

# Spoľahlivé meranie stopovej vlhkosti a teploty tlakového rosného bodu pomocou stacionárneho prevodníka testo 6740 (2)

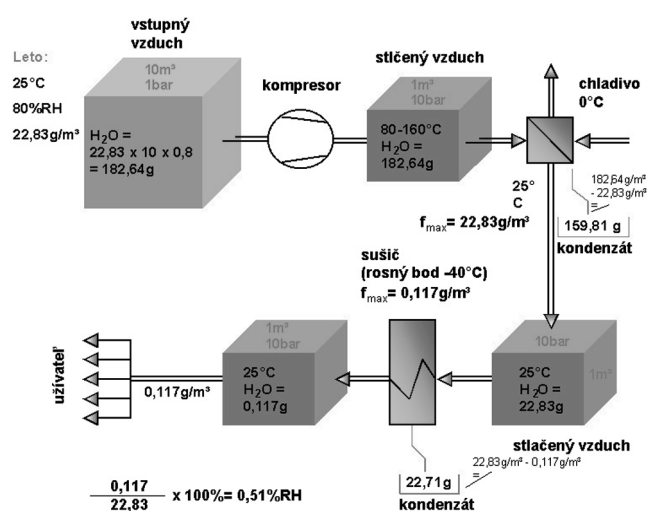
## Ako sa voda dostáva do stlačeného vzduchu?

### Množstvo kondenzátu počas stlačania

Vzduch vždy obsahuje vodu v podobe vodnej pary. Maximálne množstvo vodnej pary – vlhkosti vo vzduchu – závisí od jeho teploty a objemu. Čím vyššia je teplota, tým väčšie množstvo vodnej pary je vzduch schopný nasaf. Keďže voda vo vzduchu nie je stlačiteľná, bude pri zmenšovaní – stlačení objemu vzduchu voda prechádzať do tekutého stavu, začne kondenzovať. Okolité vzduch sa správa ako imaginárna mokrá špongia.

Ak je vzduch v beztlakových podmienkach, je schopný nasaf určité množstvo vody. Ak začneme špongiu stláčať, voda vyteká. Avšak aj keď špongiu stlačíme veľmi veľkou silou, stále v nej zostáva nejaké malé množstvo vody. Toto je porovnateľné so stlačeným vzduchom.

Na príklade z obr. 1 si ukážeme, aké množstvo kondenzátu  $m_k$  sa vytvorí, ak začneme stláčať vzduch. Vychádzajme zo situácie:



Obr.1 Odstraňovanie kondenzátu pri stlačení vzduchu

Leto s teplotou 25 °C, 80 % r. v., normálny atmosférický tlak  $p_1 = 1 \text{ bar}_{abs} = 0 \text{ bar}_{rel}$  (pre dané parametre stavových veličín možno z tabuľky odčítať  $f_{max} = 22,83 \text{ g/m}^3 \text{ H}_2\text{O}$ ).

Predpokladajme objem vzduchu  $V_1 = 10 \text{ m}^3$ . Potom v celom objeme bude mať

$$m_{H_2O} = V_1 \cdot f_{max} \cdot \varphi / 100 = 10 \cdot 22,83 \cdot 0,8 = 182,64 \text{ g}$$

Stlačme uvedený objem  $V_1$  na objem  $V_2 = 1,0 \text{ m}^3$  tlakom  $p_2 = 10 \text{ bar}_{abs} = 9 \text{ bar}_{rel}$ . Počas uvedenej operácie stlačania stúpne teplota vzduchu na hodnoty medzi 80 až 160 °C, teda všetka vodná para H<sub>2</sub>O, obsiahnutá v stlačenom vzduchu, zostáva v plynnom stave (pre teploty + 80 °C je  $f_{max} = 290 \text{ g/m}^3 \text{ H}_2\text{O}$ , takže nedochádza ku kondenzácii).

Ak tlakový vzduch s natoľko vysokým objemom vlhkosti začne pretekať v tlakovom systéme, určite sa postupne vykondenzuje značné množstvo vody. Preto sa na výstup kompresora pridáva chladič, ktorý má za úlohu teplotu stlačeného vzduchu znížiť.

