

MB - Príklad 6

Do protiprúdovej sušiarne vstupuje 3500 m³/h horúceho vzduchu pri teplote 60 °C a tlaku 101.3 kPa. Vstupujúci vzduch obsahuje 2.52 g vodných pár na 1 kg suchého vzduchu.

Horúcim vzduchom sa v sušiarňi suší vlhký materiál, ktorý obsahuje na vstupe 50 hmot. % vlhkosti. V priebehu sušenia sa odparí 30 kg/h vody z vlhkého materiálu do horúceho vzduchu, ktorý sa pritom vlhčí a chladí. Na výstupe zo sušiarne je v čiastočne vysušenom materiáli pomer hmotností suchého materiálu (sušiny) a vody 9:1.

Mólová hmotnosť suchého vzduchu je 29 kg/kmol.

Vypočítajte:

1. Hmotnostný tok vstupujúceho vlhkého vzduchu a zloženie vystupujúceho vzduchu v hmotnostných zlomkoch.
2. Hmotnostný tok materiálu po sušení.

SUŠENIE Priamy ohrev... Nepriamy ohrev...

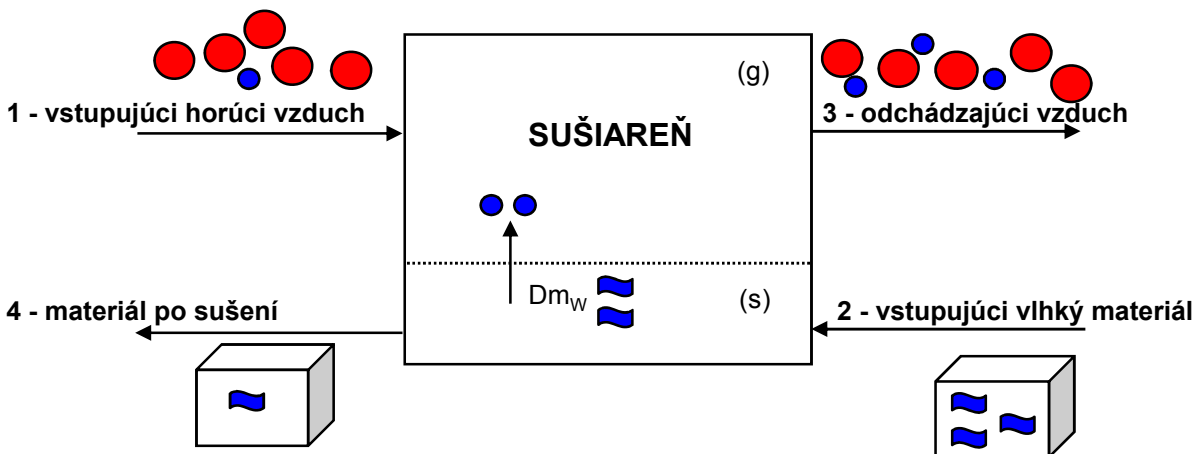
Sušenie je separačný proces, počas ktorého sa vlhký materiál (**tuhá fáza**) suší odparovaním vody buď do privádzaného horúceho vzduchu - **plynna fáza** (priamy styk vlhkého materiálu s ohrevným médiom), alebo prostredníctvom nepriameho ohrevu (horúce médium, napr. vodná para, prúdi v rúrkach a s vlhkým materiálom sa fyzicky nestýka), zohrievajúci vnútro sušiarne.

Sušenie je často finálnou činnosťou vo výrobnom procese (výroba papiera, sušenie dreva, atď.) Sušením vlhkého materiálu sa neodstraňuje vlhkosť len z jeho povrchu, ale aj z vnútra.

Spôsoby sušenia

Priamy ohrev...

1. Sušenie priamym ohrevom (horúci vzduch). Vlhký materiál sa suší privádzaným horúcim vzduchom prúdiacim nad jeho povrchom.



