

Martin PECHAR  
Phar Service a.s.

# Regulace vlhkosti vzduchu podle teploty rosného bodu

## Air Humidity Control According to Dew Point Temperature

Recenzent  
Ing. Jiří Frýba

Autor článku popisuje vhodný způsob regulace vlhkosti vzduchu při provozu klimatizačního zařízení aplikovaný pro výrobní prostory ve farmaceutickém průmyslu. Při použití původního SW pro automatickou regulaci, který řídil obsah vlhkosti ve vzduchu přímo podle snímané hodnoty relativní vlhkosti, docházelo někdy k nevhodným stavům: např. k souběhu funkce zvlhčování a odvlhčování vzduchu v paralelně pracujících klimatizačních jednotkách nebo v jiném případě, kdy byla využívána ke zvlhčování vzduchu pára z centrálního zdroje o teplotách nad 100 °C, byl v klimatizovaných prostorech zaznamenán i výskyt mlhy.

Řešení těchto i dalších problémů spočívalo ve změnách, popisovaných v článku. Autor tímto způsobem poskytuje přístupnou formou prakticky využitelné instruktivní informace, které mohou být úspěšně využity při provozu obdobných zařízení.

**Klíčová slova:** klimatizace, regulace vlhkosti, farmaceutický průmysl

Author of the article describes a suitable way of air humidity control for at air conditioning operation applied at production spaces of pharmaceutical industry. In case of the original SW that automatically and directly controlled the humidity content in the air according to the relative humidity sensing value, it was observed that a simultaneous humidification and dehumidification appeared when the air conditioning units were running. Also, when steam from the central source with temperatures above 100 °C was used for air humidification, the presence of fog was recorded at air conditioned spaces.

Solution of these and further problems consisted of changes described in the article. In this way, author provides practically usable and instructive information that can be successfully applied in operating similar equipment.

**Keywords:** air conditioning, humidity control, pharmaceutical industry

V provozu klimatizačních zařízení se nejčastěji používá regulace relativní vlhkosti. Tento způsob řízení funkce soustav je vhodný pro běžné požadavky.

Při náročnějších aplikacích (jako třeba při výrobě léků) je často třeba zvolit jiný způsob regulace například podle vypočtené okamžité teploty rosného bodu nebo měrné vlhkosti.

### 1. NEVÝHODY REGULACE RELATIVNÍ VLHKOSTI

- ❑ Jedná se o dvouparametrický regulační obvod  $\varphi(t, x)$ , neboť relativní vlhkost se mění:
  - změnou teploty,
  - změnou měrné vlhkosti (tj. změnou obsahu vodních par ve vzduchu).
 Regulace relativní vlhkosti je pak modulována podle regulace teploty.
- ❑ Malá změna teploty vzduchu zvlhčeného resp. odvlhčeného na požadovanou hodnotu může způsobit, že se jeho relativní vlhkost dostane mimo požadovaný limit.
- ❑ Při kondenzačním odvlhčování se jedná o dva nezávislé pochody:
  - a) kondenzační chlazení, při němž se snižuje měrná vlhkost kondenzací vzdušné vlhkosti na chladné ploše výměníku a následné odvádění kondenzátu do kanalizace.
  - b) dohřev zchlazeného vzduchu zbaveného části vodní páry na žádanou teplotu a tím i vlastní snižování relativní vlhkosti.

V prvním kroku kondenzačního odvlhčování, tj. při ochlazování vzduchu na teplotu rosného bodu se zvyšuje relativní vlhkost vzduchu. Výsledná relativní vlhkost je tedy velmi závislá na rychlosti reakce a přesnosti řízení dohřevu vzduchu.

Rozhodující vliv na kvalitu regulace má:

– nastavení PID regulátorů ohřevu a ochlazování vzduchu

- stabilita parametrů chladicí a topné vody
- dodržení konstantního průtoku přiváděného vzduchu.

