



## Snižování energetické náročnosti 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 se zabývá sušením biomasy. Sušení je energeticky náročný proces, proto se při výběru vhodného typu sušky musí brát v úvahu energetická náročnost jednotlivých typů sušení. Pro biomasu se nabízí využití kontaktní bubnové sušky. Na experimentální parní kontaktní sušce byla provedena série experimentů, jejichž cílem bylo ověření vhodnosti použití tohoto způsobu sušení pro mokrou biomasu. Testovaným materiálem byla čerstvá dřevní štěpka s vlhkostí 62 až 66 %. Na základě experimentálních výsledků lze konstatovat, že spotřeba energie je ve srovnání s běžně používanými typy průmyslových sušek výrazně nižší a uvedený typ sušky je pro nehomogenní materiály, jako je dřevní štěpka, vhodný. Navíc při kontaktním způsobu sušení vzniká brýdová pára, která má dostatečně vysokou teplotu a tedy i tepelný potenciál pro následné energetické využití, čímž je možné dále zvýšit energetickou efektivitu celého systému.*

**Klíčová slova:** sušení biomasy, kontaktní suška, energetická náročnost, brýdová pára

### 1 Úvod

Biomasa patří v České republice mezi tradiční a dlouhodobě využívané zdroje energie. Rozvoj využívání biomasy pro energetické účely do značné míry vyčerpává kapacitu jejích kvalitních, snadno dostupných forem. K dispozici zůstávají podřadné formy biomasy, jejichž využití je často komplikováno vysokým obsahem vody. Ten snižuje výhřevnost biomasy, a tím zhoršuje podmínky pro její spalování. Spalování vlhké biomasy snižuje účinnost kotle, produkuje větší množství spalin, zvyšuje teplotu rosného bodu spalin a může také způsobit nestabilitu spalování. Také dopravní a skladovací náklady rostou s vyšším obsahem vody. Je-li obsah vody v biomase vysoký, řádově nad 55 %, její samostatné spalování je velmi obtížné [1]. Příklady takové biomasy jsou mokrá kůra, zelená lesní štěpka, zemědělské odpady a odpady z potravinářské výroby jako řepné řízky nebo lihovarnické výpalky. Sušení těchto materiálů nabízí možnost jejich dalšího energetického využití. Energetická náročnost sušení je však značná. Aplikace klasických metod, sušení horkým vzduchem nebo spalinami, není pro produkci paliva z mokré biomasy vhodné a ekonomicky se nevyplácí [2].

### 2 Možnosti sušení biomasy

Průmyslové sušení je proces odpařování vody způsobené přívodem tepla do mokrého materiálu. Teplo může být do sušeného materiálu přivedeno konvekcí (konvektivní sušky)



nebo vedením (kontaktní sušky). V konvektivních suškách se materiál dostává do přímého kontaktu s teplonosnou látkou, nejčastěji je to horký vzduch, spaliny nebo pára. Tyto sušky mají ale relativně nízkou tepelnou účinnost, protože odpařená vlhkost je unášena ze sušky stejným sušicím médiem. Přesto jsou v průmyslových aplikacích nejvíce používaným typem sušek. V kontaktních suškách je materiál oddělen teplosměnnou plochou. Teplo se do sušeného materiálu přivádí přes tuto plochu, která tak vymezuje sušicí prostor. Teplonosným médiem bývá pára nebo horká voda. Výhodou kontaktního sušení je možnost zpětného využití latentního tepla odpařené vody. K tomu je nutné dosáhnout co nejmenšího množství přísátého vzduchu z okolí. Možností je i pracovat s vysokou teplotou v sušce, kdy se odpařování vody děje za zvýšeného tlaku. Kontaktní sušky jsou vhodnější pro sušení jemných a práškových materiálů.