Prúdy:

- 1 – vstupujúci horúci vzduch
- 2 – vstupujúci vlhký materiál
- 3 – vystupujúci vzduch
- 4 – materiál po sušení

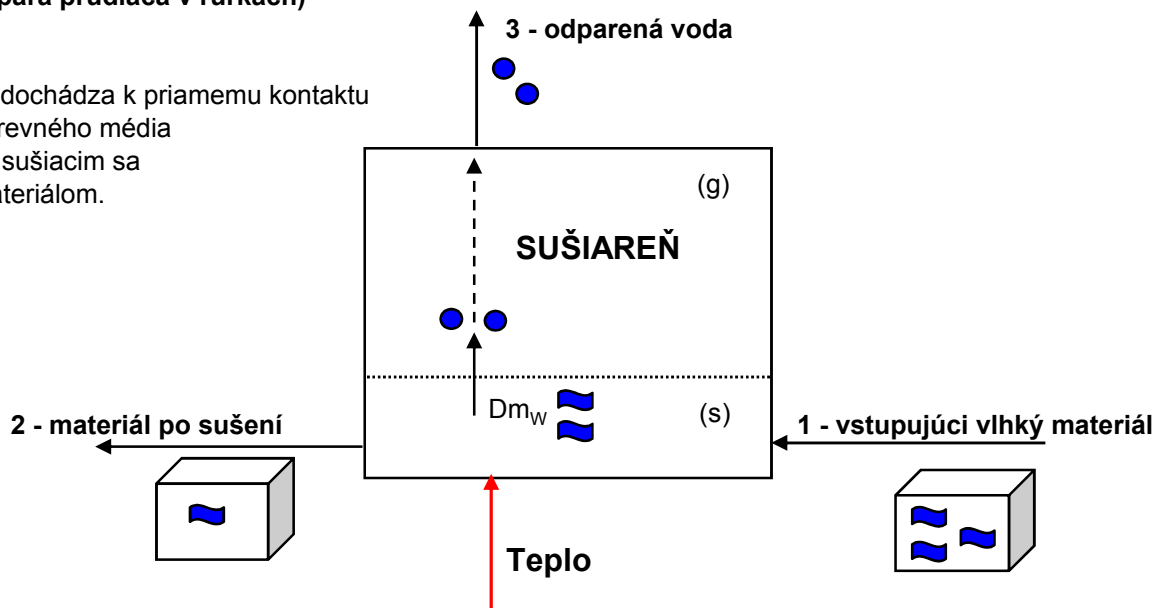
Zložky:

- G - Suchý vzduch
- S - Sušina
- W – Voda resp. vodná para

Nepriamy ohrev...

2. Sušenie vlhkého materiálu nepriamym spôsobom (ohrevným mediom je často vodná para prúdiaca v rúrkach)

Nedochádza k priamemu kontaktu ohrevného média so sušiacim sa materiálom.



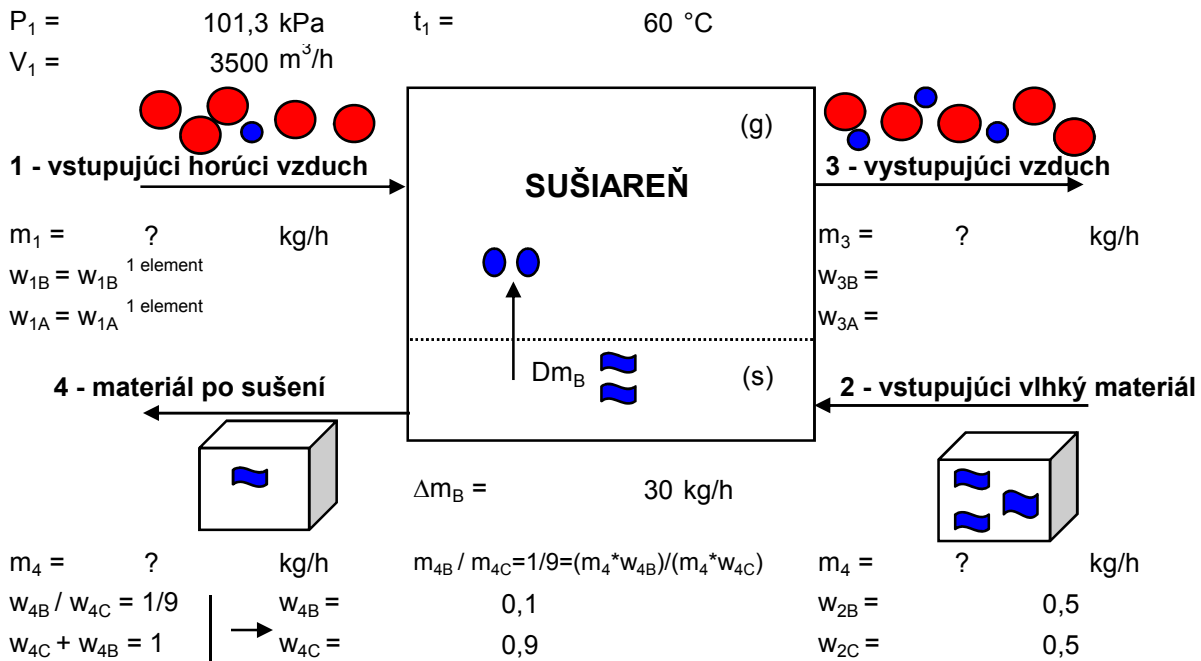
Prúdy:

