

VPLYV VLHKOSTI PALIVOVÉHO DREVA NA TEPELNÚ ÚČINNOSŤ KOTLOV MALÝCH A STREDNÝCH ZDROJOV TEPLA

EFFECT OF MOISTURE CONTENT OF FIREWOOD ON THE ENERGY EFFICIENCY OF LOW AND MEDIUM TEMPERATURE PROCESSING BOILERS

LADISLAV DZURENDA ✉

Technická univerzita vo Zvolene, Drevárska fakulta, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic

✉ e-mail: dzurenda@tuzvo.sk

ABSTRACT

The effect of moisture content of firewood using the energy efficiency model of low and medium temperature processing boilers with the power input up to 500 kW is analysed in the paper. The results of the effect of moisture content of burnt wood with the moisture content in the range $W = 10\text{--}60\%$ on boiler energy efficiency during cooling the flue gas in a boiler at the temperature ranging from $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ and emission production with the concentration of $\text{CO} = 2500\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and soot $\text{TZL}_c = 150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ associated with the boiler requirements of Class 3 in accordance with the standard EN 303:2012 are presented. Following the analyses, the fact that the energy efficiency of a boiler decreases from $\eta = 89.81\%$ to $\eta = 82.95\%$ due to increase in the moisture content of wood from $w = 10\%$ to 60% while flue gas is cooled to the temperature of $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be observed. When the flue gas is cooled to the temperature of $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, there is decrease in energy efficiency from $\eta = 79.25\%$ to $\eta = 64.58\%$. Negative effect of moisture content of burnt wood on the boiler energy efficiency depending upon the moisture content of firewood and the temperature of flue gas is described using the formula: $\eta = [(-0.0027 \cdot W^2 + 0.0564 \cdot W + 89.373) - (0.001 \cdot W + 0.068) \cdot (t_{sp} - 120)]$.

For more information see Summary at the end of the article.

Kľúčové slová: palivové drevo; obsah vlhkosti; kotol; spaľovanie; tepelná účinnosť

Key words: firewood; moisture content; boiler; combustion; thermal efficiency

ÚVOD

Efektívnosť výroby tepla z palivového dreva je podľa prác MARUTZKY, SEEGER (1999), DOMANSKI at al. (2008), MALAŤÁK, VACULÍK (2008), DZURENDA, BANSKI (2016) a HOLUBČÍK, JANDAČKA (2018) závislá tak od konštrukčného riešenia kotla, ako aj na energetických vlastnostiach palivového dreva a prevádzky kotla. Energetické vlastnosti dendromasy sú v rozhodujúcej miere závislé na jej vlhkosti, ktorá negatívne vplyva nielen na základné energetické vlastnosti biomasy, ktorými sú: spálne teplo Q_s a výhrevnosť Q_n , ale aj na proces horenia dreva v kúrenisku kotla: teplotu plameňa, objem vytvorených spalín, teplotu rosného bodu spalín, produkciu emisií. Konštrukčné riešenie výmenníkovej časti kotla má vplyv na využitie tepelného obsahu spalín, t.j. mieru ochladenia spalín pred ich odvedením do atmosféry.

Tepelná účinnosť kotla je jedným zo základných technických kritérií pre posudzovanie efektívnosti výroby tepla v energetických zariadeniach.

Snahou konštruktérov kotlov je navrhovať také technické riešenie pre podmienky spaľovania paliva, ktorými sa znižujú tepelné straty kotla a zvyšuje sa tepelná účinnosť. Norma STN EN 303:1999 (ČSN EN 303:1999) špecifikujúca technické požiadavky pre teplovodné kotle triedy 1, malých a stredných zdrojov tepla s tepelným príkonom do 500 kW, platná pre Slovensko a Českú republiku do roku 2012, požadovala dosahovanie tepelnej účinnosti kotla pri spaľovaní palivového dreva na úrovni aspoň $\eta_k \approx 57\%$. V súčasnosti musia kotle danej kategórie v triede 3 dosahovať minimálne tepelnú účinnosť $\eta_k \approx 77\%$ a v triede 5 tepelnú účinnosť $\eta_k \approx 88\%$.

