odstranění těchto problémů využíváme sušiče vzduchu (především adsorpční, kondenzační či membránové) jejich problematika bude v této práci dále rozebírána.

### Suchý vzduch

Existence suchého vzduchu je jen teoretická, v atmosférických podmínkách obsahuje vzduch vždy určité procento vlhkosti. Složení suchého vzduchu je následující:

Tab. 1 Složení vzduchu ve spodních vrstvách atmosféry [12]

Plynná složka	Chemická značka	Obsah složky dle	
		Objemu	Hmotnosti
		%	%
dusík	N <sub>2</sub>	78,09	75,5
kyslík	O <sub>2</sub>	20,95	23,17
argon	Ar	0,93	1,286
oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,03	0,043
neon	Ne	1,8·10 <sup>-3</sup>	1,2·10 <sup>-3</sup>
helium	He	5,24·10 <sup>-5</sup>	7,0·10 <sup>-5</sup>
krypton	Kr	1,0·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>
vodík	H <sub>2</sub>	5,0·10 <sup>-5</sup>	
xenon	Xe	8,0·10 <sup>-6</sup>	4,0·10 <sup>-4</sup>
ozon	O <sub>3</sub>	1,0·10 <sup>-6</sup>	
vzduch	-	100	100

# 1 Základní fyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu

Vlhký vzduch je všude kolem nás, jedná se o směs suchého vzduchu, vodní páry a ostatních částic (nečistoty). Pokud hovoříme o vlhkém vzduchu, máme na mysli směs plynů a par.

„Mezi směsí plynů a par a směsí plynů je zásadní rozdíl v tom, že množství par v plynu (v našem případě vodní páry v suchém vzduchu) je zcela určitým způsobem omezeno tím, že tlak syté páry je závislý na teplotě  $p_p'' = f(t)$ , zatímco složky směsi plynů se mohou vyskytovat v libovolném poměru.“ [3]

Toto je zcela zásadní poznatek, od kterého se odvíjí vývoj většiny zařízení pracujících na principu úpravy vzduchu.

Parciální tlak syté páry  $p_p''$  závisí na teplotě a vyjadřuje maximální tlak par pro danou teplotu a celkový tlak. Hodnotu tohoto tlaku lze nalézt v tabulkách vlastností vlhkého vzduchu.

Zjednodušení výpočtu vlhkého vzduchu vyplývá z předpokladu, že za podmínek blízkých našemu okolí (teplota a tlak) lze suchý vzduch i vodní páru pokládat za ideální plyny.

Každý plyn se v uzavřeném prostoru chová tak, jako by byl v celém objemu sám (zaujímá stejný objem jako směs) [3].

$$V_v = V_p = V \quad [\text{m}^3] \quad (1.1)$$

$V_v$  - Objem suchého vzduchu

$V_p$  - Objem vodní páry

$V$  - Celkový objem (vlhkého vzduchu)

## 1.1 Daltonův zákon

Celkový tlak směsi je dán součtem parciálních tlaků jednotlivých složek [3].

V našem případě:

$$p = \sum p_i = p_v + p_p \quad [\text{Pa}] \quad (1.2)$$

$p_v$  - Tlak suchého vzduchu

$p_p$  - Tlak vodní páry

Při stejném objemu a teplotě, ale různém tlaku a hmotnosti budou rozdílné i měrné plynové konstanty suchého vzduchu a vodní páry. Ze stavové rovnice pro m-kilogramů ideálního plynu vyplývá:

$$\text{Suchý vzduch:} \quad r_v = \frac{p_v \cdot V}{m_v \cdot T} = 287,11 \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.3)$$

$$\text{Vodní pára:} \quad r_p = \frac{p_p \cdot V}{m_p \cdot T} = 461,5 \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.4)$$

$m_v$  - Hmotnost suchého vzduchu [kg]

$m_p$  - Hmotnost vodní páry [kg]

$T$  - Teplota vzduchu [K]

## 1.2 Stavy vlhkého vzduchu

Podle toho jaké množství vodní páry je ve vzduchu obsaženo, rozeznáváme stavy vzduchu:

- **Nenasycený**  $p_p < p_p''$  Parciální tlak vodních par ve směsi je nižší než ve stavu sytém. Například pokud ohříváme vodu v uzavřené nádobě (z části naplněné) a po odpaření veškeré kapaliny nadále zvyšujeme teplotu, získáváme tak nenasycený stav.
- **Nasycený**  $p_p = p_p''$  Pokud vzduchu ve stavu nenasyceném dodáme vodní páru dosáhneme stavu nasycení. Při tomto stavu obsahuje vlhký vzduch maximální množství páry, které je schopen při daném tlaku a teplotě pojmout.
- **Přesycený** Obsahuje-li vzduch větší množství vlhkosti než odpovídá stavu nasycenému, vyloučí se vlhkost ve formě kapaliny či krystalků.

## 1.3 Vypařování a kondenzace

Aby se mohl suchý vzduch nasytit vlhkostí nebo vlhkost odloučit musejí v přírodě probíhat určité děje. Jev, který výrazně souvisí se změnou vzdušné vlhkosti, se nazývá vypařování a kondenzace. V okolním prostředí probíhá tento děj samovolně vlivem lokálních změn vlhkosti prouděním vzduchu či v závislosti na změně teploty.

Při zvyšování teploty kapaliny, získávají její molekuly značnou kinetickou energii (jejich pohyb se zrychluje), přitažlivé síly působící mezi částicemi slábnou. Díky tomu mohou některé částice překonat energetickou bariéru hladiny a dostat se do vzduchu - vypařování (Obr. 1.3). Při opačném procesu, dochází ke kondenzaci vodních par na okolních předmětech při ochlazení vzduchu (Obr. 1.1 a Obr. 1.2).



Obr. 1.1 Kondenzace vlhkosti na izolačním skle [18]



Obr. 1.2 Kondenzace vlhkosti s námrazou [18]



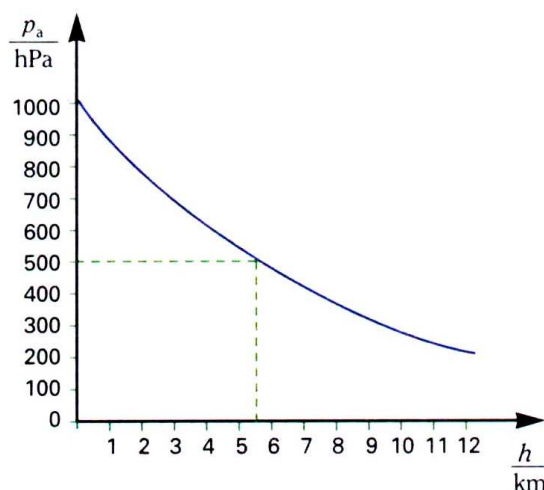
Obr. 1.3 Odpařování vody ze silnice [15]

## 2 Vyjádření vlhkosti vzduchu

Pokud chceme jednoznačně určit stav ve kterém se vzduch nachází, je nutné znát dvě základní stavové veličiny (nejčastěji celkový tlak a teplotu vzduchu) a jednu veličinu určující obsah vlhkosti ve vzduchu.

### 2.1 Celkový tlak vzduchu

Lze jej orientačně stanovit podle příslušné nadmořské výšky (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 Závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce [20]

S rostoucí nadmořskou výškou tlak vzduchu klesá. Kromě výškové tlakové diference existuje také vodorovná, jedná se o místní a časové změny tlaku vzduchu. Jsou však mnohem menší než změny vlivem výšky.

„V České republice je průměrná hodnota normálního atmosférického tlaku 1013 hPa. Absolutní maximum na území bývalého Československa bylo zaznamenáno v Hurbanově - 1055,4 hPa. Absolutní minimum v ČR bylo zaznamenáno v Hradci Králové dne 2.12.1976 - 970,1 hPa.“ [21]

Vlhkost ve vzduchu lze vyjádřit pomocí následujících veličin:

### 2.2 Veličiny určující stav páry nezávisle na vzduchu

#### Absolutní vlhkost $\phi$

Je to hmotnost vodních par  $m_p$ , vody  $m_k$  a ledu  $m_t$ , obsažených v objemové jednotce vlhkého vzduchu [3].

$$\phi = \frac{m_p + m_k + m_t}{V} = \frac{m_p}{V} = \frac{\rho_p \cdot V}{V} = \rho_p \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.1)$$

Pokud se vzduch vyskytuje jako homogenní směs ve stavu nenasyčeném, nejvýše sytém ( $m_k = m_t = 0$ ), definujeme absolutní vlhkost vzhledem k rovnici (1.1) jako hustotu vodní páry  $\rho_p$ .

## Parciální tlak vodních par $p_p$

Většinou se určuje z psychrometrických měření. Souvislost tlaku vodních par s absolutní vlhkostí daného prostředí je dána stavovou rovnicí. Ke změnám tohoto tlaku dochází vlivem změny celkového tlaku vzduchu.

## Relativní vlhkost vzduchu $\varphi$

Udává míru nasycení vzduchu vodními parami. Je to poměr hmotnosti vodní páry  $m_p$  v  $1\text{m}^3$  vzduchu k hmotnosti vodní páry v  $1\text{m}^3$  vzduchu ve stavu sytém  $m_p''$  (při téže teplotě a celkovém tlaku) [3].

$$\varphi = \frac{m_p}{m_p''} = \frac{V \cdot \rho_p}{V \cdot \rho_p''} = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{\frac{p_p}{r_p \cdot T}}{\frac{p_p''}{r_p \cdot T}} = \frac{p_p}{p_p''} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.2)$$

Po dosazení rovnice (1.4) získáme vztah pro relativní vlhkost závislý na tlaku vodních par a vodních par ve stavu sytém.