Více než 85 % průmyslových sušek jsou konvektivní sušky, kde je jako sušicí médium použit horký vzduch nebo spaliny. Nejčastěji používané typy sušek pro biomasu jsou [3]:

- Konvektivní
  - Proudové
  - Fluidní
  - Rotační
- Kontaktní
  - Rotační trubkové

Obecně platí, že kontaktní sušky mají vyšší energetickou účinnost než konvektivní sušky, protože se výrazně sníží ztráta energie v proudě odcházejících plynů. Navíc pára odcházející ze sušeného materiálu může být následně využita v dalším energetickém procesu, čímž se sníží spotřeba primárního média. Kontaktní sušky mají typickou spotřebu energie v rozmezí 2800 až 3600 kJ na kg odpařené vody, což je výrazně nižší hodnota v porovnání s konvektivními suškami, kde je spotřeba energie 4000 až 6000 kJ na kg odpařené vody [3]. Porovnání typických hodnot spotřeb energie na 1 kg odpařené vody běžných typů průmyslových sušek jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1. Typické hodnoty spotřeby energie [3]

Typ sušky	Spotřeba energie [MJ na 1 kg odpařené vody]
Kanálová suška	5,5 - 6,0
Pásová suška	4,0 - 6,0
Rotační suška	4,6 - 9,2
Fluidní suška	4,0 - 6,0
Proudová suška	4,5 - 9,0
Rozprašovací suška	4,5 - 11,5
Bubnová suška	3,2 - 6,5

Při zhodnocení typů sušek vhodných pro sušení biomasy je brána v úvahu vhodnost použití pro výše popsany typ materiálu a energetická náročnost procesu. Pro odpadní biomasu, jako pro částice různorodých rozměrů, je vhodné použít rotační sušky, protože jejich provoz není citlivý na velikost částic. U rotačních sušek s nepřímým otopem je možnost zpětného využití latentního tepla vypařené vodní páry. Tato možnost je i u sušení přehřátou párou. Zde se ale vyskytuje požadavek zdroje přehřáté páry, která by měla pravděpodobně efektivnější využití v jiné části energetického oběhu. Navíc tyto sušky mohou pracovat jen s částicemi drobných podobných rozměrů.



### 3 Kontaktní sušení

Jednou z cest, jak energetickou náročnost sušení biomasy snížit resp. zlepšit účinnost energetických zařízení integrací sušení, je užití bubnové kontaktní sušky otápné externě získaným teplem. U tohoto typu sušky se teplo do sušeného materiálu přivádí přes výhřevnou plochu, která vymezuje sušící prostor [4]. Kontaktní rotační sušky se nejčastěji používají pro nehomogenní materiály malých rozměrů, což odpovídá výše uvedeným druhům biomasy [3].

Brýdová pára vznikající při tomto způsobu sušení má při atmosférickém tlaku v sušce teplotu blízkou 100 °C a obsahuje minimum příměsí, její kondenzací lze tak získat značné množství tepla. Teplo této páry se tedy dá ještě velmi dobře využít, např. pro externí spotřebu, a tím dále zvýšit celkovou efektivitu energetického zdroje. V principu by se jednalo o využití skupenského tepla vodní páry, která se v obvyklých případech uvolní z paliva až při jeho spalování a opouští kotel spolu se spalinami. Vhodnou integrací takto koncipovaného způsobu sušení biomasy do energetických zdrojů lze docílit významného zlepšení jejich účinnosti proti případům, kdy by se sušení neprovádělo [5], [6], [7].

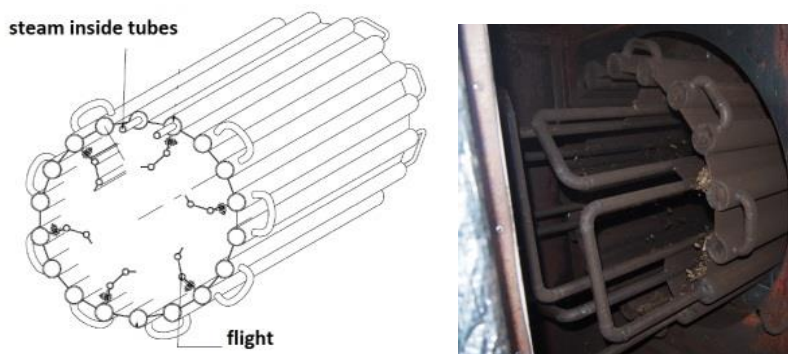
### 4 Experimenty s parní suškou na biomasu

Energetická náročnost kontaktního sušení byla měřena na experimentální kontaktní parní sušce na biomasu (viz Obr. 1). Suška je tvořena rotujícím bubnem o průměru 600 mm a délce 2000 mm. Palivo je do prostoru bubnu dopravováno šnekovým dopravníkem. Rychlost otáčení bubnu je řízena frekvenčním měničem pohonů, tímto způsobem je možné regulovat dobu setrvání paliva v sušce. Odpařená vodní pára ze sušeného materiálu je ze sušky odsávána pomocí brýdového ventilátoru.



