

## Stanovení účinnosti spalování biomasy, měření emisí

### Cíl úlohy

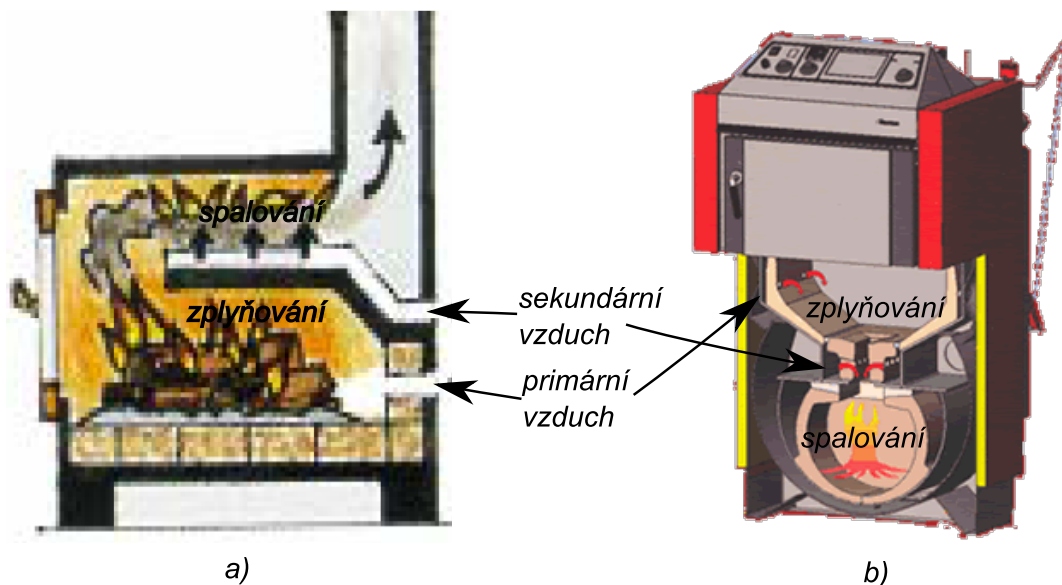
Orientační stanovení účinnosti tepelného zdroje na biomasu pomocí elektrochemické analýzy kouřových plynů respektive pomocí zjednodušeného kalorimetrického měření; měření emisí při spalování biomasy: stanovení koncentrace CO ve spalinách a sazového čísla.

### Úvod

#### Spalování biomasy

Biomasu lze jistě považovat za ekologický obnovitelný zdroj tepla. Spaliny z biomasy mohou být při správném spalování příznivější pro životní prostředí než spaliny z uhlí (neobsahují  $\text{SO}_2$ ) nebo spaliny ze zemního plynu (obsahují mnohem méně  $\text{NO}_x$ ). Spalování biomasy je spojeno jen s velmi nízkou produkcí  $\text{CO}_2$ . Nesprávné spalování biomasy se však může stát významným zdrojem znečištění prostředí. Příčinou je to, že biomasa má poněkud jiné vlastnosti než fosilní tuhá paliva a její spalování v nevhodných topeništích (například v topeništích určených pro uhlí), může být značným zdrojem škodlivin. V porovnání s uhlím má biomasa výrazně vyšší podíl *prchavé* hořlaviny (v případě biomasy obsahuje prchavá hořlavina až 85 % energie), která se uvolňuje už při zahřátí paliva na teplotu kolem 200 °C, ale hoří až při teplotách kolem 300–500 °C. Kotle na uhlí jsou obvykle krátké a intenzivně ochlazované ohřivanou vodou, při spalování dřeva v *těchto kotlích* (ale i v nekvalitních topeništích na dřevo) proto značná část nespálených plynů uniká do ovzduší. Prchavá hořlavina přitom obsahuje mnoho toxických látek, zejména kysličník uhelnatý (asi 20 %) a organické látky. Prchavé organické látky po ochlazení kondenzují na malých prachových částicích a vytvářejí toxické saze, které jsou ze zdravotního hlediska velmi nebezpečné (usazují se v plicích). Zařízení na spalování biomasy proto musí umožňovat kvalitní spálení prchavé hořlaviny, což je možné jen při dostatečně vysoké teplotě. Konstrukčně se tento problém obvykle řeší prostorovým oddělením zplyňování dřeva ve *zplyňovací komoře* a spalováním prchavé hořlaviny ve *spalovací komoře*. Do zplyňovací komory se přivádí jen velmi omezené množství tzv. *primárního* vzduchu, který stačí jen k hoření tuhé hořlaviny, prchavá hořlavina odchází do spalovací komory, kde se míchá s *předehřátým* tzv. *sekundárním* vzduchem, který se do spalovací komory přivádí v přebytku. Přebytek vzduchu je nutný z toho důvodu, že jinak nelze zabezpečit dostatečně kvalitní promíchání hořlavých plynů a vzduchu. Na druhou stranu, příliš mnoho vzduchu by vedlo k nežádoucímu ochlazení spalovací komory a proto se ve velkých topeništích přebytek vzduchu ovládá elektronicky pomocí analýzy spalin tzv. *lambda* sondou. Kvalita spalování hodně souvisí s velikostí topeniště, je snazší dosáhnout dobrého spalování ve velkých topeništích než v malých, ve kterých je obtížnější dosáhnout dostatečných teplot. Kvalita spalování je také výrazně vyšší v topeništích s kontinuálním přikládáním malého množství paliva (v kotlích na peletky či štěpku).