## 2.3 Poměrné veličiny mezi hmotností páry a vzduchu

### Měrná vlhkost vzduchu $x$

Je dána podílem hmotnosti vodní páry ve vzduchu  $m_p$  (g, kg) a hmotnosti 1 kg suchého vzduchu  $m_v$ . Dosazením rovnic (1.3) a (1.4), následně s využitím rovnice (2.2) a daltonova zákona (1.2) získáme známý tvar [3]:

$$x = \frac{m_p}{m_v} = \frac{\frac{p_p \cdot V}{r_p \cdot T}}{\frac{p_v \cdot V}{r_v \cdot T}} = \frac{r_v}{r_p} \cdot \frac{p_p}{p_v} = \frac{287,11}{461,5} \cdot \frac{p_p}{p - p_p} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p - \varphi \cdot p_p''} \quad [\text{kg/kg s.v.}] \quad (2.3)$$

Z rovnice (2.3) můžeme vyjádřit relativní vlhkost

$$\varphi = \frac{p}{p_p'' \cdot \left(1 + \frac{0,622}{x}\right)} \quad [-], [\%] \quad (2.3^*)$$

Pokud jsou hodnoty měrné vlhkosti vzduchu příliš vysoké, lze spočítat **hmotnostní podíl páry ve vzduchu  $\xi$**  jako hmotnost vodní páry připadající na 1 kg vlhkého vzduchu [2].

$$\xi = \frac{m_p}{m_p + m_v} = \frac{x}{x + 1} \quad [\text{kg/kg v.v.}] \quad (2.4)$$

## 2.4 Veličiny získávané měřením

### Teplota rosného bodu $t_r$

Je to teplota, při které se vzduch nachází ve stavu nasyceném (za konstantního tlaku). Tento stav se projevuje: mlžením skel v automobilu, orosením brýlí či zrcadel v koupelně při sprchování. Teplota rosného bodu se určuje jako průsečík hodnoty měrné vlhkosti s křivkou nasycení ( $\varphi = 100\%$ ) z Mollierova diagramu.

### Teplota mokrého teploměru $t_m$

Další ze způsobů stanovení vlhkosti a výše uvedených parametrů určujících stav vzduchu je pomocí teploty mokrého teploměru. Při adiabatickém odpařování je to teplota vody, kdy je teplo dodáváno pouze konvekcí ze vzduchu.

### Měření vlhkosti

- Dilatačními hygrometry      Relativní vlhkost je měřena pomocí látek, které dilatují vlivem změny vlhkosti (vlasy).
- Kondenzační metoda      Kondenzací vlhkosti z určitého objemu vzduchu.
- Psychrometry      Měříme teplotu suchého a mokrého teploměru, která se blíží teplotě mezního adiabatického ochlazování. Pomocí těchto teplot stanovíme výpočtem nebo z Mollierova diagramu vlhkost vzduchu.
- Měření  $t_r$       Pomocí změny odrazu schopnosti ochlazovaného zrcátka.

## 2.5 Entalpie vlhkého vzduchu

Entalpii lze definovat pomocí druhé formy prvního zákona termodynamiky, jako teplo přivedené soustavě při konstantním tlaku. Při výpočtu vlhkého vzduchu budeme sledovat 1 kg suchého vzduchu, obsahující  $x$  kg vodní páry. To je výhodné, jelikož při probíhajících dějích je hmotnost suchého vzduchu konstantní, dochází pouze ke změně hmotnosti vodní páry.

Měrnou entalpii vlhkého nenasyčeného vzduchu pak lze vypočítat jako součet měrných entalpií suchého vzduchu  $i_v$  a vodní páry  $i_p$  [3].

$$i = i_v + x_p \cdot i_p \quad [\text{kJ/kg s.v.}] \quad (2.5)$$

Měrnou entalpii suchého vzduchu určíme ze střední měrné tepelné kapacity za stálého tlaku  $c_v$  (1,01 kJ/kg.K pro rozmezí teplot -30 až 100 °C) a teploty  $t$  [3].

$$i_v = c_v \cdot t = 1,01 \cdot t \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.6)$$

Pro výpočet měrné entalpie páry můžeme do teploty 100°C a tlaku par 10 kPa využít empirický vztah [3].

$$i_p = l_{23} + \overline{c_p} \cdot t = 2500 + 1,84 \cdot t \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.7)$$

$l_{23}$  - Měrné výparné teplo vody (při 0°C) [kJ/kg]

$\overline{c_p}$  - Střední měrná tepelná kapacita vodní páry [kJ/kg.K]

Po dosazení rovnic (2.6) a (2.7) do vztahu (2.5) obdržíme vztah pro měrnou entalpii **nenасыceného** vzduchu [3].

$$i = 1,01 \cdot t + x_p \cdot (2500 + 1,84 \cdot t) \quad [\text{kJ/kg s.v.}] \quad (2.8)$$

Při výpočtu měrné entalpie nasyceného vzduchu sčítáme měrnou entalpii suchého vzduchu  $i_v$  a vodní páry ve stavu sytém  $i_p''$  [3].

$$i = i_v + x_p \cdot i_p'' = 1,01 \cdot t + x_p \cdot (2500 + 1,84 \cdot t) \quad [\text{kJ/kg s.v.}] \quad (2.9)$$

Pokud se vzduchu nachází ve stavu přesyceném přičítáme ke vztahu (2.9) měrnou entalpii kapalně fáze (teplota vzduchu  $t > 0^\circ\text{C}$ ) nebo tuhé fáze (teplota vzduchu  $t < 0^\circ\text{C}$ ).

## 2.6 Diagramy pro zjišťování stavů vlhkého vzduchu

Abychom mohli znázornit změny stavů vlhkého vzduchu, využíváme k tomu i-x diagramy vlhkého vzduchu. Nejpoužívanější jsou dva typy diagramů Mollierův i-x diagram a psychrometrický diagram (používaný spíše v anglosaské literatuře).

### Mollierův i-x diagram

Diagram (Obr. 2.2) vyjadřuje závislost veličin ( $i, x, t, \phi, p_p$ ) při konstantním tlaku. Dnes používanou formou diagramu je provedení v kosouhlých souřadnicích, kde hlavní osy diagramu (entalpie a měrná vlhkost) svírají úhel  $135^\circ$ . Další osy získáváme dopočtem: křivky konstantních relativních vlhkostí ( $\phi = \text{konst.}$ ) dle vztahu (2.3\*) a izotermy podle rovnice (2.8). Směrnici přímk v diagramu udává **směrové měřítko**  $\delta$ , které se vynáší na okraj diagramu a je vyjádřeno jako tangenta podílu entalpie a měrné vlhkosti.

$$\delta = \frac{\Delta i}{\Delta x} \quad [-] \quad (2.10)$$

V diagramu je také vyznačeno směrové měřítko **faktoru citelného tepla**  $\vartheta$  definované poměrem citelného tepelného toku  $\dot{Q}_c$  k celkovému tepelnému toku  $\dot{Q}$ , potřebnému k uskutečnění změny stavu vzduchu [2].

$$\vartheta = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_c + \dot{Q}_{lat}} = c_v \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad [-] \quad (2.11)$$