*Obr. 1 Parní suška*

Buben sušky se skládá z otápných trubek. Na vnitřní straně (na straně sušeného materiálu) jsou umístěny lopatky pro prodloužení doby kontaktu s topnou plochou a zvýšení povrchu sušky při zachování velikosti obestavěného prostoru. Buben je z vnější strany tepelně zaizolován, jeho konfigurace je znázorněna na Obr. 2. Suška je otápná parou, která kondenzuje uvnitř trubkového systému.



Obr. 2 Konfigurace rotačního bubnu

#### 4.1 Průběh experimentu

Vstupním palivem byla dřevní štěpka s vlhkostí mezi 60 až 65 %. Po průchodu paliva suškou je materiál znovu vložen do vstupního šnekového dopravníku. Tento postup simuluje větší délku bubnu, a tím poskytuje nezbytnou dobu schnutí. To také umožňuje analyzovat vzorky materiálu pro stanovení aktuálního obsahu vody v průběhu sušení. Tímto způsobem je možné sestavit sušicí křivku pro konkrétní provozní podmínky.

Suška byla v průběhu všech experimentů otápěna parou o parametrech 3,2 bar / 136 °C. Brýdová pára vznikající při sušení uvnitř sušky je odsávána ventilátorem regulovatelným frekvenčním měničem tak, aby bylo odsáváno příslušné množství páry. V případě vývinu většího množství páry uniká pára netěsnostmi ven ze sušky, jedná se hlavně o vstup a výstup paliva a spoje okolo rotujícího bubnu. V případě vývinu menšího množství hrozí naopak přísávání vzduchu těmito netěsnostmi.

#### 4.2 Energetická náročnost sušení

Výsledky měření spotřeby energie sušárny jsou uvedeny v Tab. 2. Hodnota bez tepelných ztrát byla vypočtena z naměřené hodnoty, kdy tepelné ztráty sušky byly změřeny v průběhu provozu bez náplně paliva jako 3 kg zkondenzované páry za hodinu.

Tab. 2. Energetická spotřeba bubnové sušky

Zaplnění bubnu [%]	Spotřeba energie [MJ na kg odpařené vody]	Spotřeba energie bez tepelných ztrát [MJ na kg odpařené vody]
8	3,43	2,84
9	3,46	2,89
12	3,52	2,80
16 <sup>1</sup>	3,58	2,88
20 <sup>1</sup>	3,36	2,63
24	3,43	2,84

Dle výsledků experimentů se spotřeba tepla pro odpaření 1 kg vody pohybuje mezi 3400 a 3600 kJ. Tato hodnota je obdobná pro různá zaplnění bubnu. V případě optimalizace zařízení a snížení tepelných ztrát do okolí by bylo možno dosáhnout nižších hodnot. Potenciál

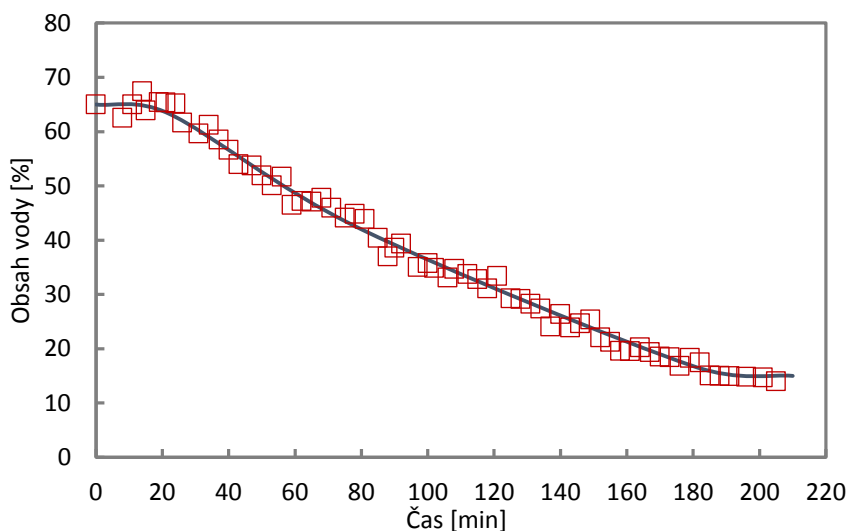
<sup>1</sup> Výsledky publikované v [3]