Cieľom príspevku je teoretické analyzovanie vplyvu vlhkosti palivového dreva v rozsahu: $W = 10 \div 60\%$ na tepelnú účinnosť teplovodných kotlov pri prevádzkových podmienkach ochladzovania spalín v intervale teplôt $t = 120\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a emisiách na úrovni koncentrácií oxidu uhoľnatého $\text{CO} = 2500\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a popolčeka (sadzi) $\text{TZL}_c = 150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ prináležiace podľa STN EN 303:2012 kotlom triedy 3.

MATERIÁL A METODIKA

Teplná účinnosť kotla je definovaná ako podiel tepelného výkonu Q_v k tepelnému príkonu Q_p kotla. Jednou z alternatív jej stanovenia je nepriama metóda, t.j. stanovenie hodnoty tepelnej účinnosti na základe bilancie štandardných tepelných strát kotla ξ_i . Matematicky ju popisuje rovnica:

$$\eta_k = \frac{Q_v}{Q_p} \cdot 100 = 100 - \sum \xi_i \quad [\%] \quad (1)$$

kde: Q_v – tepelný výkon kotla [kW], Q_p – tepelný príkon kotla [kW], ξ_i – tepelné straty kotla [%].

K štandardným tepelným stratám kotla, podľa prác RAJNIAK et al. (1997), HOLOUBEK (2002) a DZURENDA, BANSKI (2015, 2017) patrí: komínová strata (ξ_{sp}), strata únikom prchavej horľaviny tzv. chemický nedopal (ξ_{CO+C}), strata únikom neprchavej horľaviny tzv. mechanický nedopal (ξ_c), strata tepla sálaním a konvekciou z povrchu kotla (ξ_R):

$$\sum \xi_i = \xi_{sp} + \xi_{CO+C} + \xi_c + \xi_R \quad [\%] \quad (2)$$

kde: ξ_{sp} – komínová strata [%], ξ_{CO+C} – strata únikom prchavej horľaviny tzv. chemický nedopal [%], ξ_c – strata únikom neprchavej horľaviny tzv. mechanický nedopal [%], ξ_R – strata tepla sálaním a konvekciou z povrchu kotla [%].

Komínová strata (ξ_{sp}) je tepelná strata kotla, spôsobená odvádzaním tepla v spalínach z kotla do atmosféry. Definovaná je ako rozdiel entalpie spalín na výstupe z kotla a entalpie spalín ochladených na teplotu vzduchu v atmosfére k množstvu tepla privedeného v 1 kg paliva. Autori HOLOUBEK (2002), DZURENDA, BANSKI (2015, 2017) ju popisujú vztahom:

$$\xi_{sp} = \frac{V_{sp} \cdot c_p \cdot (t_{sp} - t_{sp-e})}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

kde: V_{sp} – špecifický objem vlhkých spalín vytvorených spálením 1 kg palivového dreva [m^3/kg], c_p – špecifická tepelná kapacita [$kJ/(m^3 \cdot K)$], t_{sp} – teplota spalín odvádzaná z kotla do atmosféry [$^{\circ}C$], t_{sp-e} – teplota spalín po ochladiení na teplotu vzduchu v atmosfére [$^{\circ}C$], Q_n – výhrevnosť palivového dreva [kJ/kg].