Napríklad ak sa takto stlačený vzduch ochladí, povedzme na rovnakých +25 °C, dochádza k výraznej kondenzácii obsiahnutej vodnej pary, čím relatívna vlhkosť stúpa v stlačenom vzduchu na 100 % a vylúčené množstvo vody  $m_k$  bude:

$$m_k = V_1 \cdot f_{max} \cdot \varphi / 100 - V_2 \cdot f_{max} \cdot \varphi / 100 = 10 \cdot 22,83 \cdot 0,8 - 1 \cdot 22,83 \cdot 1 = 151,81 \text{ g H}_2\text{O}$$

Takto v stlačenom vzduchu s tlakom  $p_2 = 9 \text{ bar}_{rel}$  a teplote +25 °C sa vylúči až 151,81 g vody a v stlačenom vzduchu ostáva iba 22,83 g.

Nová norma ISO 8573-1, ktorá platí v EÚ, opisuje požiadavky na kvalitu stlačeného vzduchu podľa:

- **Obsahu oleja** – určuje zvyškový obsah aerosólov a uhľovodíkov, ktoré môže obsahovať stlačený vzduch.
- **Veľkosti častíc a stlačením** – určuje veľkosť a koncentráciu pevných častíc, ktoré môžu byť obsiahnuté v stlačenom vzduchu.
- **Teploty tlakového rosného bodu** – určuje teplotu, na ktorú je možné ochladzovať stlačený vzduch až po kondenzáciu obsiahnutej vodnej pary. Tlakový rosný bod sa mení podľa tlaku vzduchu.

V tab. 2 sú uvedené triedy stlačeného vzduchu podľa ISO 8573-1.

trieda	max. obsah oleja [mg/m <sup>3</sup> ]	max. obsah častíc		max. obsah stopovej vody	
		veľkosť častíc [µm]	hustota častíc [mg/m <sup>3</sup> ]	stopová voda [g/m <sup>3</sup> ]	tlakový rosný bod [°C]
1	0,01	0,1	0,1	0,00033	-70
2	0,1	1	1	0,117	-40
3	1	5	5	0,88	-20
4	5	15	8	5,953	+3
5	25	40	10	7,732	+7
6	–	–	–	9,356	+10

Tab.2 Triedy stlačeného vzduchu podľa ISO 8573-1

Ak teda v našom príklade na obr. 1 potrebujeme dosiahnuť napr. kvalitu vzduchu 2. triedy, t. j. teplotu tlakového rosného bodu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , musíme do obvodu odstraňovania vody zo stlačeného vzduchu zaradiť ešte jeden stupeň odlúčenia vody pomocou sušiča. Pre tlakový rosný bod  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  sa dosiahne pokles vodnej pary v stlačenom vzduchu na hodnotu  $0,117\text{ g/m}^3$  a vo forme kondenzátu sa vylúči ďalších  $22,71\text{ g H}_2\text{O}$ .

Uvedenému zvyškovému obsahu vodnej pary v stlačenom vzduchu pri výstupnej teplote napr.  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  zodpovedá relatívna vlhkosť:

$$\varphi = \frac{100 \cdot m_k}{V_2 \cdot f_{\max}} = \frac{100 \cdot 0,117}{1,0 \cdot 22,83} = 0,5125\% \text{ r. v.}$$

Takto sme stláčaním vzduchu znížili objem vodných pár v pôvodnom vzduchu asi 195-krát, t. j. vysušili sme ho na relatívnu vlhkosť asi  $0,5125\% \text{ r. v.}$  (z pôvodného objemu  $182,64\text{ g H}_2\text{O}$  zostalo vo vzduchu iba  $0,117\text{ g}$ ).

**Z uvedeného vyplýva, že na meranie teploty tlakového rosného bodu  $t_{pd}$  nám postačuje merať aktuálnu teplotu  $t$  stlačeného vzduchu a relatívnu vlhkosť  $r. v.$**

Ak znížime tlak napr. naspäť na  $p_3 = 0\text{ bar}_{rel} = 1\text{ bar}_{abs}$ , objem nám vzrastie 10-krát na  $V_3 = 10\text{ m}^3$ . Tomu zodpovedá nová relatívna vlhkosť vzduchu:

$$\varphi = \frac{100 \cdot m_k}{V_3 \cdot f_{\max}} = \frac{100 \cdot 0,117}{10 \cdot 22,83} = 0,05125\% \text{ r. v.}$$

Testo vo svojich vlhkomeroch pri výpočte teploty rosného bodu pri atmosférickom vzduchu používa vzťahy podľa DIN 50 010, časť 2, tzv. Magnusov výpočet cez parciálny tlak vodnej pary.

