

Stanovení účinnosti spalování biomasy, měření emisí

Cíl úlohy

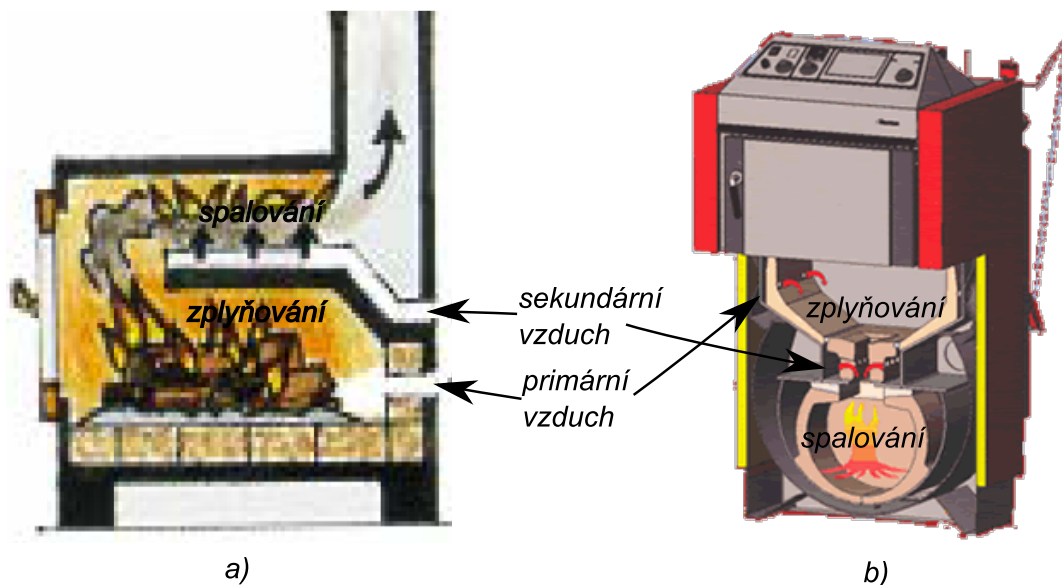
Orientační stanovení účinnosti tepelného zdroje na biomasu pomocí elektrochemické analýzy kouřových plynů respektive pomocí zjednodušeného kalorimetrického měření; měření emisí při spalování biomasy: stanovení koncentrace CO ve spalinách a sazového čísla.

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 SO_2) nebo spaliny ze zemního plynu (obsahují mnohem méně NO_x). Spalování biomasy je spojeno jen s velmi nízkou produkcí 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 celulóзовé a ligno-celulóзовé 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 vypařit¹. 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,

¹Odpar 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 vzorku². 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 η 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 η 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 μ_s vzniklých spálením 1 kg paliva³ (pro dřevo $K \doteq 0,0005$). Dále je ve vztahu c_{CO} , což je naměřená koncentrace CO ve spalinách vyjádřená v ppm. λ je tzv. *přebytek vzduchu*, který vyjadřuje poměr skutečného množství přiváděného vzduchu ku teoretickému (stechiometrickému) množství vzduchu potřebného ke spálení paliva⁴. Přebytek vzduchu λ 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

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

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 $B \doteq 0,04$).

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

³pro dřevo $\mu_s \doteq 6$

⁴Ke 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 1 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 jednodominutových intervalech zapisujte teplotu vody a hmotnost. Po dosažení teploty 100 °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 měřící 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) Měřící 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 O₂, CO₂, CO, CO_{neř}, teplotu spalin (TS), teplotu vzduchu (TV) a komínové ztráty (qA).
- (f) Změňte rychlost ventilátoru (zdroj do pozice „Low“) a po jedné minutě znovu zaznamenejte údaje analyzátoru. Očekávat lze především pokles přebytku vzduchu λ.
- (g) Měření ukončete prostředním oranžovým tlačítkem (Stop) a přístroj vypněte, ještě asi 30 s přístroj vrčí, probíhá čištění sondy a přístroje.
- (h) 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.

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 (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 kalorimetrické rovnice vytvořte graf okamžitého výkonu P_v vařiče v závislosti na čase. 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 $w = 15\%$. Vypočtěte výhřevnost paliva ze vztahu 1.
3. Z úbytku paliva (po odečtu výparu vody z nádoby) a z jeho výhřevnosti vypočtěte *příkon* vařiče P_{pal} jako funkci času. Výpočet porovnejte s P_v vypočteným v bodu 1, výsledkem je účinnost vařiče (opět jako funkce času) vypočtená ze vztahu 3. Pokud jsou experimentální hodnoty zatíženy velkou chybou a účinnost příliš „skáče“, nebo dokonce přesahuje 100 %, použijte k výpočtu účinnosti *klouzávé průměry* P_v a P_{pal} .
4. Vypočtěte účinnost vařiče ze vztahu 4. Komínovou ztrátu q_A nemusíte počítat, použijte údaj analyzátoru Testo. Hodnotu q_{CO} vypočtěte ze vztahu 5. Vypočtenou účinnost porovnejte s účinností určenou v bodu 3 a zdůvodněte rozdíl. Porovnejte účinnost v pozici „Low“ a „High“.
5. Naměřené hodnoty koncentrace CO ve spalinách přepočtěte na mg/m^3 a na koncentraci kyslíku 11 % a porovnejte je s tabulkou 2.⁵
6. Protokol odevzdejte, prosím, prostřednictvím MS Teams či Moodlu, 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 $\lambda = 1$?

⁵K 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 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: 3. prosince 2020