Strata tepla únikom horľaviny v spalínach – chemický nedopal (ξ_{CO+C}) vyjadruje stratu v dôsledku nedokonalého spaľovania prchavej horľaviny biopaliva. Strata súvisí s výskytom sadzí C, oxidu uhoľnatého CO a dechtov C_nH_m v spalínach odvádzaných zo spaľovacieho zariadenia do atmosféry. Najbežnejšie vyskytujúcou sa a prevádzkovo merateľnou zložkou chemického nedopalu zo spaľovania dendromasy sú emisie sadzí C a oxidu uhoľnatého CO. Výpočet strát tepla únikom prchavej horľaviny popisuje rovnica:

$$\xi_{CO+C} = \left[\frac{10\,200 \cdot X_{CO} \cdot V_{sp-d}}{Q_n} + \frac{32\,600 \cdot X_C \cdot V_{sp-d}}{Q_n} \right] \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

kde: Q_{n-CO} = 10 200 kJ/kg výhrevnosť oxidu uhoľnatého, Q_{n-C} = 32 600 kJ/kg výhrevnosť uhlíka, X_{CO} – hmotnostná koncentrácia oxidu uhoľnatého v suchých spalínach [kg/m^3], X_C – hmotnostná koncentrácia uhlíka (sadzí) v suchých spalínach [kg/m^3], V_{sp-d} – špecifický objem suchých spalín vytvorených spálením 1 kg palivového dreva [m^3/kg], Q_n – výhrevnosť palivového dreva [kJ/kg].

Strata tepla únikom horľaviny v tuhých zvyškoch – mechanický nedopal (ξ_c) je spôsobená prepadosť tuhej horľaviny (dreveného uhlia) cez rošt do popolnice. Veľkosť straty kvantifikuje vztah:

$$\xi_c = 32600 \cdot \frac{C_A \cdot A \left(1 - \frac{W}{100}\right)}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

kde: Q_{n-C} = 32 600 kJ/kg výhrevnosť uhlíka, C_A – hmotnostný podiel uhlíka v popole [%], A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%], Q_n – výhrevnosť palivového dreva [kJ/kg].

Strata tepla prúdením a sálaním z povrchu kotla (ξ_R) nie je nezávislá na vlhkosti spaľovaného paliva, a preto v danej práci nie je zohľadňovaná.

Výpočty jednotlivých parametrov tepelných strát kotla, závislých na chemickom zložení horľaviny C^{daf} , H^{daf} , O^{daf} , N^{daf} , obsahu popola v suchej palivovom dreve A , relatívnej vlhkosti spaľovaného palivového dreva W , prebytku spaľovacieho vzduchu λ a teplote spalín t , popisujú nasledovné rovnice:

Objem vlhkých spalín zo spaľovania palivového dreva bilancuje rovnica:

$$V_{sp} = \left[1,87 \cdot \frac{C^{daf}}{100} + 11,2 \cdot \frac{H^{daf}}{100} + 0,8 \cdot \frac{N^{daf}}{100} + V_{air} \cdot (\lambda - 0,21) \right] \cdot \left[1 - \frac{A}{100} \left(1 - \frac{W}{100}\right) - \frac{W}{100} \right] + 1,24 \cdot \frac{W}{100} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (6)$$

kde: C^{daf} – zastúpenie uhlíka v horľavine palivového dreva [%], H^{daf} – zastúpenie vodíka v horľavine palivového dreva [%], N^{daf} – zastúpenie dusíka v horľavine palivového dreva [%], V_{air} – stechiometrické množstvo spaľovacieho vzduchu [m^3/kg], λ – súčiniteľ nadbytku spaľovacieho vzduchu [m^3/m^3], A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%].

Stechiometrický objem vzduchu pre spaľovanie 1 kg palivového dreva:

$$V_{air} = \frac{1}{0,21} \cdot \left[1,87 \cdot \frac{C^{daf}}{100} + 5,6 \cdot \frac{H^{daf}}{100} + 0,8 \cdot \frac{N^{daf}}{100} - 0,7 \cdot \frac{O^{daf}}{100} \right] \quad [m^3/kg] \quad (7)$$

kde: C^{daf} – zastúpenie uhlíka v horľavine palivového dreva [%], H^{daf} – zastúpenie vodíka v horľavine palivového dreva [%], N^{daf} – zastúpenie dusíka v horľavine palivového dreva [%], O^{daf} – zastúpenie kyslíka v horľavine palivového dreva [%].