**Parciálny tlak nasýtenej vodnej pary pri teplote  $t$  je daný**

$$e_i = c_1 \cdot \exp \frac{c_2 \cdot t}{c_3 + t}$$

V tab. 3 sú uvedené koeficienty  $c_1, c_2$  a  $c_3$  podľa „Magnusa“.

fáza	$t\text{ }[^{\circ}\text{C}]$	$c_1\text{ [mbar (hPa)]}$	$c_2\text{ [-]}$	$c_3\text{ }[^{\circ}\text{C}]$
nad ľadom	-50,9 ... 0,0	6,10714	22,44294	272,44
nad vodou	-50,9 ... 0,0	6,1078	17,84362	245,425
nad vodou	0,0 – 100	6,1078	17,08085	234,175

**Tab.3**

V našom výpočte budeme uvažovať konštanty:

$$c_1 = 6,1078\text{ mbar (610,78 Pa)},$$

$$c_2 = 17,08085,$$

$$c_3 = 234,175\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Potom napr. pre teplotu okolia  $t = 21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a relatívnu vlhkosť okolia  $\varphi = 48\% \text{ r. v.}$  bude **parciálny tlak nasýtenej vodnej pary**

$$e_i = c_1 \cdot \exp \frac{c_2 \cdot t}{c_3 + t} = 6,1078 \cdot \exp \frac{17,08085 \cdot 21,2}{234,175 + 21,2}$$

$$e_i = 25,217454\text{ mbar}$$

**Parciálny tlak vodnej pary pri relatívnej vlhkosti  $\varphi$  bude**

$$e = \varphi \cdot e_i / 100 = 48 \cdot 25,217454 / 100 = 12,10437792\text{ mbar}$$

**Teplota rosného bodu je daná vzťahom**

$$t_d = \frac{-\ln(e/c_1) \cdot c_3}{\ln(e/c_1) - c_2} = \frac{-\ln(12,1044/6,1078) \cdot 234,175}{\ln(12,1044/6,1078) - 17,08085}$$

$$t_d = 9,76869\text{ }^{\circ}\text{C}$$

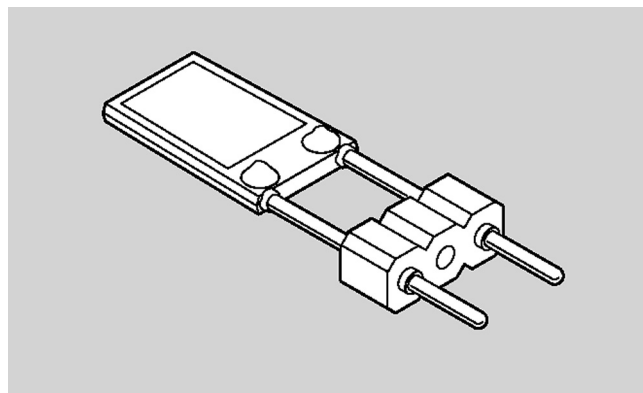
Podľa normy **ISO 8573-1** sa na vyjadrenie kvality vysušenia stlačeného vzduchu môže používať len označenie **teplota tlakového rosného bodu**  $^{\circ}\text{C}_{pd}$ . Teplota atmosférického rosného bodu  $^{\circ}\text{C}_{td}$  je zavádzajúca, a nesmie sa používať. Príklad: Chladič tlakového vzduchu pri tlaku 10 bar má teplotu tlakového rosného bodu  $5\text{ }^{\circ}\text{C}_{pd}$ , čo predstavuje teplotu atmosférického rosného bodu  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}_{td}$ . Teplota atmosférického rosného bodu  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}_{td}$  vyvoláva u používateľa mylnú predstavu o veľmi nízkej vlhkosti vzduchu.

Avšak už pri poklese teploty pod  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  nastáva v stlačenom vzduchu kondenzácia! Preto je označenie  $^{\circ}\text{C}_{td}$  nenáležité!

Niektoré typy meracích prístrojov vzhľadom na ich konštrukciu a použitý snímač neumožňujú merať vlhkosť pod tlakom. Pri týchto prístrojoch je potrebné, aby sa tlak vzduchu znížil na atmosférický, ale tu môže nastať spätná difúzia vlhkosti z okolitého vzduchu. Navyše používateľ musí pomocou tabuliek prepočítavať meranú vlhkosť a teplotu atmosférického rosného bodu na prevádzkový tlak. Takého prístroje nie sú určené na on-line meranie. Okrem toho prístroje uvádzajú aj veľmi široký merací rozsah teploty rosného bodu  $-80\text{ až }90\text{ }^{\circ}\text{C}_{td}$  s presnosťou, ktorá nie je v praxi reálna.