Jako indikátor kvality spalování prchavé hořlaviny velmi dobře poslouží sledování kysličníku uhelnatého ve spalinách, případně tzv. sazové číslo, což je „primitivní“ způsob určení obsahu prachových částic ve spalinách (certifikované metody jsou nicméně principiálně podobné).



Obrázek 1: Různé konstrukce malých topenišť na biomasu

a) Nestárnoucí klasika: kamna na dřevo Jøtul s bočním odhoříváním polen. Spalovací komora je umístěna nad topeništěm.

b) Kotel Atmos se spalovací komorou ve spodní části. Pro přísávání sekundárního vzduchu se využívá podtlaku v trysce mezi komorami (Venturiho trubice).

## Výhřevnost biomasy

Všechny druhy celulóznové a ligno-celulóznové biomasy mají v *suchém stavu* velmi podobnou výhřevnost  $H_s$  v rozmezí 16 – 20 MJ/kg. Výhřevnost v suchém stavu závisí zejména na obsahu pryskyřic a ligninu, jejichž výhřevnost je vyšší než výhřevnost celulózy. Nejmenší výhřevnost má sláma a dřeva s nízkým obsahem pryskyřic a ligninu (topol, dub, buk, habr, akát), nejvyšší výhřevnost mají dřeva s vysokým obsahem pryskyřic a (nebo) ligninu (borovice, bříza, smrk). Poněkud jinou kategorií biomasy jsou olejninu s výrazně vyšší výhřevností.

Tabulka 1: Tabulka výhřevnosti suchého materiálu ( $w = 0\%$ )

palivo	$H_s$ (MJ/kg)	palivo	$H_s$ (MJ/kg)
sláma	17	smrk	18
dub	17	borovice	19
buk	18	bříza	20
		řepkové semeno	26

Největší vliv na výhřevnost má vlhkost paliva  $w$  a to zejména proto, že ve vlhkém palivu je méně sušiny. Mnohem menší vliv má fakt, že voda ve vlhkém palivu se musí vypařit<sup>1</sup>. Pro výhřevnost vlhkého paliva platí:

$$H_{pal}(w) = \frac{(H_s - wI)}{1 + w}, \quad (1)$$

kde  $I$  je měrné skupenské teplo výparné vody ( $I_{20^\circ\text{C}} = 2,45$  MJ/kg). V tabelovaných hodnotách výhřevnosti dřevin panuje dosti velký zmatek, protože vlhkostí je někdy myšlen poměr hmotnosti vody ke hmotnosti vlhkého vzorku, jindy poměr hmotnosti vody k sušině. Autoři od sebe opisují,

<sup>1</sup>Odpar vody ale palivo ochlazuje a má tak značný vliv na kvalitu spalování. Spalování vlhké biomasy je proto obvykle doprovázeno většími emisemi.

aniž by definici vlhkosti věnovali pozornost. V našem případě (ve vztahu 1) platí:

$$w = \frac{m_{pal} - m_s}{m_s}, \quad (2)$$

kde  $m_{pal}$  je hmotnost vlhkého vzorku,  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku<sup>2</sup>. Chceme-li určit vlhkost paliva, musíme ho nejprve zvážit a pak vysušit v peci při 105 °C do rovnovážné hmotnosti a znovu zvážit.