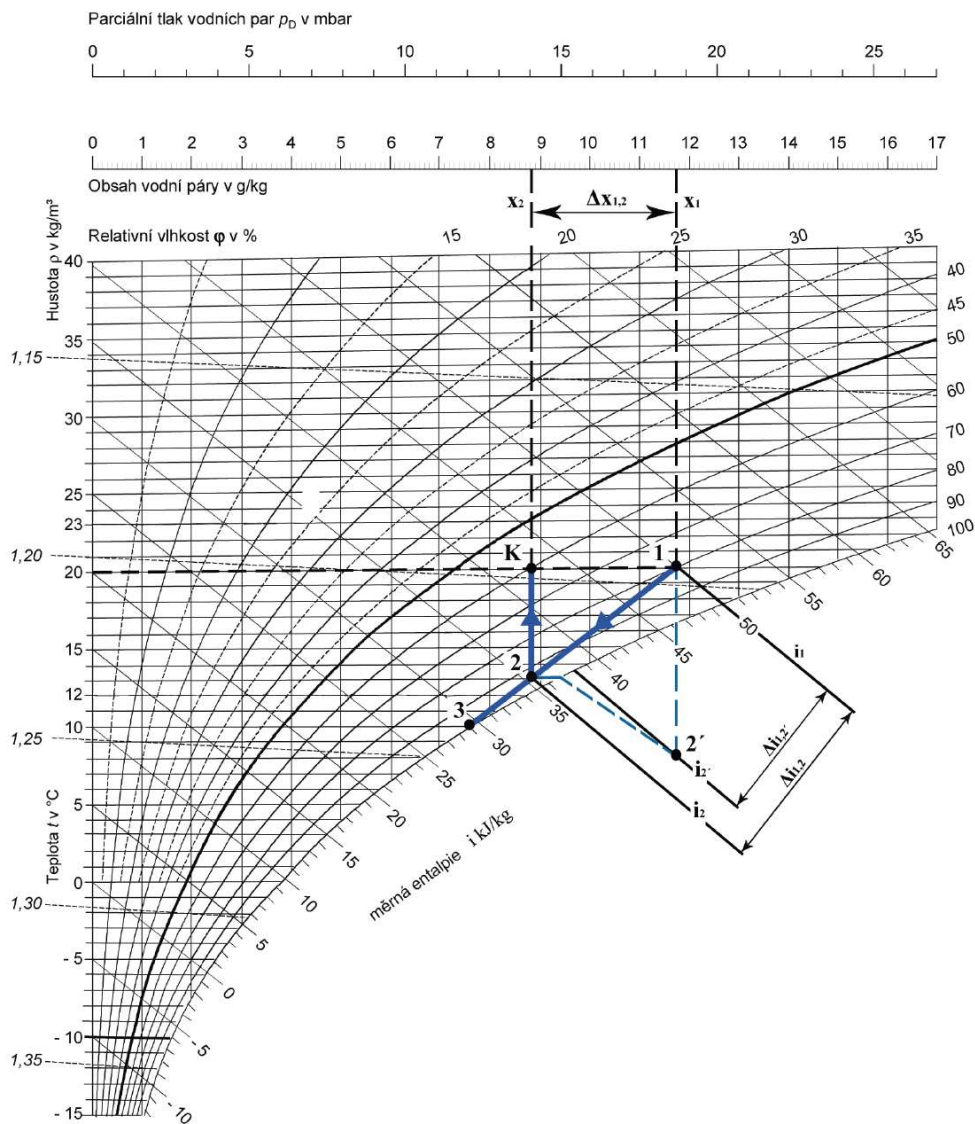
### 3 Způsoby odlučování vlhkosti

Odlučováním vlhkosti ze vzduchu rozumíme snižování množství vodních par ve směsi vlhkého vzduchu. Tím dochází ke snižování absolutní, relativní a měrné vlhkosti (vysušování vzduchu). Odvlhčení lze dosáhnout různými způsoby.

#### 3.1 Izobarické úpravy vlhkého vzduchu

##### 3.1.1 Ochlazování s kondenzací, odloučením vlhkosti a ohřevem

Jedna z nejběžnějších úprav vzduchu používaná v kondenzačních systémech. Průběh dějů je pro názornost zobrazen v Mollierově diagramu (Obr. 3.1)



Obr. 3.1 Kondenzace s odloučením vlhkosti a ohřevem

Při ochlazování vzduchu ve stavu 1 se vzduch, který byl původně ve stavu nenasyčeném, začne blížit stavu nasycení ( $\phi = 1$ ). Současně se hodnota parciálního tlaku vodních par  $p_p$  blíží maximální hodnotě  $p_p''$  (tj. tlak vodních par ve stavu sytém). Jelikož je množství vodních par v suchém vzduchu omezeno závislostí  $p_p'' = f(t)$ , dojde

při poklesu teploty pod hodnotu rosného bodu ke kondenzaci daného množství vodní páry v závislosti na velikosti přechlazení (změna stavu  $1 \rightarrow 2'$ ).

Jelikož kondenzace a odloučení kondenzátu probíhá většinou současně, můžeme tento děj znázornit pomocí spojnice procházející stavem 1 a 3.

Stav 3 je dán průsečíkem střední teploty chladicího povrchu s křivkou nasycení. Výsledný stav vzduchu 2 se pak nachází mezi stavem 1 a stavem 3, jeho poloha záleží na velikosti chladicího výkonu.

Díky *obtokovému efektu* bude mít vzduch ve stavu 2 vyšší teplotu než chladicí povrch.

*Obtokovým efektem nazýváme jev, kdy dochází ke kondenzaci vzdušné vlhkosti pouze ze vzduchu, který je v kontaktu s chladícím povrchem. Zbylý vzduch opouští chladič beze změny* [19]. U moderních chladicích zařízení není třeba brát obtokový efekt v úvahu.

Tím že vzduch ochladíme a odvedeme zkondenzovanou vlhkost dojde ke snížení měrné vlhkosti vzduchu o hodnotu  $\Delta x_{1,2}$ . Vzhledem k ochlazování má vzduch ve stavu 2 nižší teplotu  $t_2$  a vyšší relativní vlhkost  $\varphi_2$  než ve stavu 1. Proto se vzduch ohřeje (při konstantní měrné vlhkosti) na původní teplotu (stav K), čímž se relativní vlhkost sníží.

Ze vzduchu o teplotě  $20^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $\varphi = 80\%$  jsme pomocí kombinace chlazení s kondenzací, separace vlhkosti a ohřevu získali vzduch o stejné teplotě s relativní vlhkostí  $\varphi = 60\%$ .

**Hmotnostní tok zkondenzované vlhkosti**  $\dot{m}_w$  se vypočítá na základě rovnice (2.3) z rozdílu měrných vlhkostí ve stavu 1 a 2.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_v \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/s}] \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_v \quad - \text{Hmotnostní tok suchého vzduchu} \quad [\text{kg/s}]$$

**Celkový odváděný tepelný tok**  $\dot{Q}_{1,2}$  (celkový chladicí výkon)

Při změně stavu  $1 \rightarrow 2$ , se vypočítá jako součet tepelného toku odváděného chladičem  $\dot{Q}_{1,2}'$  (citelný tepelný tok) a tepelného toku kondenzované vlhkosti  $\dot{Q}_{2',2}$  (latentní tep. tok).

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_{1,2}' + \dot{Q}_{2',2} = \dot{m}_v \cdot (i_2' - i_1) + \dot{m}_w \cdot (i_2 - i_2') = \dot{m}_v \cdot (i_2 - i_1) \quad [\text{W}] \quad (3.2)$$

**Faktor citelného tepla**  $\vartheta$  z rovnice (2.11) vyjadřuje poměr citelného tepelného výkonu k přivedenému chladicímu výkonu.

$$\vartheta = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}} = \frac{\dot{Q}_{1,2}'}{\dot{Q}_{1,2}} = \frac{\Delta i_{1,2}'}{\Delta i_{1,2}} = \frac{(i_2' - i_1)}{(i_2 - i_1)} \quad [-] \quad (3.3)$$

**Přiváděný tepelný tok**  $\dot{Q}_{2,K}$  při ohřevu vzduchu, který odpovídá změně stavu  $2 \rightarrow K$ , můžeme vyjádřit z rozdílu měrných entalpií těchto stavů.

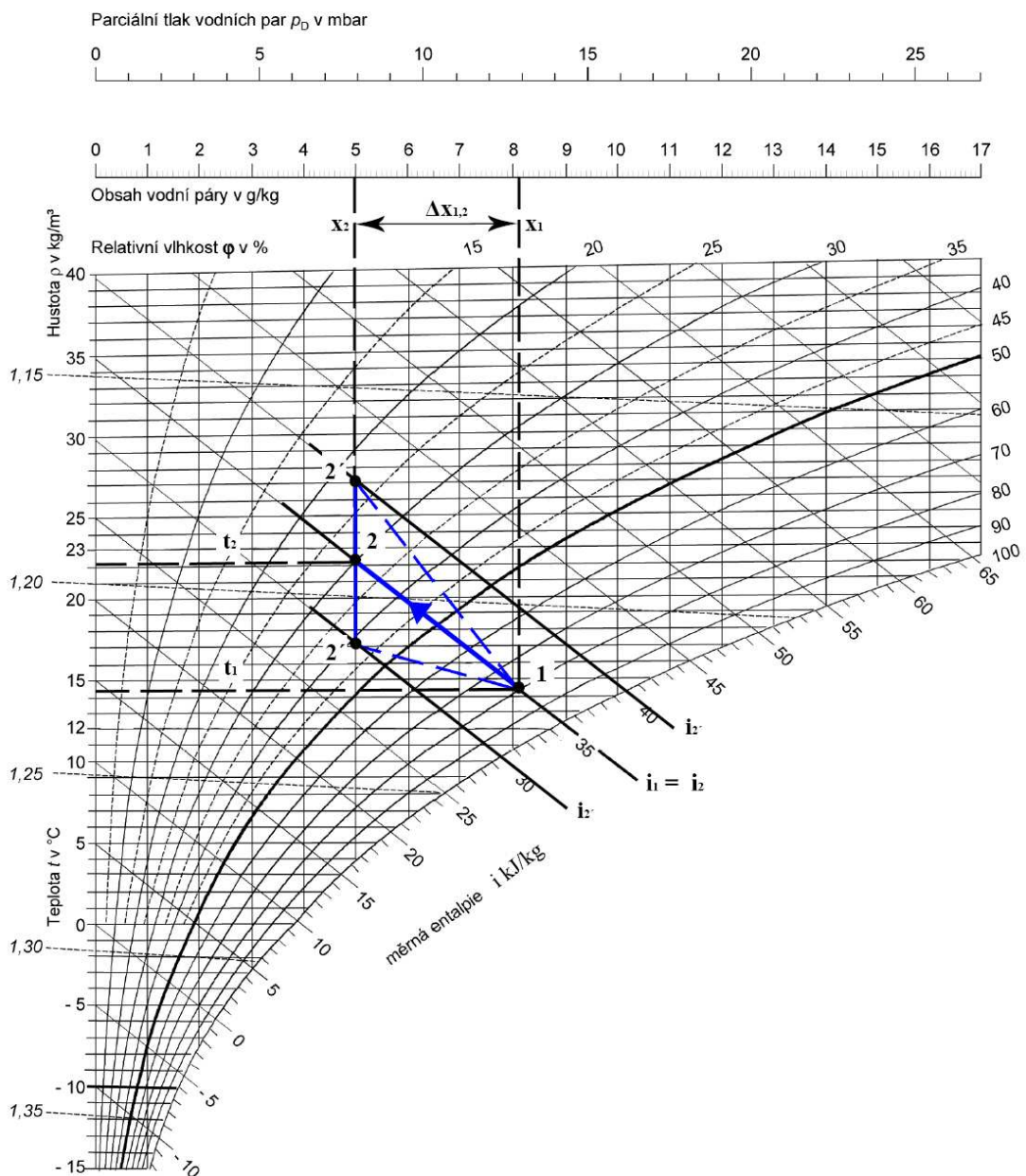
$$\dot{Q}_{2,K} = \dot{m}_v \cdot (i_K - i_2) \quad [\text{W}] \quad (3.4)$$