snižování spotřeby energie je omezen až hodnotou spotřeby energie bez tepelných ztrát 2800 kJ/kg. Tato hodnota je na úrovni, která odpovídá ohřevu materiálu a skupenskému teplu vody. Tato spotřeba energie je asi dvakrát nižší v porovnání s běžnými typy sušek (viz Tab. 1).

### 4.3 Parametry brýdové páry

V průběhu experimentů byl sledován úbytek obsahu vody v sušeném materiálu, tedy sušící křivka. Na Obr. 3 [8] je příklad sušící křivky pro naplnění bubnu 24 % s rotací bubnu 2,8 ot/min.



Obr. 3 Sušící křivka

Sušící křivka má tři hlavní části, v první je materiál zahříván z teploty okolí na teplotu vypařování vody, ve druhé probíhá proces vypařování vody a v poslední je dosaženo obsahu vody v materiálu, pod který se voda už neodpařuje nebo se odpařuje jen velmi málo a proces sušení ustává.

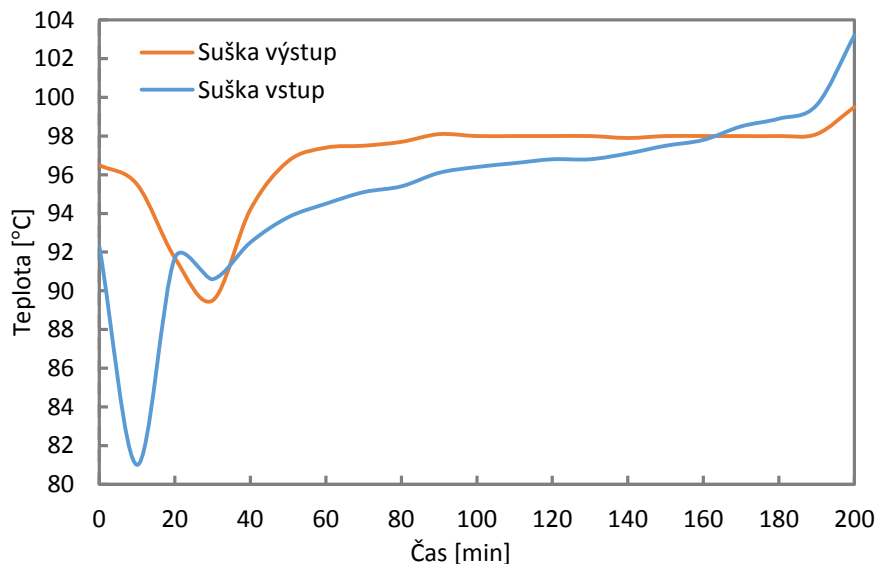
Ukázka sušeného materiálu je na Obr. 4. V levé části je surová dřevní štěpka skladovaná ve venkovních prostorách s obsahem vody kolem 60 %, v pravé části je štěpka vysušená na obsah vody zhruba 10 %.



Obr. 4 Dřevní štěpka před a po vysušení



V průběhu měření byla sledována teplota páry, která se uvolňuje v průběhu sušení. Teploty byly měřeny za vstupním šnekem paliva na počátku rotujícího bubnu a na konci bubnu před výstupním šnekem, odkud je pára odsávána brýdovým ventilátorem. Průběh obou teplot je znázorněn na Obr. 5.