## Účinnost kotle/vaříče na biomasu

Účinnost  $\eta$  je definována jako podíl tepelného výkonu  $P_v$  a příkonu  $P_{pal}$ :

$$\eta = \frac{P_v}{P_{pal}}, \quad (3)$$

příkonem se rozumí energie uvolňovaná hořením paliva, tedy  $P_{pal} = -H_{pal} \frac{dm_{pal}}{dt}$ .

Účinnost  $\eta$  lze určit dvěma způsoby:

1. Přímo, kalorimetrickým měřením, při kterém se měří užitečný výkon  $P_v$  (například sledováním nárůstu teploty ohřívané vody). Toto měření je principiálně nejpřesnější. K výpočtu se použije přímo definiční vztah pro účinnost 3.
2. Nepřímo, analýzou spalin, pomocí vztahu:

$$\eta \doteq 100 - q_{CO} - q_A \quad (\%), \quad (4)$$

kde  $q_{CO}$  jsou ztráty v nespálené prchavé hořlavině (*chemický nedopal*),  $q_A$  jsou *tepelné ztráty* v horkých spalinách odcházejících komínem (komínová ztráta). Při tomto výpočtu zanedbáme ztráty únikem tepla do okolí (analýzou spalin je nelze zjistit).

*Chemický nedopal*  $q_{CO}$  lze s dobrou přesností zjistit měřením obsahu nespáleného kyslíčnicku uhelnatého ve spalinách (CO tvoří rozhodující část nedopalu). Můžeme psát:

$$q_{CO} = K \cdot c_{CO} \cdot \lambda \quad (\%), \quad (5)$$

kde  $K \doteq \frac{100}{10^6} \cdot \frac{\rho_{CO_2} \mu_s H_{CO}}{\rho_s H_{pal}}$  je konstanta, která mj. obsahuje výhřevnost kyslíčnicku uhelnatého  $H_{CO}$  a hmotnost spalin  $\mu_s$  vzniklých spálením 1 kg paliva<sup>3</sup> (pro dřevo  $K \doteq 0,0005$ ). Dále je ve vztahu  $c_{CO}$ , což je naměřená koncentrace CO ve spalinách vyjádřená v ppm.  $\lambda$  je tzv. *přebytek vzduchu*, který vyjadřuje poměr skutečného množství přiváděného vzduchu ku teoretickému (stechiometrickému) množství vzduchu potřebného ke spálení paliva<sup>4</sup>. Přebytek vzduchu  $\lambda$  lze vypočítat, známe-li obsah kyslíku ( $c_{O_2}(\%)$ ) ve spalinách:

$$\lambda = \frac{21}{21 - c_{O_2}} \quad (-). \quad (6)$$

Součin  $c_{CO}\lambda$  je vlastně koncentrace CO v *neřaděných* spalinách, tedy ve spalinách vzniklých bez přebytku vzduchu, tedy

$$c_{CO\text{neř.}} = c_{CO} \cdot \lambda \quad (7)$$

Pro *komínovou ztrátu* ( $q_A$ ) platí:

$$q_A = (T_s - T_v) B \cdot \lambda \quad (\%), \quad (8)$$

kde  $T_s$  je teplota spalin,  $T_v$  je teplota přiváděného vzduchu a  $B \doteq 100 \cdot \frac{c_s \mu_s}{H_{pal}}$  je konstanta, která mimo jiné obsahuje měrné teplo spalin  $c_s$  (pro dřevo  $B \doteq 0,04$ ).

