

ÚČINNOST KOTLE

1. Cíl práce:

Roštový kotel o jmenovitém výkonu 100 kW, vybavený automatickým podáváním paliva, je určen pro spalování dřevní štěpky. Předaný výkon je dále odevzdáván v rámci chladícího okruhu. Pro dané zařízení stanovte:

- Účinnost kotle – nepřímou metodou
- Účinnost kotle – přímou metodou
- Emise CO₂, CO a NO_x

Podrobnosti zpracování viz kapitola 3 – úkoly.

2. Definice pojmů:

Palivo je charakterizováno podílem hořlaviny (C, H, S, N, O), popelovin (A) a vody (W). V původním stavu (tedy včetně popelovin a vody) jsou jednotlivé složky označovány horním indexem r. Složení použitého paliva je následující:

- C^r = 32,13 %
- H^r = 4,28 %
- N^r = 0,19 %
- S^r = 0,0189 %
- A^r = 2 %
- W^r_t = 35 %

V případě použití jiného paliva budou vlastnosti upřesněny během výuky.

Výhřevnost paliva Q_i^r [kJ/kg] je množství tepla, které se získá při dokonalém spálení 1 kg paliva s následným ochlazením produktů spalování na 20 °C, přičemž **vodní pára nekondenzuje** a zůstává v plynném stavu.

Výhřevnost použitého paliva je 10 000 kJ/kg.

V případě použití jiného paliva bude upřesněno během výuky.

Součinitel přebytku spalovacího vzduchu α je poměr skutečného množství vzduchu přivedeného pro spálení 1 kg paliva a minimálního (stechiometrického) množství spalovacího vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva. Hodnotu α lze určit měřením z koncentrace O₂ nebo CO₂.

Stanovte α z měřené koncentrace O₂:
$$\alpha_{O_2} = \frac{21}{21 - c_{O_2}} \quad [-]$$

kde c_{O2} [obj. %] je změřená koncentrace kyslíku ve spalinách. Předpokládá se dokonalé spalování.

Nepřímá metoda

Určení účinnosti spočívá ve stanovení tepelných ztrát zařízení:

$$\eta_N = 1 - \sum_i Z_i \quad [-]$$

- tepelné ztráty kotle jsou

- Z_k – ztráta citelným teplem odcházejících spalin (komínová) – závisí na teplotě spalin za kotlem a přebytku spalovacího vzduchu ve spalinách;
- Z_{sv} – ztráta sdílením tepla do okolí – závisí na velikosti povrchu kotle, jeho teplotě a teplotě okolí;
- Z_{CO} – ztráta chemickým nedopalem paliva – závisí na obsahu spalitelných plynů (CO) ve spalinách;
- Z_C – ztráta mechanickým nedopalem paliva – je určena množstvím nespáleného uhlíku v tuhých zbytcích po spalování (popel, popílek);
- Z_f – ztráta citelným teplem tuhých zbytků. V tomto případě bude uvažována jako nulová.

- ztráta citelným teplem spalin se určí ze vztahu:

$$Z_k = \frac{I_k - I_o}{Q_i^r} \quad [-]$$

kde I_k [kJ/kg] je entalpie spalin při změřené teplotě a součiniteli přebytku spalovacího vzduchu α za kotlem a I_o [kJ/kg] je entalpie spalin při teplotě okolí a součiniteli přebytku spalovacího vzduchu α za kotlem (jedná se o hypotetický referenční stav); Q_i^r je výhřevnost paliva. Entalpie jsou vztaženy k jednotkovému množství spáleného paliva a určí se z I-t diagramu spalin pro dané palivo.

- ztráta sdílením tepla do okolí se určí z velikosti povrchu kotle, jeho teploty a teploty okolí jako tepelný výkon sdělený volnou konvekcí (přestup tepla sáláním se zanedbává), podle vztahu:

$$Z_{sv} = \frac{\alpha_k \cdot S \cdot (T_s - T_o)}{m_{pv} \cdot Q_i^r} \quad [-]$$

kde α_k [W.m⁻².K⁻¹] je součinitel přestupu tepla, S [m²] je velikost teplosměnné plochy (povrch kotle), T_s [K] je střední teplota vnější stěny kotle, T_o [K] je teplota okolního prostředí (vzduchu), m_{pv} [kg/s] hmotnostní tok paliva a Q_i^r [kJ/kg] výhřevnost paliva. Problematickým místem je stanovení hodnoty α_k , pro zjednodušení bude proto uvažována hodnota $\alpha_k = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Teplota povrchu pláště kotle se měří snímkováním termokamerou, emisivita musí být kalibrována pomocí povrchového teploměru. V případě, že se maximální a minimální teplota v měřeném poli liší o méně než 10°C, lze použít střední hodnotu teploty. V opačném případě je nutné plochu virtuálně rozdělit na menší plochy.

- ztráta chemickým nedopalem je závislá na koncentraci CO ve spalinách. Její velikost se určí

ze vztahu:
$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot \rho_{CO} \cdot V_{ss \min}}{(21 - c_{O2ref}) \cdot Q_i^r} \quad [-]$$

kde ρ_{CO} je hmotnostní koncentrace CO [mg.m⁻³_N], $V_{ss \min}$ je minimální objem suchých spalin ze spálení 1 kg paliva [m³_N/kg] a Q_i [kJ/kg] je výhřevnost paliva.