### 2. VOLBA ŘEŠENÍ SYSTÉMU AUTOMATICKÉ REGULACE VLHKOSTI PRO NÁROČNĚJŠÍ APLIKACE

Východiskem pro volbu vhodného řešení byly následující skutečnosti:

- ❑ Běžné požadavky na stavové hodnoty vzduchu ve farmaceutické výrobě jsou:
  - teplota 18 °C resp. 20 až 24 °C
  - relativní vlhkost 40 až 60 %.
- ❑ Bylo třeba zvolit takový mechanismus regulace vlhkosti, u kterého by se odstranila jeho závislost na teplotě vzduchu v rozmezí požadovaných teplot. Nejvhodnější se jevila regulace podle měrné vlhkosti resp. podle teploty rosného bodu. Tyto metody jsou ekvivalentní, protože mezi nimi platí následující souvislost: pro každou hodnotu měrné vlhkosti při daném atmosférickém tlaku existuje jen jedna teplota rosného bodu.
- ❑ Pro určení podmínky, zda na povrchu chladiče může ještě probíhat kondenzace, tj. jestli je ještě účelné přiváděný vzduch odvlhčovat, je třeba mít možnost porovnávat teplotu jeho rosného bodu a střední teplotu povrchu chladiče vzduchu. Proto byla z důvodů názornosti a přímé vazby na rychlé určení této podmínky odvlhčování zvolena regulace podle teploty rosného bodu.
- ❑ Pokud v klimatizovaných prostorech není umístěn žádný zdroj vlhkosti, mají vliv na měrnou vlhkost vzduchu v klimatizovaném prostoru pouze parametry přivodního vzduchu. Proto lze regulovat vlhkost vzduchu v klimatizovaném prostoru řízením parametrů přivodního vzduchu. Tím se podstatně omezí dopravní zpoždění regulačního obvodu a systém je stabilnější.

### 3. VÝHODY REGULACE VLHKOSTI ŘÍZENÍM TEPLoty ROSNÉHO BODU

- ❑ snížení resp. odstranění závislosti řízení vlhkosti vzduchu na jeho teplotě;
- ❑ větší stabilita regulačních obvodů při přechodových stavech;
- ❑ zvýšení rychlosti reakce regulačních obvodů omezením dopravního zpoždění;
- ❑ možnost smysluplné regulace vlhkosti směsi proudů vzduchu z více zdrojů o různých teplotách a relativních vlhkostech s dodržением výsledných parametrů vzduchu po smísení v prostoru resp. v odtahu vzduchu;
- ❑ zabránění provozu odvlhčovacího režimu (tj. chlazení a ohřevu vzduchu) v případě, kdy chlazení není kondenzační neboť střední teplota povrchu chladiče má vyšší teplotu než je teplota rosného bodu upraveného vzduchu. Z toho důvodu se na výměníku nevylučují kapky kondenzátu a nemůže tak již dojít odvlhčování.
- ❑ univerzálnost z hlediska použití různých typů parního zvlhčování i různých typů odvlhčování (kondenzačního i adsorpčního);
- ❑ zlepšení diagnostiky závad snímačů relativní vlhkosti regulačního ře-  
tězce a monitoringu.

### 4. ZÁKLADNÍ PARAMETRY NAVRŽENÉ REGULACE

#### 4.1 Střední teplota povrchu chladiče

Pro provozní účely stačí běžně používaný hrubý odhad. Potom lze dovodit, že střední hodnota povrchu výměníku při kondenzačním chlazení vodou je přibližně rovna průměru mezi teplotou chladicí vody na přívodu do výměníku a na výstupu z výměníku zvýšenému o cca 1 K (korekce na přestup tepla voda/materiál výměníku/vzduch). Teplota chladicí vody na přívodu je okolo 7 °C, chladiče jsou mírně předimenzovány a tak se po většinu roku nevrací voda o vyšší teplotě než 12 °C.

Potom běžná střední teplota povrchu chladiče je cca = 10,5 °C

V obr. 1 je tato teplota označena červenou čarou a pole, při kterém lze kondenzačně odvlhčovat je vyznačeno modrou barvou. Je zřejmé, že pro střední teplotu povrchu výměníku 10,5 °C lze odvlhčovat vzduch o teplotě 24 °C až na 42 % r. v., zatímco 18 °C vzduch nelze již odvlhčovat pod 61 % r. v. Pro každou teplotu lze tedy určit hranici relativní vlhkosti odvlhčení – leží na průsečíku čáry isotermy dané teploty s čarou měrné vlhkosti odpovídající střední teplotě povrchu chladiče (v našem případě červená čára na hranici modrého pole).

#### 4.2 Určení žádané teploty rosného bodu pro zvlhčování

Mez teploty rosného bodu pro zvlhčování se určí pro bod určený průsečíkem nejvyšší povolené teploty a nejnižší požadované vlhkosti vzduchu.