<sup>2</sup>Takto definovaná vlhkost se standardně používá ve stavebním i dřevozpracujícím průmyslu, není tedy sebemenší důvod používat jinou definici

<sup>3</sup>pro dřevo  $\mu_s \doteq 6$

<sup>4</sup>Ke spálení 1 kg suchého dřeva je zapotřebí přibližně 5 kg vzduchu

## Postup experimentu

### 1. Příprava

- (a) Jako domácí přípravu doporučujeme shlédnout instruktážní videa <http://people.fsv.cvut.cz/~vydra/EZ1.html#video>.
- (b) Budeme rádi, když si přinesete svou vlastní *biomasu* (kousky dřeva do velikosti 2×2 cm, peletky, obilí, mrkev atp.).
- (c) Naplňte vaříč palivem těsně pod přívod sekundárního vzduchu. Na palivo nakladte zapalovač (třísky, nebo jiný připravený materiál), připojte zdroj pro ventilátor do pozice „high“ a vaříč podle pokynů asistenta zapalte.
- (d) **Bezpečnostní pokyny:** *dbejte opatrnosti při manipulaci s ohněm, nepoužívejte tekuté hořlaviny, do vaříče nic nelijte (ani vodu pro uhašení!), nestůjte ve směru kouře - kouř může obsahovat vyšší koncentrace kyslíčnicku uhelnatého! Dbejte aby hořící kousky biomasy napadaly na váhu a nezničily plastový kryt. Na laboratorní cvičení přijďte vhodně oblečení!!!!*

### 2. Kalorimetrické měření účinnosti vaříče

- (a) Připravenou nádobu postavte na váhu, zvažte, nalijte cca 0,5 l vody a opět zvažte. Změřte teplotu vody.
- (b) Teprve po *opravdu důkladném* rozhoření vaříč postavte na váhu, hmotnost zaznamenejte. Na vaříč na váze postavte nádobu s vodou.
- (c) Za stálého míchání v přibližně jednonominutových intervalech zapisujte teplotu vody a hmotnost. Po dosažení teploty 80 °C nádobu s vodou i vaříč odstavte z vah.
- (d) Určete hmotnost nádoby s vodou (kvůli odhadu odparu vody).

### 3. Měření spalin analyzátozem Testo 330-3

- (a) Nad vaříč nasadte měřicí komínek pro sběr spalin.
- (b) K analyzátoru spalin Testo připojte odběrovou sondu a zapněte analyzátor (tlačítko je nad displejem).
- (c) Po asi 10 s se objeví menu měření. Zkontrolujte, že jako palivo je vybráno „dřevo, koks“.
- (d) *Odběrovou sondu umístěte mimo kouř z vaříče*, najedte pomocí šipek na položku „měření spalin“ a zmáčkněte prostřední oranžové tlačítko (OK). Na 30 s se spustí nulování přístroje.
- (e) Měřicí sondu zasuňte do otvoru v komínku a spusťte měření prostředním oranžovým tlačítkem (Start). Pohybuje sondou v komínku až najdete místo s nejvyšší teplotou. Po ustálení hodnot (asi po jedné minutě) запиšte naměřené hodnoty (obsah O<sub>2</sub><sup>5</sup>, CO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>neř</sub>, teplotu spalin (TS), teplotu vzduchu (TV) a komínové ztráty (qA).
- (f) Měření ukončete prostředním oranžovým tlačítkem (Stop) a přístroj vypněte, ještě asi 30 s přístroj vrčí, probíhá čištění sondy a přístroje.
- (g) Při každém nastavení vaříče nasajte spaliny sazovou pumpičkou a podle vzorníku určete sazové číslo.

### 4. Po ukončení měření vysypte obsah vaříče do připravené nádoby s vodou a nechte vaříč vychladnout.

### 5. Analyzátor spalin a sazovou pumpičku můžete použít i na analýzu jiných zdrojů znečištění, např. cigaretu, vodní dýmku, vonnou svíčku, vonné tyčinky... Zajímavé je též porovnání obsahu CO v dechu kuřáka a nekuřáka.