Objem suchých spalín vzniknutých spálením 1 kg palivového dreva:

$$V_{sp-d} = \left[1,87 \cdot \frac{C^{daf}}{100} + 0,8 \cdot \frac{N^{daf}}{100} + 0,79 \cdot V_{air} + V_{air} \cdot (\lambda - 1) \right] \cdot \left[1 - \frac{A}{100} \left(1 - \frac{W}{100}\right) - \frac{W}{100} \right] \quad [m^3/kg] \quad (8)$$

kde: C^{daf} – zastúpenie uhlíka v horľavine palivového dreva [%], N^{daf} – zastúpenie dusíka v horľavine palivového dreva [%], V_{air} – stechiometrické množstvo spaľovacieho vzduchu [m^3/kg], λ – súčiniteľ nadbytku spaľovacieho vzduchu [m^3/m^3], A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%].

Strednú hodnotu špecifickej tepelnej kapacity 1 m_n^3 spalín pri konštantnom tlaku kvantifikuje rovnica:

$$c_p = c_{p\text{-CO}_2} \cdot X_{\text{CO}_2} + c_{p\text{-O}_2} \cdot X_{\text{O}_2} + c_{p\text{N}_2} \cdot X_{\text{N}_2} + c_{p\text{-H}_2\text{O}} \cdot X_{\text{H}_2\text{O}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (9)$$

kde: $c_{p\text{-CO}_2}$ – špecifická tepelná kapacita oxidu uhličitého $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$, X_{CO_2} – objemový podiel oxidu uhličitého v spalínach $[\text{m}^3/\text{m}^3]$, $c_{p\text{-O}_2}$ – špecifická tepelná kapacita kyslíka $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$, X_{O_2} – objemový podiel kyslíka v spalínach $[\text{m}^3/\text{m}^3]$, $c_{p\text{N}_2}$ – špecifická tepelná kapacita dusíka $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$, X_{N_2} – objemový podiel dusíka v spalínach $[\text{m}^3/\text{m}^3]$, $c_{p\text{-H}_2\text{O}}$ – špecifická tepelná kapacita vodnej pary $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$, $X_{\text{H}_2\text{O}}$ – objemový podiel vodnej pary v spalínach $[\text{m}^3/\text{m}^3]$.

Závislosti špecifických tepelných kapacít 1 m_n^3 jednotlivých zložiek spalín na teplote popisujú rovnice:

$$\text{oxid uhčitý} \quad c_{p\text{-CO}_2} = 0.0008 \cdot t + 1,6473 \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10)$$

$$\text{vodná para} \quad c_{p\text{-H}_2\text{O}} = 10^{-7} \cdot t^2 + 10^{-4} \cdot t + 1,4895 \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (11)$$

$$\text{kyslík} \quad c_{p\text{-O}_2} = 5 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,3036 \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (12)$$

$$\text{dusík} \quad c_{p\text{N}_2} = 9 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1,3022 \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (13)$$

kde: t – teplota spalín $[\text{°C}]$.

Objemové podiely jednotlivých zložiek v spalínach z dendromasy možno stanoviť z nasledovných rovníc:

Objemový podiel oxidu uhličitého v spalínach:

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{1,87 \cdot \frac{C^{\text{daf}}}{100} \cdot \left[1 - \frac{A}{100} \left(1 - \frac{W}{100} \right) - \frac{W}{100} \right]}{V_{sp}} \quad [-] \quad (14)$$

kde: C^{daf} – zastúpenie uhlíka v horlavine palivového dreva [%], A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%], V_{sp} – špecifický objem vlhkých spalín vytvorený spálením 1kg palivového dreva $[\text{m}^3/\text{kg}]$.