### 3.1.2 Odvlhčování adsorpcí

**Adsorpce** je proces při kterém dochází k hromadění plynné nebo rozpuštěné látky (adsorbátu) na povrchu látky tuhé či kapalné (adsorbentu) o velkém povrchu (např. aktivní uhlí, silikagel). [1]

Na rozdíl od chemické **absorpce** kdy nastává difúzní proces, při kterém se složky plynné směsi oddělují na základě jejich různé rozpustnosti ve vhodné kapalině. [1]

Při průchodu vzduchu adsorpčním prostředím se vážou částice vodní páry na adsorbent vlivem přitažlivých fyzikálních sil. Na začátku procesu vstupuje do zařízení vzduch ve stavu 1. Vodní páry ulpívají na povrchu adsorbentu, tím se snižuje hodnota absolutní vlhkosti. Při kondenzaci dochází k uvolnění výparného tepla, vlivem toho má výstupní vzduch (ve stavu 2) vyšší teplotu a nižší relativní vlhkost. Děj je znázorněn na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Odvlhčování vzduchu adsorpcí

Pokud uvažujeme proces za ustálený, pak je **hmotnostní tok zkondenzované vlhkosti**

$$\dot{m}_w = \dot{m}_v \cdot (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/s}] \quad (3.5)$$

**Celkový tepelný tok** lze přibližně vyjádřit rovnicí (3.2)

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_{1,2}' + \dot{Q}_w = \dot{m}_v \cdot (i_2' - i_1) + \dot{m}_w \cdot i_w \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

Pokud nepřivádíme ani neodvádíme ze soustavy tepelný tok  $\dot{Q}_{1,2}'$ , pak se entalpie vzduchu nemění ( $i_1 = i_2$ ) a celkový tepelný tok je roven tepelnému toku zkondenzované vlhkosti  $\dot{Q}_w$ .

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_w = \dot{m}_w \cdot i_w = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot t_2 \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

$i_w$ - Měrná entalpie zkondenzované vlhkosti	[J/kg]
$c_w$ - Měrná tepelná kapacita kondenzátu	[J/kg.K]
$t_2$ - Teplota výstupního vzduchu	[K]

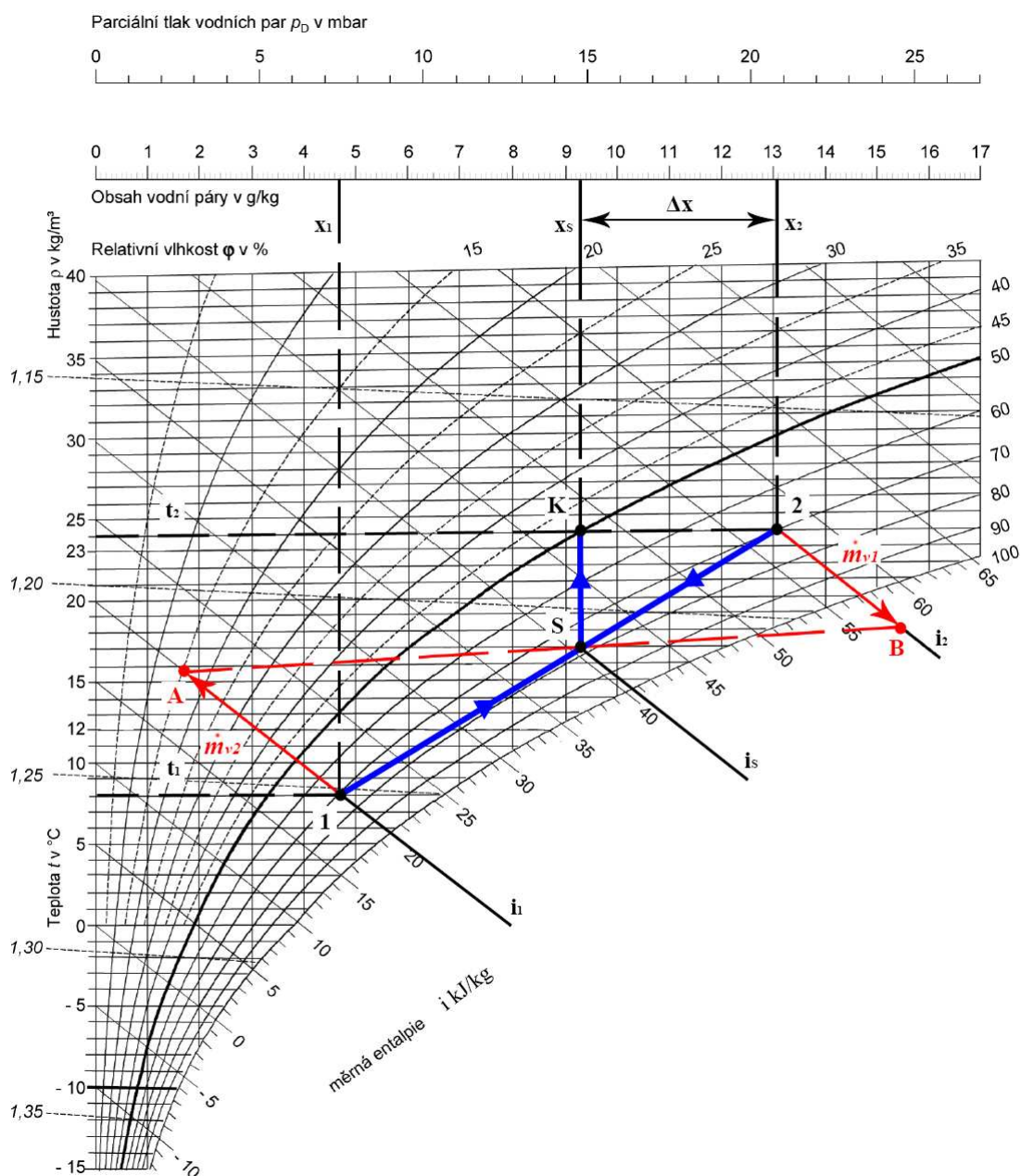
Ve skutečnosti je daný děj mnohem složitější, neboť dochází k postupnému nasycování adsorbentu vlhkostí. Účinnost procesu se snižuje a je nutné provést regeneraci adsorpční látky.

### 3.1.3 Míšení dvou proudů vzduchu

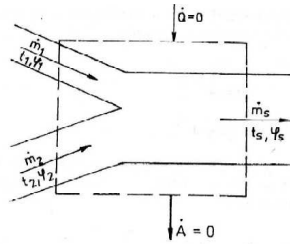
Snížení vlhkosti lze také dosáhnout míšením proudů vzduchu o různých měrných vlhkostech (stav 1 a 2) viz obr. 3.3.

Výsledná směs leží na spojnici stavů 1 a 2, její poloha je dána množstvím vzduchu (hmotnostními toky) míšených složek. Pokud má sušší vzduch ve stavu 1 nižší teplotu, než vzduch jehož vlhkost chceme snížit (stav 2), výsledná směs  $S$  má také nižší teplotu oproti stavu 2. Sušší vzduch odebírá část vlhkosti a vzniká směs s nižší absolutní a měrnou vlhkostí. Ohřevem směsi (změna stavu  $S \rightarrow K$ ) získáme vzduch o teplotě  $t_2$  a nižší relativní vlhkosti.

Tento postup se používá zejména v místnostech s vysokou hodnotou absolutní vlhkosti jako jsou kryté bazény.