Na obr. 2 je tato teplota naznačena fialovými čarami pro 2 stavy vzduchu:  
22 °C, 40 % r. v. =>  $t_b = 9,7$  °C  
20 °C, 40 % r. v. =>  $t_b = 7,8$  °C

Běžně se žádaná hodnota nastavuje na hodnoty 8,5 až 9 °C, které pro většinu vyzkoušených aplikací vyhovují.

#### 4.3 Určení žádané teploty rosného bodu pro odvlhčování

Mez teploty rosného bodu pro odvlhčování se určí pro bod určený průsečíkem nejnižší povolené teploty a nejvyšší požadované vlhkosti.

Na obr. 3 je tato teplota naznačena modrými čarami pro 2 stavy:  
20 °C, 60 % r. v. =>  $t_b = 12$  °C (tj. nad teplotou rosného bodu),  
18 °C, 60 % r. v. =>  $t_b = 10,2$  °C (tj. pod teplotou rosného bodu – odvlhčení při teplotě výstupního vzduchu 18 °C a teplotě povrchu chladiče 10,5 °C potom bude na 61 % r. v.)

Běžně se žádaná hodnota nastavuje na hodnoty 10,5 až 11 °C, které pro většinu našich aplikací vyhovují.

#### 4.4 Volba šířky neutrálního (mrtvého) pásma

Aby přechodové děje při rychlejších skokových změnách nepřepínaly režimy zvlhčování/odvlhčování, je podle našich zkušeností vhodné zvolit neutrální (mrtvé) pásmo cca 2 K mezi žádanými hodnotami teplot rosných bodů těchto režimů.

Tzn. např. zvlhčování  $t_b = 8,5$  °C => odvlhčování  $t_b = 10,5$  °C.

#### 4.5 Mez vypínání zvlhčovače

Pro omezení maximální relativní vlhkosti vypínáním zvlhčování vzduchu (např. při poklesu teploty vzduchu) je vytvořen softwarový hygrostat s pevně nastavenými hranicemi relativní vlhkosti. Zvlhčovač je vypínán při 80 % a opět zapínán při 70 % relativní vlhkosti vzduchu. Hodnota 75 % r. v. zobrazená v červeném poli je střední hodnota omezení, které má tedy hysterezi ± 5 %.

### 5. PŘÍKLADY POUŽITÍ

Předkládáme zde příklady použití této regulace ve farmaceutickém průmyslu – v podniku Zentiva a.s. Grafy monitoringu teploty a vlhkosti ve výrobních i skladovacích prostorech jsou zde archivovány a slouží jako doklad dodržení předepsaných parametrů při výrobě pro jistění jakosti a jako důkaz pro kontrolní orgány.

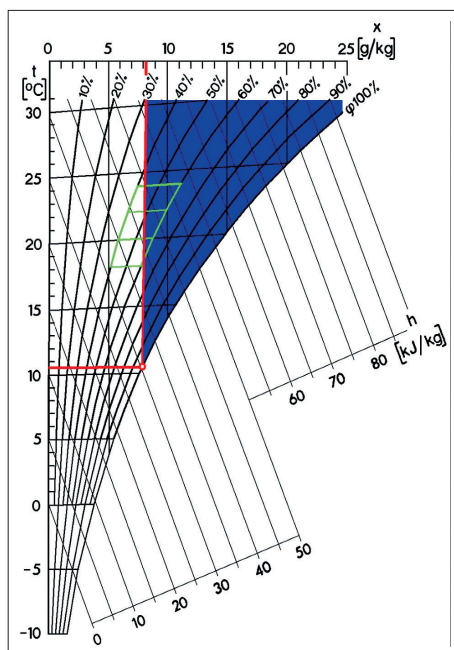
a) Regulace vlhkosti vzduchu podle teploty rosného bodu byla zde poprvé navržena pro případ, kdy tři klimatizační jednotky dodávají vzduch do dvou provozních místností s velkými tepelnými zisky od strojů (cca 100 kW) a jedna z nich dodává část vzduchu do kanceláří. Požadavek na teplotu vzduchu v prostorech je 18 až 24 °C, dolní mez relativní vlhkosti v odtahu při zvlhčování je 40%, horní mez při odvlhčování je 60 %. Teplota přiváděného vzduchu do kanceláří by měla být okolo 22 °C. Popisovaný způsob odstranil stavy, kdy se při různých teplotách vzduchu na výstupech z klimatizačních jednotek vzduch v některé z nich zvlhčoval a zároveň v jiné se vzduch odvlhčoval.

b) Další případ použití se týkal provozu, kde pro zvlhčování vzduchu byl použit parní zvlhčovač připojený na centrální rozvod páry. Použitá pára má teplotu cca 117 °C a ovlivňuje řízení teploty vzduchu více než je tomu u zvlhčovačů s elektrickým vyvíječem páry. Zdroj páry (přívod z kotelny) je velmi „tvrdý“, tzn. že je schopen dodat okamžitě velmi velké množství páry. Regulace intenzity zvlhčování musí být proto rychlá. Regulace teploty vzduchu použitím vodního ohříváče je však podstatně pomalejší.