Objemový podiel dusíka v spalínach:

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\left(0,8 \cdot \frac{N^{\text{daf}}}{100} + 0,79 \cdot V_{\text{air}} \cdot \lambda \right) \cdot \left[1 - \frac{A}{100} \left(1 - \frac{W}{100} \right) - \frac{W}{100} \right]}{V_{sp}} \quad [-] \quad (15)$$

kde: N^{daf} – zastúpenie dusíka v horlavine palivového dreva [%], V_{air} – stechiometrické množstvo spaľovacieho vzduchu $[\text{m}_n^3/\text{kg}]$, λ – súčiniteľ nadbytku spaľovacieho vzduchu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$, A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%], V_{sp} – špecifický objem vlhkých spalín vytvorený spálením 1kg palivového dreva $[\text{m}_n^3/\text{kg}]$.

Objemový podiel kyslíka v spalínach:

$$X_{\text{O}_2} = \frac{0,21 \cdot V_{\text{air}} \cdot (\lambda - 1) \cdot \left[1 - \frac{A}{100} \left(1 - \frac{W}{100} \right) - \frac{W}{100} \right]}{V_{sp}} \quad [-] \quad (16)$$

kde: V_{air} – stechiometrické množstvo spaľovacieho vzduchu $[\text{m}_n^3/\text{kg}]$, λ – súčiniteľ nadbytku spaľovacieho vzduchu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$, A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%], V_{sp} – špecifický objem vlhkých spalín vytvorený spálením 1kg palivového dreva $[\text{m}_n^3/\text{kg}]$.

Objemový podiel vodnej pary v spalínach:

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{11,2 \cdot \frac{H^{\text{daf}}}{100} \cdot \left[1 - \frac{A}{100} \left(1 - \frac{W}{100} \right) - \frac{W}{100} \right] + 1,24 \cdot \frac{W}{100}}{V_{sp}} \quad [-] \quad (17)$$

kde: H^{daf} – zastúpenie vodíka v horlavine palivového dreva [%], A – zastúpenie anorganického podielu v suchom palivovom dreve [%], W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%], V_{sp} – špecifický objem vlhkých spalín vytvorený spálením 1kg palivového dreva $[\text{m}_n^3/\text{kg}]$.

Výhrevnosť biomasy v závislosti na vlhkosti je autormi KOLLMANN (1951), SIMANOV (1995) a JANDAČKA et al. (2007a) kvantifikovaná matematickým vzťahom:

$$Q_n = 18840 - 21353 \cdot \frac{W}{100} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (18)$$

kde: W – relatívna vlhkosť palivového dreva [%].

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Analýza vplyvu vlhkosti palivového dreva na tepelné straty a tepelnú účinnosť kotla je vykonaná pre spaľovanie štandardného palivového dreva s chemickým zložením horlaviny: $C^{\text{daf}} = 50 \pm 1$ [%], $H^{\text{daf}} = 6 \pm 0,1$ [%], $O^{\text{daf}} = 44 \pm 0,3$ [%], obsahom popolovín v dreve $A^{\text{d}} = 1$ [%] uvádzaným v prácach DZURENDA et al. (2010), DZURENDA, ZOLIAK (2011), BUGALA et al. (2015), GEJDOŠ et al. (2015), NOSEK, HOLUBČÍK (2016), PASTOR et al. (2017) s prebytkom spaľovacieho vzduchu $\lambda = 2,1$, priemernou teplotou spaľovacieho vzduchu privádzaného do kúreniska kotla $t_{\text{vz}} = 10$ °C a povolených produkciách emisií pre teplovodné kotle v triede 3 STN EN 303:2012 (oxid uhoľnatý CO = 2500 mg.m⁻³ a popolčeka (sadze) TZL_C = 150 mg.m⁻³).

V tab. 1 sú uvedené hodnoty jednotlivých tepelných strát a tepelnej účinnosti teplovodného kotla spaľujúceho palivové drevo s vlhkosťami: $W = 10\text{--}60$ %, pri ochladení spalín v kotli na teplotu $t = 120$ °C.