Obr. 3.3 Míšení dvou proudů vzduchu



Obr. 3.4 Adiabatické míšení dvou proudů vzduchu [3]

Pro adiabatické míšení proudů 1 a 2, které probíhá v otevřené soustavě je **entalpie směsi**  $I_S$  rovna součtu entalpií ve stavech 1 a 2 [3].

$$I_S = I_1 + I_2 \quad [\text{J}] \quad (3.8)$$

Hmotnostní tok směsi je dán součtem jednotlivých hmotnostních toků 1 a 2 suchého vzduchu [3].

$$\dot{m}_{vS} = \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} \quad [\text{kg/s}] \quad (3.9)$$

Rovnici pro tepelný tok lze napsat ve tvaru [3]:

$$\dot{m}_{vS} \cdot i_S = \left( \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} \right) \cdot i_S = \dot{m}_{v1} \cdot i_1 + \dot{m}_{v2} \cdot i_2 \quad [\text{W}] \quad (3.10)$$

Úpravou rovnice (3.10) získáme závislost která přesně určuje stav směsi z podobnosti trojúhelníků  $\Delta 1AS$  a  $\Delta 2BS$ .

$$\frac{\dot{m}_{v1}}{i_2 - i_S} = \frac{\dot{m}_{v2}}{i_S - i_1} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\dot{m}_{v1}}{|2S|} = \frac{\dot{m}_{v2}}{|1S|} \quad (3.11)$$

Hmotnostní tok vlhkosti ve směsi je dán vztahem [3]:

$$\dot{m}_{vS} \cdot x_S = \left( \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} \right) \cdot x_S = \dot{m}_{v1} \cdot x_1 + \dot{m}_{v2} \cdot x_2 \quad [\text{kg/s}] \quad (3.12)$$

Upravením rovnice (3.12) opět získáváme stav směsi z podobnosti trojúhelníků  $\Delta 1AS$  a  $\Delta 2BS$ .

$$\frac{\dot{m}_{v1}}{x_2 - x_S} = \frac{\dot{m}_{v2}}{x_S - x_1} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\dot{m}_{v1}}{|BS|} = \frac{\dot{m}_{v2}}{|AS|} \quad (3.13)$$

Z rovnic (3.11) a (3.13) získáme vztah pro směrové měřítko  $\delta$

$$\delta = \frac{\dot{m}_{v1}}{\dot{m}_{v2}} = \frac{i_2 - i_S}{i_S - i_1} = \frac{x_2 - x_S}{x_S - x_1} \quad [-] \quad (3.14)$$

Ze závislosti (3.14) je patrné, že změny  $1 \rightarrow S$  a  $2 \rightarrow S$  mají stejný směr, proto leží výsledná směs na spojnici stavů 1 a 2.

## 3.2 Neizobarické úpravy vlhkého vzduchu

### 3.2.1 Odloučení vlhkosti stlačením vzduchu

Pro snižování vlhkosti vzduchu můžeme, mimo izobarické úpravy atmosférického vzduchu, využít (neizobarické) odvlhčování změnou tlaku vzduchu.

Z rovnic (2.3) a (2.3\*) je zřejmé, že platí přímá úměrnost mezi celkovým tlakem  $p$  a relativní vlhkostí vzduchu  $\varphi$  (pokud zvýšíme celkový tlak  $p$ , pak se musí zvýšit i relativní vlhkost  $\varphi$ , aby měrná vlhkost  $x$  zůstala konstantní).

Závislost mezi původními a novými hodnotami tlaku a relativní vlhkosti vyjadřuje vztah [3].

$$\frac{\varphi}{\varphi^x} = \frac{p}{p^x} \quad [-] \quad (3.15)$$

Hodnoty  $\varphi$  a  $p$  vyjadřují relativní vlhkost a celkový tlak vzduchu před zvýšením tlaku a hodnoty  $\varphi^x$  a  $p^x$  po zvýšení tlaku. Pokud stlačíme atmosférický vzduch o tlaku  $p = 1000$  hPa na tlak  $p^x = 2000$  hPa, dojde k posunu křivek relativní vlhkosti  $\varphi \rightarrow \varphi^x$  podle vztahu (3.15)

$$\varphi = \varphi^x \cdot \frac{p}{p^x} = 1 \cdot \frac{1000}{2000} = 0,5 \cdot 100 = 50 \quad [\%] \quad (3.15^*)$$




Nová poloha relativní vlhkosti  $\varphi^x = 1$  odpovídá původní poloze relativní vlhkosti  $\varphi = 0,5$ . Změna je znázorněna na obrázku 3.5



## 4 Zařízení používaná pro odlučování vlhkosti

Kvalita vzduchu hraje důležitou roli ve vzduchotechnice, při proudění vzduchu přes pneumatická zařízení, ale také v technologických procesech jako jsou výroby a jejich sklady. Zde může zhoršená kvalita vzduchu s vysokým obsahem pevných částic, vody či oleje způsobit značné škody.

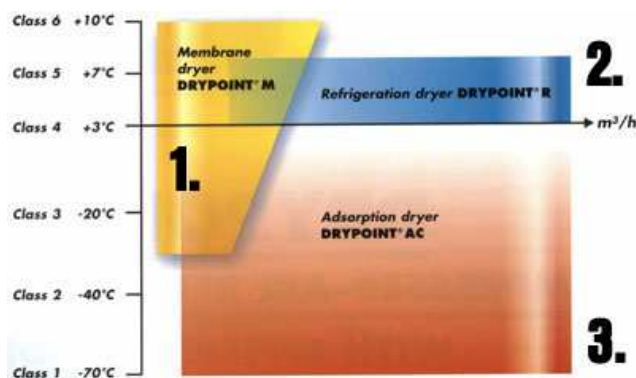
Tab. 4.1 Norma stanovující třídy kvality vzduchu dle množství nežádoucích látek [11]

Třídy kvality vzduchu dle ISO 8573.1:2001	Pevné částice v 1m <sup>3</sup>			Voda	Olej
					
	0,1-0,5 µm	0,5-1 µm	1,0-5 µm	nejvyšší tlakový rosný bod TRB °C	maximální koncentrace mg/m <sup>3</sup>
1	100	1	0	-70	0,01
2	100000	1000	10	-40	0,1
3	-	10000	500	-20	1,0
4	-	-	1000	+3	5
5	-	-	20000	+7	-
6	-	-	-	+10	-

**Poznámka:**  
Uvedené maximální koncentrace jsou vztaženy k 1 bar abs. tlaku +20°C a 60% relativní vlhkosti. Při tlaku vyšším než je tlak atmosférický jsou jednotlivé koncentrace úměrně vyšší.

Nejpoužívanější zařízení na snižování vlhkosti jsou založena na kondenzačním a adsorpčním principu. Jelikož odlučování vlhkosti probíhá za vyšších tlaků (okolo 10 barů) místo teploty rosného bodu se zavádí pojem **tlakový rosný bod** - charakterizující stav nasycení vzduchu, při aktuálním (provozním) tlaku.

Volba správného zařízení pro snižování obsahu vodních par ve vzduchu je velice důležitá, né každé zařízení je však schopno dosáhnout požadovaných parametrů.

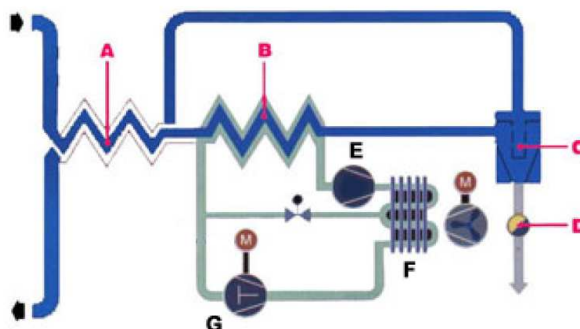


Obr. 4.2 Hodnoty dosažitelných tlakových rosných bodů [4]

1 – Membránová sušička, 2 – Kondenzační sušička, 3 – Adsorpční sušička

## 4.1 Kondenzační sušiče vzduchu

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších způsobů pro snižování vlhkosti v běžných provozech, využívající ochlazování vzduchu s kondenzací, odvodem kondenzátu a následným ohřevem (viz. kapitola 3.1.1). Na obrázku 4.3 je znázorněn princip funkce kondenzační sušičky.



Obr. 4.3 Princip funkce kondenzační sušičky [6]

A – Výměník vzduch/vzduch, B – Výměník vzduch/chladivo (výparník chlad. okruhu), C – Odlučovač, D – Odvaděč kondenzátu, E – Kompresor chladicího okruhu, F – kondenzátor, G – expanzní ventil

### Princip činnosti

Vlhký a teplý vzduch stlačený kompresorem vstupuje do systému sušiče, kde je nejprve ochlazován vystupujícím (již vysušeným) vzduchem ve výměníku A (vzduch/vzduch). Tímto předchlazením se sníží teplota vzduchu z 30 – 40°C na 15 – 20°C a částečně zde nastává kondenzace vodních par. Dále vzduch prochází výměníkem B (vzduch/chladivo), kde je ochlazován až na hodnotu tlakového rosného bodu, tím dojde ke kondenzaci v celém objemu vzduchu. Vzduch proudí společně s kondenzátem do odlučovače C, kde je kondenzát separován pomocí automatického odvaděče D. Studený a vysušený vzduch proudí do výměníku A, kde je zpětně ohříván vstupujícím vzduchem. Tímto se sníží jeho relativní vlhkost a na výstupu získáváme suchý vzduch.

### Oběh chladiva

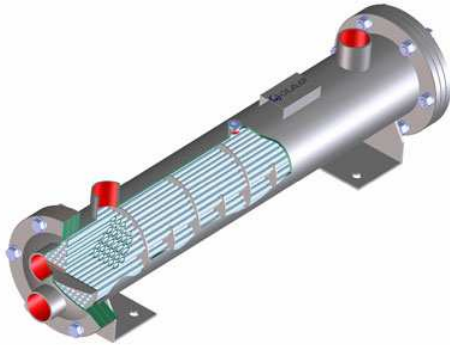
Chladivový systém funguje na principu kondenzátoru a výparníku. Ve výparníku B (chladiči) dochází k vypařování chladicí kapaliny, která odebírá teplo odvlhčovanému vzduchu. Odpařenou chladicí kapalinu nasává a stlačuje kompresor E. Stlačené chladivo proudí do kondenzátoru F, kde je mu odebráno teplo a dochází k jeho zkapalnění. Stlačená a zkapalněná chladicí látka proudí přes expanzní ventil G, zde se snižuje její tlak a je umožněno odpaření ve výparníku B. Tím je chladicí cyklus uzavřen.