- 1 – vstupujúci vlhký materiál
- 2 – materiál po sušení zbavený časti vlhkosti
- 3 – odparená voda z vlhkého materiálu

Zložky:

- S** - Sušina
- W** – Voda resp. vodná para

Bilančná schéma:

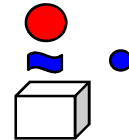


Prúdy:

- 1 – vstupujúci horúci vzduch
- 2 – vstupujúci vlhký materiál
- 3 – vystupujúci vzduch
- 4 – materiál po sušení

Zložky:

- A - Suchý vzduch
- B – Voda resp. vodná para
- C - Sušina



Riešenie:

V bilančnom systéme vystupuje jedno zariadenie (sušiareň), dva vstupujúce, dva vystupujúce prúdy a tri bilancované zložky.

Suchý vzduch je vizuálne reprezentovaný červenými bublinkami, voda resp. vodná para modrými vlnkami resp. bublinkami, sušina je znázorná kockou.

Materiálová Bilancia - úvodný nesmelý pohľad do tajov jej intímnych zákutí.....:

Prúdy Zložky	1	2	3	4
A: Suchý vzduch	$m_1 \cdot w_{1A}$		$m_3 \cdot w_{3A}$	
B: H ₂ O	$m_1 \cdot w_{1B}$	$m_2 \cdot w_{2B}$	$m_3 \cdot w_{3B}$	$m_4 \cdot w_{4B}$
C: Sušina		$m_2 \cdot w_{2C}$		$m_4 \cdot w_{4C}$
Σ	m_1	m_2	m_3	m_4

Zatiaľ navonok vidieť len nepoškvrnenú čistotu...

Veru načim nám najprv poriadne rukávce vysúkať, zopár pomocnými výpočtíkmi materiálovú bilanciu opáčiť a celý proces vnútorného splynutia s ňou úspešne naštartovať....

1. krok výpočtu

Základ výpočtu

Podľa zadania je základom výpočtu objemový prietok vstupujúceho horúceho vzduchu. Vzhľadom k tomu, že materiálové bilancie realizujeme buď v jednotkách hmotnosti alebo látkového množstva, je nutné objemový prietok vzduchu prepočítať na hmotnostný tok alebo tok látkového množstva.

Vzhľadom k ponúkaným informáciám zo zadania bude rozumnejšie riešiť celú materiálovú bilanciu v hmotnostných tokoch a zlomkoch.

Najprv si vypočítame tok látkového množstva vstupujúceho horúceho vzduchu zo stavovej rovnice rovnice ideálneho plynu.

$$P_1 \cdot V_1 = n_1 \cdot R \cdot T_1$$

$$P_1 = 101,3 \text{ kPa}$$

$$V_1 = 3500 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n_1 = 128,01 \text{ kmol/h}$$

$$t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 333,15 \text{ K}$$

$$R = 8,314 \text{ kJ/kmol/K}$$

Následne si dopočítame hmotnostný tok horúceho vzduchu zo vzťahu medzi hmotnostným tokom, tokom látkového množstva a mólovou hmotnosťou horúceho vzduchu.

$$m_1 = n_1 \cdot M_1$$

$$M_1 = \frac{1}{\frac{w_{1A}}{M_A} + \frac{w_{1B}}{M_B}}$$

$$M_A = 29 \text{ kg/kmol}$$

$$M_B = 18 \text{ kg/kmol}$$

$$w_{1A} = 0,997486$$

$$w_{1B} = 0,002514$$

$$m_1 = 3706,5 \text{ kg/h}$$

$$M_1 = 28,956 \text{ kg/kmol}$$

$$n_1 = 128,01 \text{ kmol/h}$$

2. krok výpočtu

Zloženie vystupujúceho vzduchu v hmotnostných zlomkoch

Vstupujúci horúci vzduch je zmesou suchého vzduchu a vodných pár.

Podľa zadania príkladu obsahuje vstupujúci vzduch 2.52 g ovodných pár/ 1 kg suchého vzduchu.