Hmotnostní koncentrace CO se určí ze změřené objemové koncentrace podle vztahu:

$$\rho_{CO} = \varphi \cdot \frac{p_N \cdot M_m}{R \cdot T_N} \cdot \frac{21 - c_{O2ref}}{21 - c_{O2}} \quad [\text{mg/m}^3_{\text{N}}]$$

kde jednotlivé symboly značí:

φ = měřená koncentrace [ppm obj.]

M_m = molekulová hmotnost CO [g/mol]

p_N = normální tlak, tj. 101,325 kPa

T_N = normální teplota, tj. 273,15 K

$CO_{2ref}(CO_2)$ = referenční (měřená) koncentrace kyslíku [obj. %]. Referenční koncentrace kyslíku je pro spalování biomasy do 50 MW tepelného výkonu 11 %.

$R = 8,314 [J.K^{-1}.mol^{-1}]$ univerzální plynová konstanta

ρ_{CO} = přepočtená hmotnostní koncentrace [mg/m^3_N]

Minimální (stechiometrický) objem spalin se určí ze složení paliva, za pomoci vztahů:

$$V_{VS_{min}} = \frac{1,865.C + 5,553.H + 0,698.S - 0,699.O}{0,21} \quad [m^3_N/kg]$$

$$V_{SS_{min}} = 1,855.C + 0,003.V_{VS_{min}} + 0,683.S + 0,799.N + 0,7805.V_{VS_{min}} + 0,0092.V_{VS_{min}} \quad [m^3_N/kg]$$

- **ztráta mechanickým nedopalem** je závislá na množství nespálené hořlaviny (uhlíku) v tuhých zbytcích (popel, popílek). Vzhledem k časové náročnosti analýzy je uvažováno, že se tato hodnota pohybuje na hodnotě 10 %. K určení této ztráty se použije vztah:

$$Z_c = C \cdot \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot Q_c \quad [-]$$

kde $C [-]$ je podíl nespálené hořlaviny v tuhých zbytcích, $A^r [-]$ je obsah popela v palivu, Q_i^r je výhřevnost paliva a Q_c je výhřevnost nespálené hořlaviny, uvažuje se 32 600 kJ/kg.

Přímá metoda

- výkon: tepelný výkon předaný do teplotnosného média, v tomto případě teplé vody:

$$Q = m_w c_{pw} (t_{wo} - t_{wi}) [kW]$$

Kde Q je tepelný výkon, m_w hmotnostní tok vody, c_{pw} měrná tepelná kapacita vody při její střední teplotě, t_{wo} teplota vody na výstupu a t_{wi} teplota vody na vstupu.

- příkon: tepelný příkon přivedený do kotle v palivu:

$$P = m_{pv} \cdot Q_i^r \quad [kW]$$

kde m_{pv} je hmotnostní tok paliva do kotle a Q_i^r výhřevnost paliva.

Pro stanovení hmotnostního toku předpokládejte, že šnekový dopravník je schopen dodat xxx g dřevní štěpky za 5s.

- přímá účinnost:

$$\eta_p = \frac{Q}{P} \quad [kW]$$

Stanovení emisí

Z plynných emisí se stanovuje koncentrace, CO a NO_x, přičemž naměřené koncentrace jsou měřeny v ppm a se přepočítávají na hmotnostní koncentraci v [mg.m⁻³_N] při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách 11 % (platí pro kotle na biomasu do výkonu 50 MW). Oxidy dusíku NO_x se počítají jako NO₂. Přepočet koncentrace se provádí podle vztahu:

$$\rho = \varphi \cdot \frac{p_N \cdot M_m}{R \cdot T_N} \cdot \frac{21 - c_{O_2ref}}{21 - c_{O_2}}$$

kde jednotlivé symboly značí:

φ = měřená koncentrace [ppm obj.]

M_m = molekulová hmotnost [g/mol]

p_N = normální tlak, tj. 101,325 kPa

T_N = normální teplota, tj. 273,15 K

c_{O_2ref} (c_{O_2}) = referenční (měřená) koncentrace kyslíku [obj. %]

R = 8,314 J/(K.mol) univerzální plynová konstanta

ρ = přepočtená hmotnostní koncentrace [mg/m³_N]

3. Postup měření:

Měření účinnosti je zkouška statická, tzn. že během měření se nesmějí provádět žádné regulační zásahy, které by vedly ke změně provozního režimu kotle. Kotel se uvede do ustáleného stavu a v pětiminutových intervalech se provádějí odečty měřených veličin. Měření trvá celkem 60 minut, tj. 12 odečtů + 1 počáteční stav.

Měřené veličiny:

Koncentrace O₂, CO₂, CO a NO_x

Průtok vody v kotlovém okruhu - Q_w

Teplota spalin za kotlem - t_{sk}

Teplota okolí (měřená jednorázově) - t_o

Teplota povrchu kotle (měřená jednorázově)

Povrch vnějšího pláště kotle (měřen jednorázově)

Doba chodu šneku/doba klidu šneku

Úkoly:

- Do přehledné tabulky vyhodnotíte naměřená data
 - o stanovte střední hodnoty měřených veličin
 - o uveďte jejich minimální, maximální hodnoty a směrodatnou odchylku.
- Vypočítané střední hodnoty se následně použijí pro vyhodnocení požadovaných veličin dle postupu uvedeného výše.
- Do grafů vyneste následující závislosti na čase:
 - o výkon kotle a teplota spalin za kotlem
 - o koncentrace O₂ a CO₂.
 - o emise CO a NO_x v mg/Nm³

Do protokolu není třeba kopírovat obsah přípravy! Použité vztahy uveďte a vzorově do nich dosad'te!

