



## Kondenzace brýdové páry ze sušení biomasy

*Jan HAVLÍK<sup>1,\*</sup>, Tomáš DLOUHÝ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky, Technická 4, 16607 Praha 6, Česká republika

\* Email: jan.havlik@fs.cvut.cz

*Článek navazuje na problematiku kondenzace brýdové páry získané ze sušení biomasy a zabývá se procesem kondenzace směsi páry se vzduchem. Na kondenzačním výměníku navrženém pro napojení za kontaktní sušku na biomasu jsou provedeny experimenty nejprve s čistou párou a poté se směsí páry s různým obsahem přimíchaného vzduchu. Z nich je získána závislost kondenzačního součinitele přestupu tepla na obsahu vzduchu v parní směsi. Výsledky experimentu jsou porovnány s teoretickým řešením daného problému. Určení součinitele přestupu tepla vychází z Nusseltova modelu kondenzace čisté páry na svislé stěně s využitím analogie přestupu tepla a hmoty pro zohlednění chování vzduchu ve směsi a s párou při její kondenzaci uvnitř svislých trubek. Výsledná závislost kondenzačního součinitele přestupu tepla na obsahu vzduchu v parní směsi získaná z experimentů a vybraných teoretických vztahů má obdobný průběh, hodnoty z experimentů vychází mírně vyšší. Potvrzen byl výrazný pokles součinitele přestupu tepla, který nastává již při velmi malých koncentracích vzduchu v brýdové páře.*

**Klíčová slova:** kondenzace, součinitel přestupu tepla

### 1 Úvod

Sušení biomasy je jednou z cest jak energeticky využít méně kvalitní formy biomasy s vysokým obsahem vody. Ten výrazně snižuje její výhřevnost a komplikuje její spalování, kdy biomasa s obsahem vlhkosti vyšším než 55% je samostatně obtížně spalitelná. Příklady takové biomasy jsou mokrá kůra, zelená lesní štěpka, zemědělské odpady a odpady z potravinářské výroby jako řepné řízky nebo lihovarnické výpalky. Tyto materiály je možné spalovat po jejich vysušení. Energetická náročnost sušení je však značná. Možností, jak energetickou náročnost sušení biomasy snížit, je užití bubnové kontaktní sušky otápané externě získaným teplem s následným využitím uvolněné brýdové páry, která při beztlakém provedení opouští sušku o teplotě blízké 100 °C a má minimální obsah vzduchu a dalších příměsí. Skupenské teplo této páry se dá velmi dobře využít např. na vytápění nebo na absorpční chlazení.

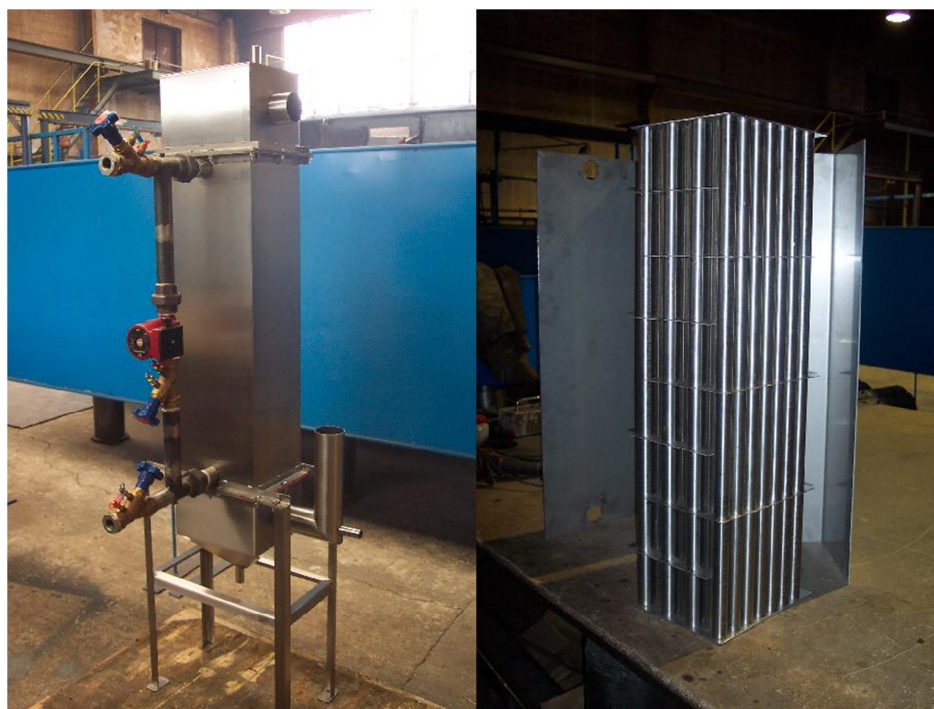
Tento článek se zabývá vlivem obsahu nekondenzujících složek (vzduchu) obsažených v brýdové páře na možnost využití jejího kondenzačního tepla. Na kondenzačním výměníku navrženém pro napojení za kontaktní sušku jsou provedeny experimenty nejprve s čistou párou a poté se směsí páry s různým obsahem přimíchaného vzduchu. Je hodnocen vliv