<sup>5</sup>Pokud přístroj neměří koncentraci kyslíku (vadná sonda), použijte pro další zpracování hodnotu c<sub>O<sub>2</sub></sub> = 16 %, tedy přebytek vzduchu λ = 4,2

Tabulka 2: Emisní limity CO pro kotle na biomasu (nařízení vlády 352/2002 a směrnice MŽP 13/2002 „Ekologicky šetrný výrobek“). Koncentrace CO ve spalinách je přepočtena na obsah kyslíku  $c_{O_2} = 11\%$ , tlak 101 kPa a teplotu spalin  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

výkon kotle	CO ( $\text{mg m}^{-3}$ )
do 200 kW	2000
200 kW–5MW	650
5 MW–50MW	400

## Zpracování

1. V tabulce excel vytvořte graf závislosti teploty vody na čase. Pomocí funkce LINREGRESE vypočtete směrnici této závislosti a s využitím kalorimetrické rovnice určete střední hodnotu výkonu  $P_v$  vařiče a jeho nejistotu (viz přednášky). Je-li odpar vody významný, pak výparné teplo zahrňte do výpočtu výkonu vařiče.
2. Určete vlhkost paliva ze vztahu 2, nemáte-li vysušené vzorky, pak u pelet a olejin počítejte s vlhkostí  $w = 8\%$ , u dřeva a obilnin s vlhkostí  $w = 15\%$ . Vypočtete výhřevnost paliva ze vztahu 1.
3. Z úbytku paliva (po odečtu výparu vody z nádoby) a z jeho výhřevnosti určete střední hodnotu *příkonu* vařiče  $P_{pal}$  (opět s použitím funkce excelu LINREGRESE). Výpočet porovnejte s  $P_v$  vypočteným v bodu 1, výsledkem je účinnost vařiče (opět jako funkce času) vypočtená ze vztahu 3. Určete i nejistotu tohoto výsledku.
4. Vypočtete účinnost vařiče ze vztahu 4. Komínovou ztrátu  $q_A$  nemusíte počítat, použijte údaj analyzátoru Testo. Hodnotu  $q_{CO}$  vypočtete ze vztahu 5. Vypočtenou účinnost porovnejte s účinností určenou v bodu 3 a zdůvodněte rozdíl.
5. Naměřené hodnoty koncentrace CO ve spalinách přepočtete na  $\text{mg/m}^3$  a na koncentraci kyslíku 11 % a porovnejte je s tabulkou 2.<sup>6</sup>
6. Protokol odevzdejte, prosím, prostřednictvím MS Teams či Moodlu, či zašlete emailem podle toho, kde je úloha zadána.

## Pomůcky

Mobilní zplyňující vařič na biomasu Woodgas, analyzátor spalin Testo 330-3, sazová pumpička Testo, nádoba s vodou, váhy, teploměr.

## Kontrolní otázky

1. Pokuste se odvodit vztah 1.
2. Jaká je vlhkost 1 kg dřeva, které obsahuje 0,5 kg vody?
3. Při jaké vlhkosti  $w$  má dřevo nulovou výhřevnost?
4. Kolik procent kyslíku je ve spalinách při hodnotě  $\lambda = 1$ ?

<sup>6</sup>K výpočtům použijte koncentraci kyslíčnicku uhelnatého v *neřaděných* spalinách (vztah 7), což je koncentrace CO přepočtená na  $c_{O_2} = 0$ , respektive  $\lambda = 1$ . K přepočtu ppm na  $\text{mg/m}^3$  při teplotě  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku 101 kPa použijte stavovou rovnici ideálního plynu, tedy  $pV = nRT$ .

5. Vypočtete stechiometrickou potřebu kyslíku na spálení 1 kg dřeva, když prvkové složení dřeva je: uhlík 49 %, kyslík 44 %, vodík 6 %. Jde o hmotnostní procenta v sušině. K výpočtu použijte chemickou rovnici  $x \text{ C} + y \text{ H} + z \text{ O} \rightarrow x \text{ CO}_2 + \frac{y}{2} \text{ H}_2\text{O}$ .
- 

Tento návod byl aktualizován dne: 20. října 2021