Z prezentovaných hodnôt tepelných strát kotla plynie, že najväčšou tepelnou stratou je komínová strata, predstavujúca pri spaľovaní suchého palivového dreva 8,39% podiel z celkových tepelných stratách kotla. Vplyvom vlhkosti palivového dreva narastá uvedená strata z hodnoty $\xi_{K=10\%} = 8,39$ % na hodnotu $\xi_{K=60} = 14,78$ %, čo predstavuje nárast o 76,2 %. Ostatné tepelné straty, ako únik prchavej a neprchavej horlaviny v spalínach je podielom 1,6 % a mechanický nedopal s podielom 0,2 %, sú straty v porovnaní s komínovou stratou neporovnateľne menšie. Uvedené skutočnosti o podiele jednotlivých tepelných strát kotla potvrdzujú aj práce autorov DOMANSKY et al. (2008), JANDAČKA et al. (2016) a DZURENDA, BANSKI (2017).

Na tepelnú účinnosť kotla má okrem vlhkosti palivového dreva nmalý vplyv aj samotná teplota spalín odvádzaných z kotla do atmosféry. Miera ochladzovania spalín v kotli je daná konštrukciou kotla. Vplyv teploty spalín v intervale hodnôt $t = 120$ až 250 °C v rozpätí analyzovanej vlhkosti spaľovaného dreva na tepelnú účinnosť kotla dokumentuje tab. 2.

Pokles tepelnej účinnosti kotla spaľujúceho palivové drevo na vlhkosti spaľovaného dreva a teplote spalín graficky zobrazuje obr. 1.

Na základe výsledkov uvedených analýz bola pre potreby praxe odvodená závislosť tepelnej účinnosti kotla na vlhkosti spaľovaného dreva v rozpätí $W = 10\text{--}60$ % a teplote spalín emitovaných do ovzdušia $t = 120\text{--}250$ °C. Uvedenú závislosť matematicky popisuje rovnica:

$$\eta = [(-0,0027 \cdot W^2 + 0,0564 \cdot W + 89,373) - (0,001 \cdot W + 0,068) \cdot (t - 120)] \quad [\%] \quad (19)$$

kde: W – relatívna vlhkosť dreva [%], t – teplota spalín [°C].

Z prezentovaných výsledkov vplyvu teploty spalín a vlhkosti spaľovaného dreva na tepelnú účinnosť kotla plynie, že kým pri spaľovaní palivového dreva s vlhkosťou $W = 10\%$ a teplote emitovaných spalín z kotla do atmosféry $t = 120\text{ °C}$ je tepelnú účinnosť kotla $\eta_{K-10\%} = 89,81\%$, tak pri tých istých prevádzkových podmienkach a spaľovaní palivového dreva s vlhkosťou $W = 60\%$ kotol dosahuje tepelnú účinnosť $\eta_{K-60\%} = 82,95\%$. Pokles tepelnej účinnosti kotla so vzrastajúcou vlhkosťou je $\Delta\eta_K = 6,86\%$. S rastúcou teplotou emitovaných spalín je uvedený pokles tepelnej účinnosti kotla ešte výraznejší. Pri spaľovaní palivového dreva s vlhkosťou $W = 60\%$ a teplote emitovaných spalín do atmosféry $t = 250\text{ °C}$ kotol dosahuje tepelnú účinnosť len $\eta_{K-60\%} = 64,58\%$.

Legislatívne požiadavky teplovodných kotlov malých a stredných zdrojov tepla s požadovanou tepelnou účinnosťou $\eta_K = 77\%$ neumožňujú spaľovať mokré drevo ľubovoľnej vlhkosti. Ak konštrukcia teplovodného kotla umožňuje ochladzovať spaliny len na teplotu $t = 250\text{ °C}$, potom spaľované palivové drevo musí byť preschnuté a môže mať vlhkosť maximálne do $W \leq 30\%$. Kotle s mierou ochladenia spalín na teplotu $t = 180\text{ °C}$ môžu spaľovať drevo s vlhkosťou do $W \leq 50\%$.