obsahu vzduchu na proces přestupu tepla při kondenzaci. Výsledky experimentu jsou porovnány s teoretickým řešením daného problému.

## 2 Kondenzační výměník

Experimenty jsou provedeny na vertikálním svazkovém výměníku tepla (Obr. 1), ve kterém proudí kondenzující vodní pára směrem dolů ve svislých trubkách a chladicí voda protiproudě ve svazkové části. Toto nestandardní uspořádání kondenzátoru je použito z důvodu přítomnosti drobných částic biomasy vynášených párou ze sušky, které ulpívají na stěně a ze svislých trubek jsou kondenzátem samovolně odplavovány. Vzduch je z výměníku odváděn přebytečným průtokem páry do okolí otevřeným výstupem, pára kondenzuje při atmosférickém tlaku. Výměník je tvořen svazkem 49 trubek o délce trubek 865 mm, vnějším průměru 28 mm a vnitřním průměrem trubek 24 mm. Trubky mají vystřídané uspořádání s roztečí trubek 35 mm. Příčný průřez výměníku je obdélníkový s rozměry 223 x 270 mm. Proudění vody ve svazkové části výměníku je upraveno 7 příčnými vložkami s rozměry 223 x 230 mm. Výměník je vyroben z nerezové oceli 1.4301 (AISI 304).



Obr. 1 Vertikální kondenzační výměník

## 3 Měření

Měřenými parametry potřebnými pro určení kondenzačního součinitele přestupu tepla z tepelné bilance jsou vstupní teplota chladicí vody, výstupní teplota chladicí vody, průtok chladicí vody, množství páry na vstupu do výměníku, množství vzduchu přimíchaného do páry ventilátorem na vstupu do výměníku, množství kondenzátu, tlak a teplota vstupní páry.



### 3.1 Určení součinitele přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je počítán z tepelné bilance výměníku [1]. Celkový tepelný výkon výměníku je dán rovnicí

$$Q = M_w \cdot c_w \cdot (t_{w,out} - t_{w,in}) \quad (1)$$

kde  $M_w$  je průtok chladicí vody,  $c_w$  je měrná tepelná kapacita,  $t_{w,out}$  je výstupní teplota chladicí vody,  $t_{w,in}$  je vstupní teplota chladicí vody. Celkový tepelný výkon výměníku je dán také rovnicí

$$Q = U \cdot S \cdot \Delta t_{log} \quad (2)$$

kde  $U$  je součinitel prostupu tepla,  $S$  je teplosměnná plocha výměníku a  $\Delta t_{log}$  je logaritmický teplotní spád. Součinitel přestupu tepla na straně páry  $\alpha_p$  popřípadě vody  $\alpha_w$  je možné vypočítat ze vztahu

$$U = \frac{1/D_e}{\frac{1}{d_i \cdot \alpha_p} + \frac{1}{2k} \ln\left(\frac{D_e}{d_i}\right) + \frac{1}{D_e \cdot \alpha_w}} \quad (3)$$