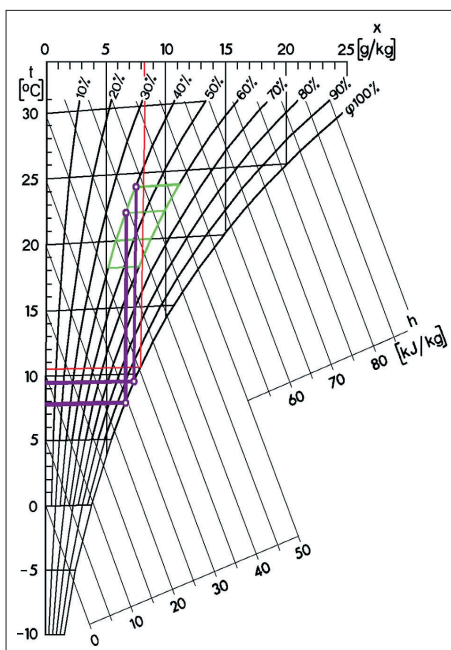
Tato disproporce se projevila v přechodových stavech při spouštění zvlhčovačů, kdy docházelo k zajímavému paradoxu. Požadavek na zvýšení relativní vlhkosti je velký a tedy přívodní regulační ventil zvlhčovače se hodně otevře. Přívod páry tak není v podstatě omezen. Pára zaplní zvlhčovací komoru a zároveň v ní okamžitě ohřeje vzduch, čímž relativní vlhkost tohoto ohřátého vzduchu příliš nestoupne. Regulace teploty vzduchu v tomto případě nestačí tak rychle zareagovat a regulátor relativní vlhkosti umožní, že do zvlhčovací komory proudí stále neúměrně velké množství páry. Z výustek do provozu tak proudí teplý vzduch správné relativní vlhkosti ale s velkým množstvím vodní páry, která se v chladnějším prostoru okamžitě mění v mlhu.

Řízení vlhkosti vzduchu podle teploty rosného bodu (a tím i podle měrné vlhkosti) tento případ eliminuje.

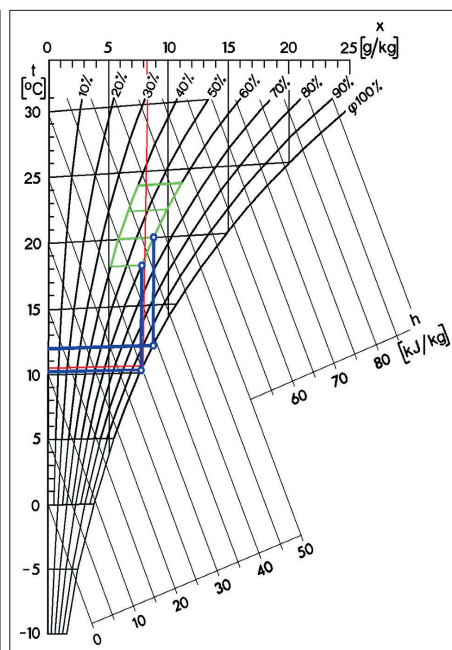
c) Dále byla použita tato regulace u několika desítek zařízení, kdy se podstatným způsobem zklidnila funkce soustavy automatické regulace. Zároveň