Zvyšovanie tepelnej účinnosti teplovodných kotlov spaľovaním palivového dreva s nižšou vlhkosťou má bezprostredný dopad na samotnú spotrebu palivového dreva a efektívnosť prevádzky. Ak teplovodný kotol v kotolni pre ústredné vykurovanie budov s tepelným výkonom 100 kW v horskej a podhorskej oblasti s dĺžkou vykurovacej sezóny 253 dní pri prevádzke s tepelnou účinnosťou $\eta_K = 89,81\%$ spotrebuje 60,9 ton/rok suchého dreva, resp. 75,4 ton/rok vzducho-suchého dreva, tak spaľovaním mokrého dreva s vlhkosťou $W = 60\%$ je

Tab. 1.

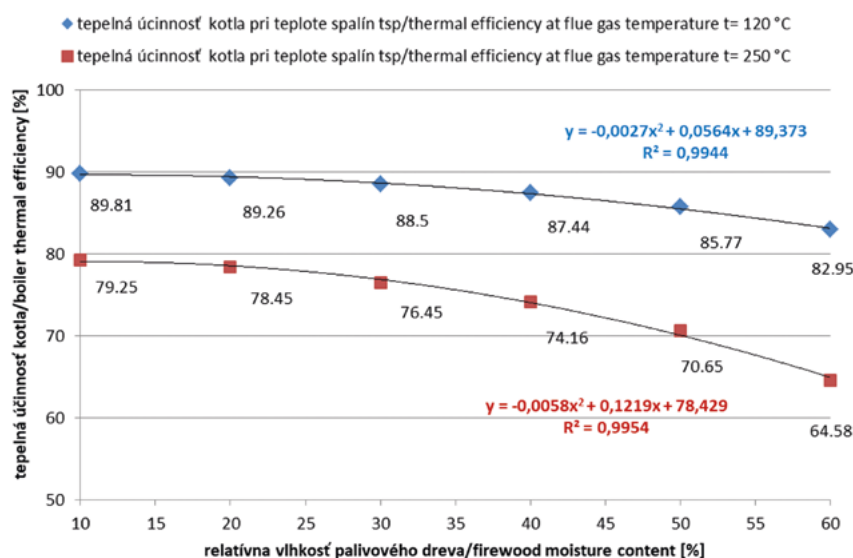
Tepelné straty a tepelná účinnosť kotla pre vlhkosť spaľovaného dreva $W = 10\text{--}60\%$ a teplotu emitovaných spalín do ovzdušia $t = 120\text{ °C}$
Heat loss and thermal efficiency of the boiler for the moisture content of the firewood $W = 10\text{--}60\%$ and the temperature of emitted flue gas to the atmosphere $t = 120\text{ °C}$

Parameter	Tepelné straty kotla/Boiler heat loss [%]					
	t = 120 °C					
Teplota spalín/Flue gas temperature						
Vlhkosť palivového dreva/Firewood moisture content [%]	10	20	30	40	50	60
Komínová tepelná strata/Heat loss in flue gas (ξ_{sp})	8,39	8,91	9,62	10,61	12,15	14,78
Strata tepla únikom prchavej horľaviny v spalinách/Heat loss caused by the volatile combustible loss in flue gas (ξ_{CO+C})	1,62	1,64	1,69	1,75	1,87	2,04
Strata tepla únikom neprchavej horľaviny v popole/Heat loss caused by the non-volatile combustible loss in the ash (ξ_C)	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,23
Tepelná účinnosť kotla/Boiler thermal efficiency (η)	89,81	89,26	88,50	87,44	85,77	82,95

Tab. 2.