kde  $d_i$  je vnitřní průměr trubek,  $k$  je tepelná vodivost (ocel 1.4301),  $D_e$  je vnější průměr trubek.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla na parní straně je nejprve nutné určit součinitel přestupu tepla na vodní straně  $\alpha_w$  pro danou koncepci výměníku. To je provedeno při experimentu, kdy kondenzuje čistá pára a součinitel přestupu tepla  $\alpha_p$  je možné určit dle Nusseltova modelu kondenzace páry na svislé stěně v místě  $x$  výšky stěny [2]

$$\alpha_p(x) = \left[ \frac{\rho_L g (\rho_L - \rho_p) h'_{fg} k_L^3}{4 \mu_L \Delta T_{sat} L} \right]^{1/4} \quad (4)$$

kde  $\rho_L$  je hustota kondenzátu,  $\rho_p$  je hustota páry,  $h'_{fg}$  je kondenzační teplo,  $k_L$  je tepelná vodivost kondenzátu,  $\mu_L$  je dynamická viskozita kondenzátu,  $\Delta T_{sat}$  je rozdíl kondenzační teploty páry  $T_i$  a teploty stěny  $T_w$ ,  $L$  je délka trubky.

Hodnota  $\alpha_w = f(Re, Pr) \approx f(M_w, t_w)$  [1], [3]. Po určení hodnoty  $\alpha_w$  pro daný průtok chladicí vody jsou provedeny experimenty kondenzace směsi páry a vzduchu s podmínkou zachování konstantního průtoku chladicí vody  $M_w$  s minimální změnou  $t_w$ , jejíž vliv na výslednou hodnotu je velmi malý a je zanedbán. Hodnota  $\alpha_w$  tedy zůstává pro všechna měření konstantní. Hodnoty  $\alpha_p$  pro různé koncentrace parní směsi jsou určeny z tepelné bilance z rovnic (1), (2) a vyjádřením z rovnice (3).

## 4 Teorie

Přítomnost vzduchu v páře zhoršuje přestup tepla při kondenzaci. Kondenzuje-li pára ve směsi se vzduchem je intenzita přestupu tepla závislá též na rychlosti přenosu částic páry (tím i tepla) k chladicí ploše, na které se ovšem vytváří kondenzační blána. Takže k odporu při přestupu tepla kondenzační vrstvou přistupuje ještě odpor podmíněný ztěžováním přístupu parních částic k bláně. Toto způsobuje i rozdíl mezi teplotou v hlavním proudu plynu  $T_\infty$  a kondenzační teplotou na mezifázovém rozhraní  $T_i$ , který je dán rozdílným parciálním tlakem páry v těchto místech. Při kondenzaci čisté páry jsou teploty  $T_\infty$  a  $T_i$  shodné. V průběhu kondenzace směsi vodní páry se vzduchem, se bude koncentrace vodní páry ve směsi snižovat. Naopak koncentrace inertní složky se bude zvyšovat. Tím se bude snižovat i její kondenzační teplota v průběhu procesu. Teoretický výpočet součinitele přestupu tepla směsi



vodní páry se vzduchem vychází z Nusseltova modelu pro kondenzaci čisté páry se zohledněním přestupu hmoty. Pro výpočet tohoto jevu je využito analogie přestupu hmoty a přestupu tepla.

Pro přestup hmoty při laminárním proudění směsi v trubce jsou využity následující kritériální rovnice přestupu tepla aplikované pro přestup hmoty, kde Nusseltovo číslo je nahrazeno Sherwoodovým  $Sh$  a Prandtlovo číslo Schmidtovým  $Sc$

- 1) Hausenova rovnice pro laminární proudění  $Re \leq 2300$  [4]

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 Re Sc \frac{D}{L}}{\left(Re Sc \frac{D}{L}\right)^{2/3}} \quad (5)$$

- 2) Hausenova rovnice pro laminární oblast bez vlivu gravitace  $Re \leq 2300$  [5]

$$Sh = 3,66 + \frac{0,19 \left(Re Sc \frac{D}{L}\right)^{0,8}}{1 + 0,117 \left(Re Sc \frac{D}{L}\right)^{0,467}} \quad (6)$$

Následně je možné získat součinitel přestupu hmoty  $\beta$  [m/s] z rovnice [1]

$$\beta = \frac{Sh \cdot D_{12}}{D} \quad (7)$$

kde  $D_{12}$  je difúzní součinitel vodní páry do vzduchu.