### Výměníky tepla

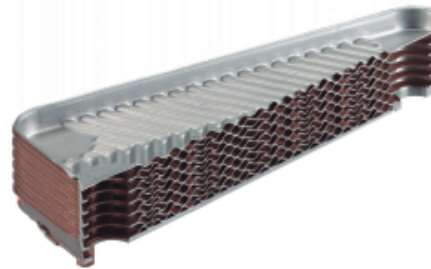
Funkce výměníku A (vzduch/vzduch) v sušiči je velice důležitá. Probíhá zde tepelná výměna bez vnějšího zdroje energie. Teplota vstupujícího vzduchu se snižuje a chladivový systém umístěný za výměníkem A vykoná méně práce potřebné k dosažení tlakového rosného bodu.

Dochlazovací výměníky B (vzduch/chladiivo) obsahují úzké proudové kanály s velkou stykovou plochou (aby nedocházelo k obtokovému efektu viz. kapitola 3.1.1) a jsou uzpůsobeny tak, aby se na výstupu z chladiče tvořily velké kapky.

V kondenzačních sušičkách se používají zejména výměníky deskové (obr. 4.5), vyráběné z korozivzdorných ocelí.



Obr. 4.4 Trubkový výměník tepla [16]

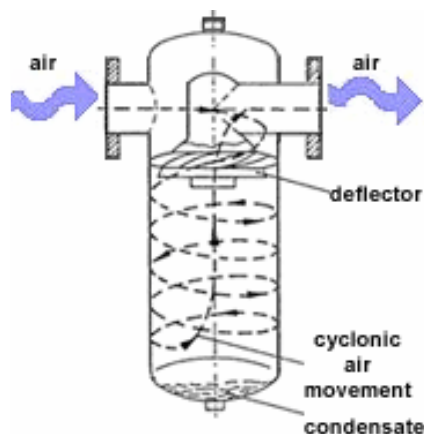


Obr. 4.5 Deskový výměník tepla [17]

## Odlučovače vlhkosti

Aby mohlo dojít k separaci vlhkosti v požadované kvalitě, skládají se odlučovače z několika částí. Základ tvoří cyklonový odlučovač.

**Cyklonový odlučovač** – Zde dochází při vyšší rychlosti proudění vzduchu k odloučení většiny kondenzátu. Odlučovač funguje na odstředivém principu. Vzduch vstupuje do odlučovače, je usměřňován deflektorem, který vytváří spirálovité proudění. Vodní kapky jsou zachytávány na plášti odlučovače (schéma obr. 4.6).



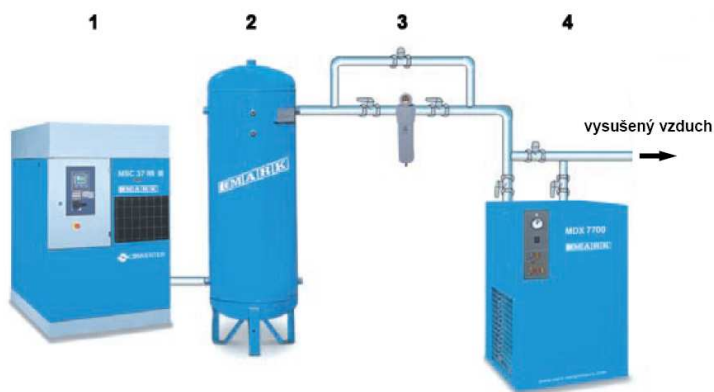
Obr. 4.6 Cyklonový odlučovač [13]

Použitím pouze cyklonového odlučovače by jsme suchý vzduch nezískali. Pro odloučení dalších vodních částic se využívá zpomalení proudění, mikrofiltrů a koalescenčních vložek, kde je zbytková vlhkost slučována do větších kapek. Kapky stékají po plášti odlučovače a hromadí se v jeho spodní části. Odtud je kondenzát následně odváděn.

## Reálný příklad zapojení sušičky



Obr. 4.7 Sušička MDX 50000 - schopná odvlhčit 3000 m<sup>3</sup>/h [14]  
 1 – Chladivový kompresor, 2 – Kondenzátor chladiva, 3 – Ventilátor, 4 – Výparník,  
 5 – Separátor kondenzátu odloučené vlhkosti, 6 – Výměník vzduch/vzduch,  
 7 – Sběrač chladiva, 12 – Obchozí ventil horkého plynu, 13 – Filtr (dehydrátor),  
 16(19) – Ovládací panel, 17 – Filtr hrubých nečistot (ochrana vypouštěcího systému), 18 – Automatické  
 odpouštění kondenzátu



Obr. 4.8 Zapojení sušičky od systému [14]  
 1 – Kompresor, 2 – Vzdušník, 3 – Předfiltr, 4 - Sušička

Pro výrobu stlačeného vzduchu slouží kompresor, za kterým je umístěn vzdušník. Vzdušník vyrovnává tlakové diference vznikající nerovnoměrnou dodávkou vzduchu kompresorem. Před vlastní sušicí zařízením se umísťují vzduchové filtry, odstraňující nežádoucí látky (prach, nečistoty, olej).

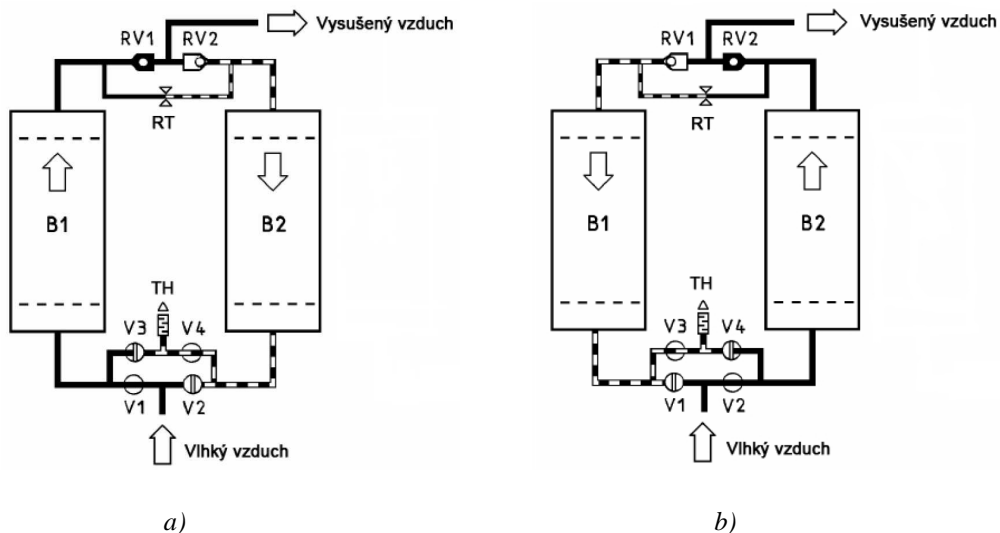
**Použití kondenzačních sušičů** je vhodné pro teploty okolí  $t > 15\text{ °C}$  a relativní vlhkosti  $\varphi > 35\%$ . Dosažitelný tlakový rosný bod se pohybuje okolo  $+3\text{ °C}$ . Pro získání nižších tlakových rosných bodů než  $3\text{ °C}$  by bylo nutné více stlačit vzduch a snížit teplotu chladicího média. To by způsobilo namrzání výměníku – vymrazovací metoda (vymrazování stlačeného vzduchu na výstupu z kompresoru). Jedná se však o nákladný postup a v porovnání s adsorpcí není ekonomicky výhodný.

## 4.2 Adsorpční sušiče vzduchu

Adsorpční sušiče pracují na principu pohlcování vlhkosti adsorbentem (viz kapitola 3.1.2). Pro plynulý provoz mají tyto sušiče dvě nádoby s adsorbentem, v nichž střídavě probíhá vysoušení a regenerace. Schéma funkce je znázorněno na obr. 4.9

**Sušení v B1 – Regenerace v B2**

**Sušení v B2 – Regenerace v B1**



Obr. 4.9 Princip funkce adsorpční sušičky [9]

V1, V2 (V3, V4) – Čtyřcestné ventily, B1 (B2) – Nádoby s adsorpční látkou, RV1 (RV2) – Zpětné ventily, RT – Regenerační tryska, TH – Tlumič hluku

### Princip činnosti (pro obr. 4.9a)

Vlhký vzduch vstupuje do nádoby B1 přes otevřený ventil V1 (ventil V3 je uzavřen). Vzduch prochází rovnoměrně objemem nádoby B1 skrz adsorbent směrem vzhůru. Tím dochází k sušení vzduchu, který odchází přes zpětný ventil RV1 (RV2 je uzavřen). Část vysušeného vzduchu expanduje přes regenerační trysku RT na téměř atmosférický tlak do nádoby B2. Zde dochází k regeneraci adsorbentu vzduchem procházejícím směrem dolů. Regenerační vzduch nasycený vlhkostí odchází přes ventil V4 (V2 je uzavřen) a tlumič hluku do atmosféry.