Obr. 5 Teplota brýdové páry uvnitř sušky

Před začátkem sušení je suška vyplněná vzduchem, po začátku sušicího procesu je vzduch odváděn ze sušky spolu se vznikající párou. Proto brýdová pára na začátku sušení obsahuje větší množství vzduchu, které postupně klesá až do momentu, kdy se obsah přimíchaného vzduchu ustálí na malém množství, které se dostává do sušky hlavně se vstupem paliva. Na začátku procesu sušení, kdy probíhá převážně ohřev materiálu bez odpařování vodní páry, teplota v sušce klesá na úroveň 90 až 80 °C. Po začátku procesu vypařování vody teplota stoupá až na hodnotu zhruba 98 °C. Poté zůstává konstantní až do konce procesu sušení. V momentu, kdy už se v sušce voda neodpařuje nebo se odpařuje v pouze velmi malém množství, dochází k přehřívání směsi vzduchu s velmi malým množstvím páry a teplota tak může stoupnout až nad 100 °C. Toto měření bylo několikrát opakováno, teplota brýdové páry v sušce se v ustálené fázi vypařování, kdy teplota výstupní části zůstává stabilní, pohybovala v rozmezí 99 až 97 °C. Nižších hodnot bylo dosahováno při nižším naplnění bubnu, tedy menším vývinu brýdové páry, a vyšších otáčkách bubnu, při kterých je materiál do sušky dávkován v kratších intervalech. Naopak je tomu při vyšším zaplnění bubnu a menší intenzitě vstupu materiálu do sušky. Tyto teploty přibližně odpovídají množství přisávaného vzduchu na úrovni 2 až 10 %. Toto měření ověřuje předpoklad, že brýdová pára má dostatečně vysokou teplotu a tedy i tepelný potenciál pro následné energetické využití.

## 5 Závěr

Výhodnost kontaktního způsobu sušení pro biomasu byla potvrzena na prototypu rotační bubnové sušky. Spotřeba energie na 1 kg odpařené vody se pohybuje rozmezí 3400 až 3600 kJ, s potenciálem dalšího snižování této hodnoty v závislosti na omezení ztrát tepla do okolí. Potenciál snižování spotřeby energie je omezen až hodnotou spotřeby energie bez tepelných



ztrát 2800 kJ na 1 kg odpařené vody. Tato hodnota je na úrovni, která odpovídá ohřevu materiálu a skupenskému teplu vody. Tato spotřeba energie je asi dvakrát nižší v porovnání s běžnými typy sušek.

Na základě experimentálních výsledků lze konstatovat, že spotřeba energie je ve srovnání s běžně používanými typy průmyslových sušek výrazně nižší a uvedený typ sušky je vhodný pro nehomogenní materiály, jako je např. dřevní štěpka.

Teplota brýdové páry v sušce se v ustálené fázi vypařování, kdy teplota výstupní části zůstává stabilní, pohybovala v rozmezí 99 až 97 °C. Tyto teploty přibližně odpovídají množství přisávaného vzduchu na úrovni 2 až 10 %. Brýdová pára má dostatečně vysokou teplotu a tedy i tepelný potenciál pro následné energetické využití, čímž je možné dále zvýšit energetickou efektivitu celého systému.

## Použitá literatura

- [1] Wade, Amos A. Report on Biomass Drying Technology. [Online] 1998. [Citace: 02. 07 2017.] <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>. NREL/TP-570-25885..
- [2] Funda, Z. *Dizertační práce: Energetické využití velmi vlhké biomasy*. Praha : ČVUT v Praze, 2011.
- [3] Mujumdar, Arun S. *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton : CRC Press, 2006. ISBN 9781574446685.
- [4] Dlouhý, T. a Havlík, J. Možnosti integrace sušení biomasy do energetických zdrojů. *Sborník přednášek z konference TOP 2012*. Bratislava : STU Bratislava, 2012. ISBN 80-227-2058-5.
- [5] Havlík, J. a Dlouhý, T. Kondenzace brýdové páry ze sušení biomasy. *Sborník z konference Energie z biomasy XV*. Brno : VUT v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5016-5.
- [6] Havlík, J. a Dlouhý, T. Sušení biomas pro energetické využití. *Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XIV*. Brno : VUT v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4775-2.
- [7] Havlík, J. *Topný oběh se sušením biomasy*. Praha : ČVUT, 2011. Diplomová práce. ČVUTv Praze, Fakulta Strojní, Ústav energetiky..
- [8] Havlík, J. a Dlouhý, T. Integration of Biomass Drying into Energy Systems. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. ISSN: 0021-9592. (Přijato k publikaci).