Z rovnice (8) pro výpočet molárního toku složky odvozené z Fickova zákona [1] na mezifázovém rozhraní  $y_{10}$ , a následně dle příslušného parciálního tlaku  $p_i$  teplotu na mezifázovém rozhraní  $T_i$  (viz rovnice (9) a (10)), která je na rozdíl od případu kondenzace čisté páry rozdílná od teploty v hlavním proudu plynu  $T_\infty$ .

$$\dot{n}_1 = \beta C_T \ln \left[ \frac{1 - y_{1\delta}}{1 - y_{10}} \right] \quad (8)$$

$$p_i = y_{10} \cdot p_{celk} \quad (9)$$

$$T_i = T_{sat}(p_i) \quad (10)$$

kde  $\dot{n}_1$  [kmol/m<sup>2</sup>s] je molární tok složky určený z množství zkondenzované páry,  $C_T$  [kmol/m<sup>3</sup>] je celková molární koncentrace,  $y_{1\delta}$  [–] molární koncentrace na hranici mezní vrstvy,  $y_{10}$  [–] molární koncentrace na fázovém rozhraní,  $p_{celk}$  je celkový tlak v proudu plynu.

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_p$  se určí dle rovnice (2), kde  $\Delta T_{sat}$  je rozdíl kondenzační teploty páry  $T_i$  a teploty stěny  $T_w$ . Součinitel přestupu tepla je obvykle vztahován k teplotě proudícího plynu  $T_\infty$  [1] dle korekce

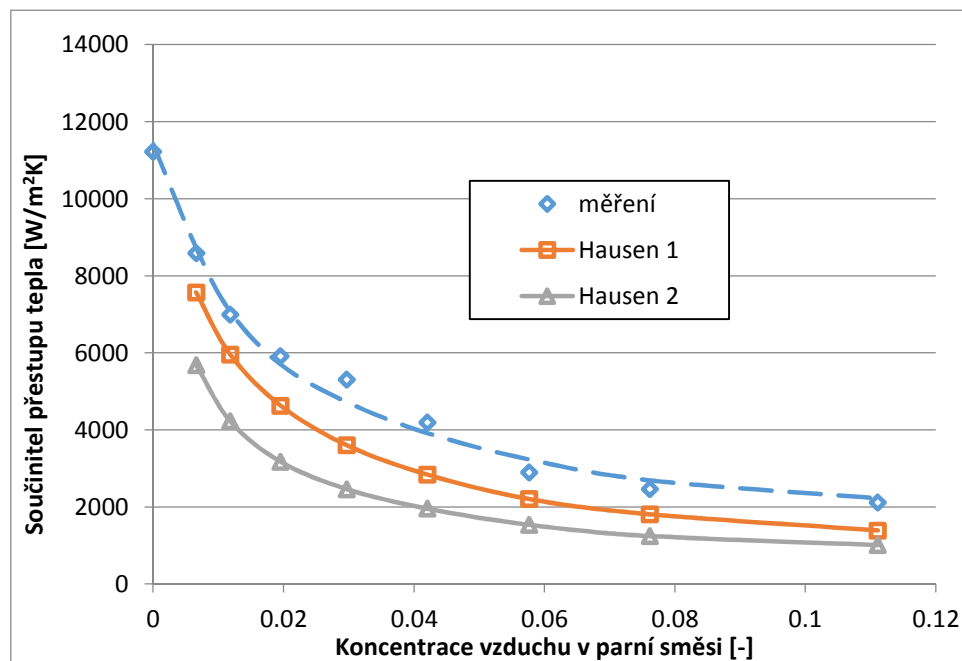
$$\alpha_p' = \alpha_p \frac{(T_i - T_w)}{(T_\infty - T_w)} \quad (11)$$