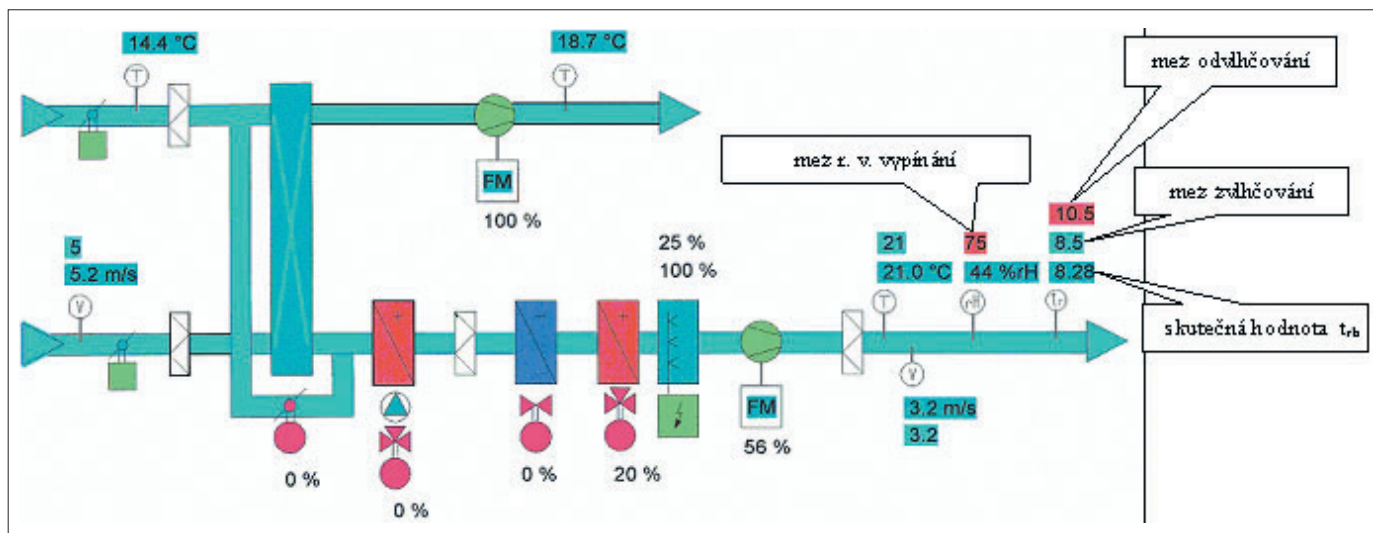
Obr. 1 Určení meze funkčnosti kondenzačního odvlhčování



Obr. 2 Určení mezní teploty rosného bodu pro zvlhčování



Obr. 3 Určení mezní teploty rosného bodu pro odvlhčování



Obr. 4 Příklad grafického výstupu systému řízení vlhkosti (schéma zařízení)

se tím odstraní požadavek na kondenzační odvlhčování v případech, kdy byl fyzikálně nespíitelný. Tím byla ušetřena energie na ochlazení a následné ohřátí přiváděného vzduchu.

## ZÁVĚR

Protože se regulace vlhkosti vzduchu podle teploty rosného bodu v Zenti-va a.s. během dvouleté provozní zkušenosti plně osvědčila ať již z hlediska průběhu a jednoznačnosti regulace tak i z hlediska energetického, je uplatňována při všech nových stavbách v podniku a jsou tak upravovány zpětně všechny stávající aplikace.

Dalším kladem řízení vlhkosti vzduchu podle teploty rosného bodu je i zlepšení povědomí obsluhy o potřebách zvlhčování a odvlhčování podle stavu venkovního vzduchu a pochopení některých aspektů  $h$ - $x$  diagramu v praxi. Nyní je již běžné, že obsluha ví proč:

- ☐ do teploty venkovního vzduchu 9 °C je třeba vždy dovlhčovat,
- ☐ když je venku mlha např. při teplotě 15 °C je třeba vzduch intenzivně odvlhčovat,

- ☐ když je venku mlha např. při teplotě 10 °C není třeba vzduch vlhko-  
ně upravovat,
- ☐ když je venku mlha např. při teplotě 5 °C je třeba vzduch zvlhčovat,
- ☐ je dodržení teploty chladicí vody do 7 °C podmínkou pro správné od-  
vlhčování a že je přímý vztah mezi vývinem kondenzátu vzdušné vlh-  
kosti a teplotou chladiče,
- ☐ při odvlhčování je třeba dodržovat teplotu topné vody i v horkých  
dnech.

Použité symboly a označení:

- $\varphi$  [%] – relativní vlhkost vzduchu
- $t$  [°C] – teplota vzduchu
- $x$  [g/kg s.v.] – měrná vlhkost vzduchu

Spojení na autora: [m.pechar@volny.cz](mailto:m.pechar@volny.cz)

## Použitý zdroj:

- [1] Chyský, J.: Vlhký vzduch (SNTL 1992, 2. vydání)