Skúsený prevádzkovateľ by mal pozorne voliť prístroje, ktoré sú schopné priamo merať vo vzduchu pod tlakom, a preto zobrazujú teplotu tlakového rosného bodu. Veľmi často si používatelia nesprávne vyberajú meracie prístroje, ktoré zobrazujú atmosférický rosný bod a majú podstatne väčší merací rozsah. Namiesto nich sú vhodné prístroje, ktoré sú priamo určené do tlakových systémov so zobrazovaním tlakového rosného bodu.

Kapacitný vlhkosťný senzor testo je správny senzor na meranie vlhkosti bez obmedzenia okolitým tlakom.



**Obr.2 Kapacitný vlhkosťný senzor testo**

Testo úspešne rozširuje rozsah aplikácií svojich kapacitných senzorov na meranie vlhkosti:

- aj pri teplotách do  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- meranie teploty rosného bodu od  $-50$  do  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- dlhodobé meranie v extrémnych podmienkach,
- veľmi presné meranie v rozsahu vysokých vlhkostí ( $> 95\% \text{ RH}$ ).

Neprekonateľnými charakteristikami vlhkosťných senzorov testo sú:

- presnosť,
- dlhodobá stabilita,
- teplotná odolnosť,
- robustnosť.

Kvality vlhkosťného senzora testo boli testované a potvrdené v kruhovom teste niekoľkých svetových kalibračných laboratórií.

Ako už bolo uvedené, pre výpočet teploty rosného bodu alebo teploty tlakového rosného bodu potrebujeme merať iba teplotu a relatívnu vlhkosť. Ak zmeníme tlak vzduchu, zmení sa s relatívnu vlhkosťou aj teplota, a úmerne k tomu tiež teplota tlakového rosného bodu.

Pozrime sa, aký je obsah vodnej pary a relatívna vlhkosť vo vzduchu pri nízkych teplotách tlakového rosného bodu.

Tak napr. pri teplote  $t_{pd} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a teplote stlačeného vzduchu  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Podľa tabuľky je pre teplotu  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  objem nasýtenej vodnej pary  $m_k = f_{\max} = 22,83\text{ g/m}^3$ .

Parciálny tlak sýtej vodnej pary bude  $e_i = 31,72\text{ mbar}$  (výpočet z  $i$ ). Parciálny tlak vodnej pary  $e = 0,18\text{ mbar}$  (výpočet z  $t_d$ ), čo predstavuje relatívnu vlhkosť  $\varphi = 0,57\% \text{ r. v.}$

Znamená to, že meranie veľmi nízkych teplôt tlakového rosného bodu je limitované možnosťou presne merať relatívnu vlhkosť. Snímače vlhkosti testo sú schopné merať relatívnu vlhkosť s veľmi vysokou presnosťou  $\pm 1\%$  r. v. (!) pri  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  v rozsahu 10 až  $90\%$  r. v., a to takzvanou precíznou sondou. Ak sa budeme pohybovať pod 10 alebo nad  $90\%$  r. v., presnosť bude  $\pm 2\%$  r. v. Ak meriame pri iných teplotách ako je  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , musíme uvážiť aj teplotný koeficient  $0,03\%$  r. v./K. na výslednú presnosť senzora.

Relatívna vlhkosť  $0,57\%$  r. v. je skutočne veľmi nízka hodnota a jej meranie je poznačené relatívne veľkou chybou merania (viac ako  $275\%$ ). V danom vzduchu je objem vodnej pary  $f = f_{\max} \cdot \varphi / 100 = 22,83 \cdot 0,57 / 100 = 0,130\text{ g/m}^3\text{ H}_2\text{O}$ , čo predstavuje  $130\text{ ppm}$  vody pri normálnom atmosférickom tlaku (výpočtom z tab. 1 je to  $117\text{ ppm}$ )!

Ak budeme mať teplotu rosného bodu  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{rpd}}$ , je to za rovnakých podmienok (teploty) len  $0,05\%$  r. v., čo predstavuje iba  $25\text{ ppm}$  vody pri normálnom atmosférickom tlaku.

*Pokračovanie v budúcom čísle.*

**K TEST**

**K - TEST, s. r. o.**

**Letná 40, 042 60 Košice**

**Tel./fax: 055/625 36 33, 625 51 50**

**e-mail: [ktest@kbc.sk](mailto:ktest@kbc.sk)**

**<http://www.ktest.sk>**

24