## 5 Výsledky

Měření bylo provedeno v oblasti laminárního proudění páry v rozmezí Reynoldsova čísla od 800 do 1600, při atmosférickém tlaku v kondenzátoru. Výsledky experimentů jsou znázorněny na Obr. 2. Rozsah testovaných hmotnostních koncentrací vzduchu ve směsi s



vodní párou byl od 0 do 0,11. Hodnoty součinitelů přestupu tepla jsou získány s výslednou chybou měření teplot a průtoků v rozsahu 6 až 10 % v závislosti na provozních parametrech. Součinitel přestupu tepla na vodní straně dosahuje při měření hodnoty přibližně 1500 W/m<sup>2</sup>K.



Obr. 2 Vliv obsahu vzduchu na kondenzaci páry

Výsledná závislost součinitele přestupu tepla vypočteného z naměřených hodnot při kondenzaci parní směsi s proměnným obsahem vzduchu má velmi podobný průběh s výsledky kritériálních rovnic. Hodnoty získané z měření jsou proloženy křivkou se střední odchylkou 6%. Experimentálně určené hodnoty součinitele přestupu tepla dosahují vyšších hodnot než podle publikovaných kritériálních rovnic. V tabulce 1 je tento rozdíl pro vybrané body relativně vyjádřen pro obě kritériální rovnice (Hausen 1 viz rovnice (6), Hausen 2 viz rovnice (5)).

Tab. 1 Rozdíl měření od teoretického výpočtu

Koncentrace		0,02	0,04	0,08
Hausen 1	[W/m <sup>2</sup> K]	+1067	+1073	+879
	%	+23%	+37%	+49%
Hausen 2	[W/m <sup>2</sup> K]	+2524	+1958	+1444
	%	+79%	+100%	+117%

V tabulce 2 jsou uvedena poměrné velikosti součinitelů přestupu tepla pro koncentrace 0,98, 0,96 a 0,92 oproti čisté páře.

Tab. 2 Poměrné velikosti kondenzačního součinitele přestupu tepla

Koncentrace	0,02	0,04	0,08
Hausen 1	0,41	0,25	0,16
Hausen 2	0,28	0,17	0,11
Měření	0,53	0,37	0,22



## 6 Závěr

Experimentálně bylo ověřeno, že v souladu s teoretickými poznatky již velmi malá koncentrace vzduchu v páře velmi zhoršuje velikost součinitele přestupu tepla při kondenzaci, jeho pokles však nevyšel v porovnání s publikovanými kritériálními rovnicemi tak výrazný.

Při hodnotě koncentrace vzduchu v parní směsi 2 % se kondenzační součinitel přestupu tepla snížil dle experimentu na 53 % a dle teoretických vztahů na 41 % popř. 28 % hodnoty pro kondenzaci čisté páry. Při zvýšení koncentrace na 8 % je to 22 % a 16 % popř. 11 %. Souhrnně však lze konstatovat, že experimentálně získaná závislost kondenzačního součinitele přestupu tepla na obsahu vzduchu v páře má velmi podobný průběh jako závislost vypočtená podle kritériálních rovnic (5) a (6)), shodu se vztahem (6) lze považovat za přijatelnou. Výsledky měření publikované v tomto článku jsou úvodním přiblížením v řešení daného problému, který bude předmětem dalšího výzkumu.

## Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. GS13/134/OHK2/2T/12.

## Použitá literatura

- [1] HEWITT, G., F., SHIRES, G., L., BOTT, T., R. *Process Heat Transfer*. New York: Begell House, 2000. ISBN 0-8493-9918-1.
- [2] ŠESTÁK, J., RIEGER, F. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-02933-6.
- [3] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. *Introduction to heat transfer*. New York: Wiley-Academy, 1996. ISBN 0-471-38649-9.
- [4] SAZIMA, M.: *Tabulky sdílení tepla*. Praha: ČVUT, 1986.
- [5] HASAL P., SCHREIBER I., ŠNITA D. *Chemické inženýrství I*. Praha: VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.