Po nasycení adsorbentu v nádobě B1 dojde k přepnutí (pomocí čtyřcestných ventilů) do polohy znázorněné na obr. 4.9b a proces probíhá analogicky. Aby nedocházelo k tlakovým rázům, musí před přepnutím proběhnout fáze tlakování. V této fázi jsou oba ventily V3 a V4 uzavřeny, v regenerované nádobě se postupně zvyšuje tlak až na provozní hodnotu.

### Adsorbent

Adsorbent je látka schopná svým povrchem (300-500 m<sup>2</sup>/g) pojmout velké množství vodní páry [19]. Jako vysoušecí látky se běžně používají silikagely (Oxid křemičitý SiO<sub>2</sub>), aktivovaná zemina (oxid hlinitý Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nebo molekulární síta (krystalické kovo-hlinitosilikáty či zeolity) v podobě kuliček (granulí) [7].



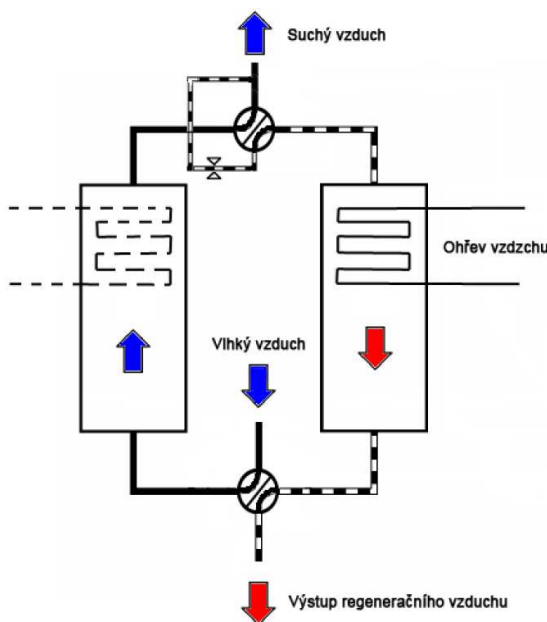
Obr. 4.10 Silikagel [8]

Molekulární síta jsou kovové aluminosilikáty krystalické struktury [10], umožňující adsorbovat pouze molekuly určité velikosti. Adsorpce ostatních částic je vyloučena.

## Regenerace

Regeneraci (desorpci) adsorbentu lze provádět **horkým vzduchem** o teplotě 100-400 °C (v závislosti na druhu adsorbentu). Při těchto teplotách je vzduch schopen pojmout velké množství vodních par. Proces je schématicky znázorněn na obrázku 4.11.

Část vysušeného vzduchu je vracena přes regenerační trysku zpět do systému. Po snížení tlaku a ohřevu vzduchu probíhá desorpce prostupem vzduchu přes regenerovanou látku.



Obr. 4.11 Regenerace adsorbentu horkým vzduchem

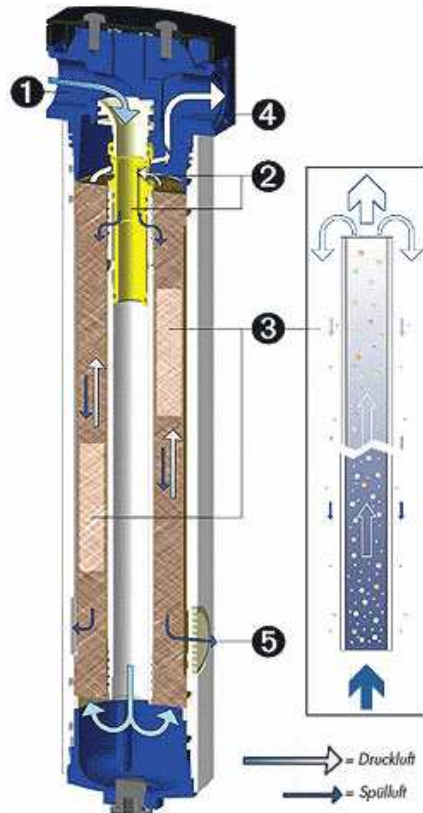
Druhý způsob regenerace, častěji využívaný u adsorpčních sušičů, je **pomocí změny tlaku** (viz obr. 4.9). Provozní tlak vzduchu v sušící větvi je po průchodu regenerační tryskou snižován na tlak atmosférický. Vzduch v tomto stavu prochází přes regenerovanou látku a díky tlakové změně ji vysušuje.

Vzhledem k platným fyzikálním zákonům je důležité, aby vzduch při sušení prostupoval přes sušící médium směrem vzhůru a při regeneraci směrem dolů. Tak se zabrání strhávání vodních částic vzduchem při sušení a naopak usnadní odvod částic při regeneraci.

**Použití adsorpčních sušičů** je vhodné zejména tam, kde požadujeme vzduch tříd vyšší kvality s velmi nízkým obsahem vody a nežádoucích částic. Dosažitelné tlakové rosné body se pohybují okolo -70°C.

### 4.3 Membránové sušiče vzduchu

Snižování vlhkosti vzduchu lze provádět také pomocí membránových sušičů. Zde probíhá odlučovací proces pomocí svazků dutých vláken. Schéma funkce je na obr. 4.12



Obr. 4.12 Membránový sušič [5]

#### Princip činnosti:

Vlhký vzduch vstupuje do sušiče (1) a proudí v naznačeném směru trubící dolů. Následně proudí vně trubice nahoru, přes membrány tvořené svazky dutých vláken (3). Při proudění dochází k protlačování molekul vody stěnami membrány, vzduch se vysušuje a odchází ze sušiče (4). Část výstupního vzduchu (2) expanduje na atmosférický tlak a vrací se zpět do zařízení. Zde prochází (směrem dolů) prostorem mezi membránami a díky nižšímu tlaku přijímá odloučenou vlhkost a vychází přes tlumič hluku (5) ze systému.

**Použití membránových sušičů:** Funkce těchto zařízení je založena na fyzikálních zákonech a probíhá bez vnějšího zdroje energie. To je velká výhoda, které lze využít například ve zdravotnictví (dýchací zařízení). Pomocí těchto sušičů lze dosáhnout tlakových rosných bodů okolo  $-40^{\circ}\text{C}$ .

## Závěr

Podstatou všech sušících zařízení, pracujících na nejrůznějších principech, je snižování hodnoty rosného bodu vzduchu. Tím je zaručena požadovaná kvalita. Pokud teplota vzduchu neklesne pod teplotu rosného bodu, nedojde k nežádoucí kondenzaci vodních par na okolních předmětech.

Tam, kde se nevyplatí použití energetických zařízení, stačí pro eliminaci nežádoucích vlivů vysoké vlhkosti intenzivní větrání. Místa, jako jsou vlhké sklepy nebo povodněmi zasažené domy se vysušují vytápěním a rychlým větráním. Ohřátý vzduch pojme část vlhkosti a ta je vynesena při větrání do okolí. Sušiče vzduchu používáme tam, kde je v sázce bezpečnost lidí, komfort či ochrana nejrůznějších komponentů a zejména tam kde se nám investice do jejich provozu vrátí.

Sušiče nalézají své uplatnění například v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu, ve výrobě elektrotechniky, plastů, skla na zimních stadionech, lakovnách, ale i v dopravních prostředcích.

Kondenzační sušičky nabízejí rozumný poměr mezi cenou a výkonem. Jejich nevýhodou je nutnost rozběhu naprázdno, pro dosažení stanovené kvality vzduchu. Dosažitelné tlakové rosné body se u kondenzačních sušiček pohybují kolem  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Adsorpční sušiče jsou náročnější na kvalitu vstupního vzduchu, dosahují však vyšší kvality odvlhčení než sušiče kondenzační, ale také za vyšší cenu. Dosažitelný tlakový rosný bod je až  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U adsorpčních sušičů je třeba zabezpečit, aby nedošlo k zanesení adsorbentu nežádoucími látkami a tím k omezení funkce sušiče. Nosičem kondenzátu je zde vzduch, proto mohou být sušičky při jeho vypouštění hlučné.

Membránové sušičky nedokáží odvlhčit takové množství vzduchu jako sušiče adsorpční či kondenzační, ale jsou malé, lehké a fungují bez zdroje elektrické energie. Tímto způsobem dosahujeme tlakových rosných bodů kolem  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Důležitým faktorem pro volbu sušícího zařízení jsou provozní podmínky při kterých bude toto zařízení pracovat. Při vyšším provozním tlaku probíhá odvlhčování snadněji než při tlaku nižším. S rostoucí teplotou okolí se odvlhčovací schopnosti sušiček snižují a naopak. V této závislosti můžeme regulovat průtok vzduchu sušícím zařízením, či vybrat vhodný přístroj bez předimenzování.