Toto nie je informácia o množstve daného prúdu, ale o zložení jedného elementu vzduchu.

Celý prúd je však zložený práve z takýchto elementov, a preto logicky výpočtom zloženia jedného elementu vypočítame zároveň aj zloženie celého prúdu.

1 element horúceho vzduchu má hmotnosť 2.52 g vodných pár + 1000 g suchého vzduchu.

$$m_1^{1 \text{ element}} = m_{1A}^{1 \text{ element}} + m_{1B}^{1 \text{ element}}$$

$$m_{1A}^{1 \text{ element}} = 1000 \text{ g}$$

$$m_{1B}^{1 \text{ element}} = 2,52 \text{ g}$$

$$m_1^{1 \text{ element}} = 1002,52 \text{ g}$$

$$w_{1B}^{1 \text{ element}} = m_{1B}^{1 \text{ element}} / m_1^{1 \text{ element}} = 0,0025$$

$$w_{1A}^{1 \text{ element}} = m_{1A}^{1 \text{ element}} / m_1^{1 \text{ element}} = 0,9975 \text{ alebo z väzbového pravidla}$$

$$w_{1A}^{1 \text{ element}} = 1 - w_{1B}^{1 \text{ element}} = 0,9975$$

Všetky elementy horúceho vzduchu majú rovnaké zloženie a preto je zloženie jedného elemntu aj zložením celého prúdu.

$$w_{1A} = 0,9975$$

$$w_{1B} = 0,0025$$

3. krok výpočtu

Zloženie materiálu po sušení

Zloženie materiálu po sušení sa vypočíta z informácie o pomere hmotností sušiny a vody v ňom. Hmotnosť sušiny a vody v odchádzajúcom materiáli je 9:1.

$$m_{4B} / m_{4C} = 1/9 = (m_4 * w_{4B}) / (m_4 * w_{4C})$$

Z toho vyplýva: $w_{4B} / w_{4C} = 1/9$

Použijúc tento vzťah spolu s väzbovým pravidlom pre tento prúd, hmotnostné zlomky sušiny a vody budú vypočítané riešením dvoch rovníc o dvoch neznámych, alebo logickou úvahou....

$$\begin{array}{l|l} w_{4B} / w_{4C} = 1/9 & w_{4B} = 0,1 \\ w_{4C} + w_{4B} = 1 & w_{4C} = 0,9 \end{array}$$

Materiálová bilancia - prvé hanblivé obnaženie...:

Prúdy	1	2	3	4
Zložky				
A: vzduch	$m_1 * w_{1A}$ 3697,141		$m_3 * w_{3A}$ 3697,141	
B: H ₂ O	$m_1 * w_{1B}$ 9,316795	$m_2 * w_{2B}$	$m_3 * w_{3B}$	$m_4 * w_{4B}$
C: sušina		$m_2 * w_{2C}$		$m_4 * w_{4C}$
Σ	m_1 3706,5	m_2	m_3	m_4

$$\begin{array}{l} m_1 = 3706,458 \text{ kg/h} \\ w_{1A} = 0,997486 \\ w_{1B} = 0,002514 \\ w_{2B} = 0,5 \\ w_{2C} = 0,5 \\ w_{4B} = 0,1 \\ w_{4C} = 0,9 \end{array}$$

4. krok výpočtu

Hmotnostný tok vodnej pary vo vzduchu opúšťajúci zariadenie

Hmotnostný tok vodnej pary vo vzduchu opúšťajúci zariadenie sa môže vypočítať z materiálovej bilancie vody v systéme. Nezabudnite prosím, že horúci vzduch prúdiaci nad vlhkým materiálom (tuhá fáza) spôsobí v ňom úbytok vody, ktorá so do neho vyparí vo forme vodných pár (prírastok vodnej pary v plynnej fáze).

Úbytok vody v tuhej fáze resp. prírastok vodných pár v plynnej fáze $\Delta m_B = 30 \text{ kg/h}$

$$B: m_1 \cdot w_{1B} + m_2 \cdot w_{2B} = m_3 \cdot w_{3B} + m_4 \cdot w_{4B}$$

Upraviac materiálovú bilanciu vody resp. vodnej pary do podoby:

$$\Delta m_B = m_3 w_{3B} - m_1 \cdot w_{1B} = m_2 \cdot w_{2B} - m_4 \cdot w_{4B}$$

Úbytok vody v tuhej fáze sa rovná prírastku vodných pár (vody) vo fáze plynnej.