Kombinací způsobů odvlhčování popsaných v této práci, lze sestavit libovolné zařízení sloužící k odvlhčování vzduchu. Základem návrhu však musí být energetická výhodnost daného zařízení.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Československá akademie věd. *Ilustrovaný encyklopedický slovník : I. díl (A - I)*. 1. vydání. Praha: Academia, 1980. 976 s.
- [2] Chyský, J. *Vlhký vzduch*. 2. vydání. Praha 1 : SNTL, 1977. 160 s.
- [3] Pavelek, M. a kol. *Termomechanika*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o Brno, červen 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [4] Beko Bohemia s.r.o. *Sušení dle ISO 7183.1*. [online]. 2009, [cit. 2011-04-22]. Dostupný z: <<http://www.beko.cz/kondenzacni-susicky-drypoint/>>
- [5] Compressed gas CZ s.r.o. *Membránové sušičky stlačeného vzduchu*. [online]. 2011, [cit. 2011-05-15]. Dostupný z: <<http://www.kompresory-filtry-servis.cz/produkty/uprava-stlaceneho-vzduchu/susicky/membranove-susicky-vzduchu/>>
- [6] Cryo s.r.o. *Kondenzační sušičky*. [online]. 2006, [cit. 2011-04-28]. Dostupný z: <<http://www.az-kompresory.cz/kondenzacni-susicky.html>>
- [7] Cryo s.r.o. *Postupy vysoušení*. [online]. 2006, [cit. 2011-05-06]. Dostupný z: <<http://www.az-kompresory.cz/sorpcni-susicky.html>>
- [8] Číhal, A. *Nebalený silikagel*. [online]. 2011, [cit. 2011-05-10]. Dostupný z: <<http://www.silicagel.cz/prodnb.htm>>
- [9] Filco, spol. s.r.o. *Adsorpční sušič KEA 200-1400*. [online]. 2000, č.1, [cit. 2011-05-09]. Dostupný z: <<http://www.pneukom.cz/text/o/navody-pdf/32.pdf>>
- [10] Filco, spol. s.r.o. *Molekulární síto*. [online]. 2006, [cit. 2011-05-12]. Dostupný z: <<http://www.filco.cz/index.php?node=125>>
- [11] Filco, spol. s.r.o. *Norma ISO 8573-1:2001*. [online]. 2001, [cit. 2011-04-20]. Dostupný z: <<http://www.filco.cz/norma-iso-857312001-cz>>
- [12] Hašek, P. *Tabulky pro tepelnou techniku*. [online]. 1980, [cit. 2011-03-05]. Dostupný z: <<http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/74-slozeni-atmosferickeho-vzduchu>>
- [13] Kaeser kompressoren. *Cyklonový odlučovač*. [online]. 2009, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z: <[http://www.kaeser.sk/Products\\_and\\_Solutions/Air\\_treatment/Centrifugal\\_separators/default.asp.html](http://www.kaeser.sk/Products_and_Solutions/Air_treatment/Centrifugal_separators/default.asp.html)>
- [14] Mark-compressors. *Kondenzační sušičky*. [online]. 2011, [cit. 2011-05-04]. Dostupný z: <<http://www.okac.cz/katalogy/mark/mark-susice.pdf>>

- [15] Novák, J. *Odpařování vody z cesty*. [online]. 2009, [cit. 2011-03-10].  
Dostupný z:  
<<http://www.mngallery.estranky.cz/fotoalbum/meteogalerie/obecne/odparovani-vody-z-cesty.html>>
- [16] Olaer CZ s.r.o. *Trubkové výměníky tepla*. [online]. 2010, [cit. 2011-04-30].  
Dostupný z:  
<<http://www.olaer.cz/cz-produkty-prehled/cz-produkty-chladice-3/cz-prod-kuehl-rohrbund.htm>>
- [17] Procházková, Iveta. *Úprava stlačeného vzduchu*. *Automa* [online]. 2000, č.10, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z:  
<[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=27915](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27915)>
- [18] Sázovský, M. *Vnitřní povrchová kondenzace izolačního skla*. [online]. 2011, [cit. 2011-03-10]. Dostupný z: <<http://sazovsky.com/2011/03/03/vnitri-povrchova-kondenzace-izolacniho-skla/>>
- [19] Siemens building technologies, Landis & Staefa Division.  
*h-x diagram - Konstrukce a použití*. [online]. 2000, [cit. 2011-03-20]. Dostupný z:  
<[http://www.planicka.eu/0\\_Download/CZ\\_h-x.pdf](http://www.planicka.eu/0_Download/CZ_h-x.pdf)>
- [20] [www.artemis.osu.cz](http://www.artemis.osu.cz). *Tlak vzduchu*. [online]. 2001, [cit. 2011-03-11]. Dostupný z:  
<[http://artemis.osu.cz/MMi/meteo1/diplomka/Ramec2\\_soubory/AAA/tlak1.html](http://artemis.osu.cz/MMi/meteo1/diplomka/Ramec2_soubory/AAA/tlak1.html)>
- [21] [www.meteocentrum.cz](http://www.meteocentrum.cz). *Extrémy tlaku vzduchu*. [online]. 2007-2011, [cit. 2011-03-11]. Dostupný z:  
<<http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/tlak-vzduchu.php>>

## Související literatura

- Schneider-bohemia. *Sušení stlačeného vzduchu*. Autoexpert [online]. 2007, [cit. 2011-05-17]. Dostupný z:  
<[www.schneider-bohemia.cz/userfiles/inthepress/d1h8ix8zgsscol42/09vzduch.pdf](http://www.schneider-bohemia.cz/userfiles/inthepress/d1h8ix8zgsscol42/09vzduch.pdf)>
- Schwarzer, J. *Vlhký vzduch a jeho úpravy*. [online]. 2006, [cit. 2011-05-17].  
Dostupný z:  
<[http://www.fsid.cvut.cz/~schwajan/schwarzer\\_soubory/Soubory/Vlhky\\_vzduch/vv.pdf](http://www.fsid.cvut.cz/~schwajan/schwarzer_soubory/Soubory/Vlhky_vzduch/vv.pdf)>
- Trepka P. *Úpravy vlhkého vzduchu v klimatizačních zařízeních* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. [cit. 2011-05-16] 54 s.  
Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Eva Janotková, CSc.  
Dostupné z:  
<[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29164](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29164)>
- Ústav automatizace a informatiky. *Výroba a rozvod stlačeného vzduchu*. [online]. VUT Brno 2011, [cit. 2011-05-15].  
Dostupný z: <[www.umt.fme.vutbr.cz/~svechet/main/storage/vp2/cpt02.ppt](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~svechet/main/storage/vp2/cpt02.ppt)>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Znak	Popis	Jednotka
$\bar{c}_p$	Střední měrná tepelná kapacita vodní páry	[kJ/kg.K]
$c_v$	Střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu za stálého tlaku	[kJ/kg.K]
$c_w$	Měrná tepelná kapacita kondenzátu	[J/kg.K]
$i$	Měrná entalpie vlhkého vzduchu	[kJ/kg s.v.]
$I$	Entalpie vzduchu	[J]
$i_p$	Měrná entalpie vodní páry	[kJ/kg]
$i_p''$	Měrná entalpie vodní páry ve stavu sytém	[kJ/kg]
$i_v$	Měrná entalpie suchého vzduchu	[kJ/kg]
$i_w$	Měrná entalpie zkondenzované vlhkosti	[J/kg]
$l_{23}$	Měrné výparné teplo vody (při 0°C)	[kJ/kg]
$m_k$	Hmotnost vody	[kg]
$m_p$	Hmotnost vodní páry	[kg]
$m_p''$	Hmotnost vodní páry ve stavu sytém	[kg]
$m_l$	Hmotnost ledu	[kg]
$m_v$	Hmotnost suchého vzduchu	[kg]
$\dot{m}_v$	Hmotnostní tok suchého vzduchu	[kg/s]
$\dot{m}_w$	Hmotnostní tok zkondenzované vlhkosti	[kg/s]
$p$	Celkový tlak vzduchu	[Pa]
$p_p$	Tlak vodní páry	[Pa]
$p_p''$	Tlak vodní páry ve stavu sytém	[Pa]
$p_v$	Tlak suchého vzduchu	[Pa]
$\dot{Q}$	Celkový tepelný tok	[W]
$\dot{Q}_c$	Citelný tepelný tok	[W]
$\dot{Q}_{lat}$	Latentní tepelný tok	[W]
$\dot{Q}_{1,2}$	Celkový odváděný tepelný tok	[W]
$\dot{Q}'_{1,2}$	Tepelný tok odváděný chladičem	[W]
$\dot{Q}'_{2,2}$	Tepelný tok kondenzované vlhkosti	[W]
$\dot{Q}_{2,K}$	Přiváděný tepelný tok při ohřevu vzduchu	[W]
$\dot{Q}_w$	Tepelný tok kondenzované vlhkosti	[W]
$r_p$	Měrná plynová konstanta vodní páry	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$r_v$	Měrná plynová konstanta suchého vzduchu	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$T$	Teplota vzduchu	[K]
$t$	Teplota vzduchu	[°C]
$t_2$	Teplota výstupního vzduchu	[K]
$t_m$	Teplota mokrého teploměru	[°C]
$t_r$	Teplota rosného bodu	[°C]

$V$	Celkový objem (vlhkého vzduchu)	$[m^3]$
$V_p$	Objem vodní páry	$[m^3]$
$V_v$	Objem suchého vzduchu	$[m^3]$
$x$	Měrná vlhkost vzduchu	$[kg/kg \text{ s.v.}]$
$\delta$	Směrové měřítko	$[-]$
$\vartheta$	Faktor citelného tepla	$[-]$
$\xi$	Hmotnostní podíl páry ve vzduchu	$[kg/kg \text{ v.v.}]$
$\rho_p$	Hustota vodní páry	$[kg/m^3]$
$\rho_p''$	Hustota vodní páry ve stavu sytém	$[kg/m^3]$
$\varphi$	Relativní vlhkost vzduchu	$[\%]$
$\phi$	Absolutní vlhkost vzduchu	$[kg/m^3]$
$\Delta$	Symbol změny stavu	
1,2,2',K S,A,B,X	Indexy popisující daný stav vzduchu	