Aplikujúc bilanciu vody len pre plynnú fázu:

$$\Delta m_B = m_3 \cdot w_{3B} - m_1 \cdot w_{1B}$$

$$\begin{aligned} \Delta m_B &= 30 \text{ kg/h} \\ m_1 \cdot w_{1B} &= 9,316795 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

$$m_3 \cdot w_{3B} = 39,317 \text{ kg/h}$$

5. krok výpočtu

Hmotnostný tok vzduchu opúšťajúceho sušiareň

$$m_3 = m_{3A} + m_{3B}$$

$$m_{3A} = 3697,141 \text{ kg/h}$$

$$m_{3B} = 39,31679 \text{ kg/h}$$

$$m_3 = 3736,5 \text{ kg/h}$$

Materiálová bilancia - pobehujúca už len v spodnom prúde.... :

Prúdy Zložky	1	2	3	4
A: vzduch	$m_1 \cdot w_{1A}$ 3697,141		$m_3 \cdot w_{3A}$ 3697,141	
B: H ₂ O	$m_1 \cdot w_{1B}$ 9,316795	$m_2 \cdot w_{2B}$	$m_3 \cdot w_{3B}$ 39,31679	$m_4 \cdot w_{4B}$
C: sušina		$m_2 \cdot w_{2C}$		$m_4 \cdot w_{4C}$
Σ	m_1 3706,5	m_2	m_3 3736,5	m_4

$$m_1 = 3706,458 \text{ kg/h}$$

$$w_{1A} = 0,997486$$

$$w_{1B} = 0,002514$$

$$w_{2B} = 0,5$$

$$w_{2C} = 0,5$$

$$w_{4B} = 0,1$$

$$w_{4C} = 0,9$$

$$m_3 = 3736,458 \text{ kg/h}$$

6. krok výpočtu

Hmotnostné toky vstupujúceho a vystupujúceho materiálu.

$m_3 = ?$ **kg/h** Hmotnostný tok vstupujúceho (m_2) and a vystupujúceho
 $m_4 = ?$ **kg/h** materialu (m_4) sa vypočíta zo systému dvoch nezávislých rovníc
 o dvoch neznámych.
 Celkovej materiálovej bilancie a bilancie sušiny.

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4 \quad \longrightarrow \quad m_2 = m_3 + m_4 - m_1 \quad m_1 = 3706,458 \text{ kg/h}$$

$$m_2 = 30 + m_4 \quad m_3 = 3736,458$$

Substitúciou m_2 z celkovej materiálovej do materiálovej bilancie
 sušiny, sa vypočíta neznáma hodnota m_4 a následne
 dopočíta m_2 .

$$w_{2C} = 0,5$$

$$w_{4C} = 0,9$$

$$m_4 = 37,5 \text{ kg/h}$$

$$m_2 = 67,5 \text{ kg/h}$$

Materiálová bilancia - finálny pohľad na "naturálnu" podstatu:

Prúdy Zložky	1	2	3	4
A: vzduch	$m_1 \cdot w_{1A}$ 3697,141		$m_3 \cdot w_{3A}$ 3697,141	
B: H ₂ O	$m_1 \cdot w_{1B}$ 9,316795	$m_2 \cdot w_{2B}$ 33,75	$m_3 \cdot w_{3B}$ 39,31679	$m_4 \cdot w_{4B}$ 3,75
C: sušina		$m_2 \cdot w_{2C}$ 33,75		$m_4 \cdot w_{4C}$ 33,75
Σ	m_1 3706,5	m_2 67,5	m_3 3736,5	m_4 37,5
	3706,458	67,5	3736,458	37,5

$$m_1 = 3706,458 \text{ kg/h}$$

$$w_{1A} = 0,997486$$

$$w_{1B} = 0,002514$$

$$w_{2B} = 0,5$$

$$w_{2C} = 0,5$$

$$w_{4B} = 0,1$$

$$w_{4C} = 0,9$$

$$m_4 = 37,5 \text{ kg/h}$$

$$m_2 = 67,5 \text{ kg/h}$$

Poznámka:

V bilančnom systéme sú dve spojovacie zložky. Sušina v tuhej a suchý vzduch v plynnej fáze.
 Problém by bol ľahšie riešiteľný, ak by sme aplikovali pri výpočte relatívne hmotnostné zlomky vody
 v tuhej a vodnej pary v plynnej fáze. Nechajme si to však na budúce chemickoingžnierske časy....