Vplyv teploty spalín v rozpätí hodnôt $t_{sp} = 120\text{--}250\text{ °C}$ a vlhkosti spaľovaného dreva $W = 10\text{--}60\%$ na tepelnú účinnosť kotla
Influence of the flue gas temperature in the range of values $t_{sp} = 120\text{--}250\text{ °C}$ and moisture content of the firewood $W = 10\text{--}60\%$ on the thermal efficiency of the boiler

Teplota spalín/ Flue gas temperature [°C]	Vlhkosť palivového dreva/Firewood moisture content					
	W = 10 %	W = 20 %	W = 30 %	W = 40 %	W = 50 %	W = 60 %
	Tepelná účinnosť kotla/Boiler thermal efficiency [%]					
250	79,25	78,45	76,45	74,16	70,65	64,58
225	81,22	80,16	78,71	76,66	73,52	68,08
200	83,19	82,24	80,97	79,15	76,37	71,56
180	84,75	83,91	82,76	81,13	78,64	74,32
160	86,31	85,56	84,55	83,11	80,89	77,08
140	87,86	87,21	86,33	85,07	83,14	79,84
120	89,81	89,26	88,50	87,44	85,77	82,95



Obr. 1.

Závislosť tepelnej účinnosti kotla na vlhkosti spaľovaného dreva, teplote spalín emitovaných z kotla do atmosféry v intervale teplôt $t = 120$ – 250 °C a neprekračovaní emisných hodnôt 3. triedy STN EN 303-5:2012

Fig. 1.

Dependence of the boiler thermal efficiency on the moisture content of the wood, the temperature of the flue gases emitted from the boiler into the atmosphere in the temperature range $t = 120$ – 250 °C and not exceeding the emission values of class 3 of the Slovak standard EN 303-5: 2012

to 179,9 ton/rok, čo je 2,95krát viac než suchého dreva (DZURENDA, BANSKI 2019a). Výroba tepla z mokrého dreva s približne trojnásobnou spotrebou paliva v porovnaní so suchým palivovým drevom svedčí o plytvani a neefektívnom spotrebovaní domácej energetickej suroviny – dreva.

Uvedené skutočnosti sú vážnym argumentom pre využívanie ekonomicky efektívnych foriem vlhkosťnej úpravy palivového dreva – znižovanie vlhkosti dreva pred jeho spaľovaním. K takýmto technológiám, podľa prác SIMANOV (1995), JANDAČKA et al. (2007b) a DZURENDA, BANSKI (2016) patria technológie transpiračného sušenia konárov a vrcholcov stromov po ťažbe pred ich štiepkovaním, resp. prirodzené predsušenie kusového palivového dreva. Navyše teplo potrebné na procesy sušenia vo forme slnečného žiarenia a veternej energie prúdiaceho atmosférického vzduchu patrí do kategórie OZE – obnoviteľných zdrojov energie.

Spaľovanie suchého, resp. vzduchosuchého dreva neprispieva len k zvyšovaniu tepelnej účinnosti a efektívnosti prevádzky kotla, ale má i malé environmentálne dopady vo forme znižovania produkcie emisií (NEUŽIL et al. 1997; DZURENDA 2015; DZURENDA et al. 2015, 2017; RIMÁR et al. 2016; HORAK et al. 2017) a tepelnej záťaže atmosféry teplom emitovanými spalinami (DZURENDA, BANSKI 2019b). V poslednej citovanej práci sa uvádza, že výrobou 1 GJ tepla zo suchého dreva sa vyprodukuje a do atmosféry dopraví objem $V = 656 \text{ m}_n^3$ spalín o teplote $t = 120$ °C a atmosféra sa prehrieva $Q = 96,2$ MJ tepla. Spaľovaním mokrého dreva s vlhkosťou $W = 60$ % a ochladzovaním spalín na teplotu $t = 120$ °C sa do atmosféry dopraví $V = 1189 \text{ m}_n^3$ spalín a teplo v množstve $Q = 180$ MJ, čo je takmer dvojnásobná hodnota tepla privedeného do atmosféry. Tepelná záťaž atmosféry zo spaľovania vlhkého palivového dreva s vlhkosťou $W = 60$ % a ochladzovaním spalín na teplotu $t = 250$ °C je 4,5násobná.

ZÁVER

V príspevku je analyzovaný vplyv vlhkosti palivového dreva na tepelné straty a tepelnú účinnosť kotla pre spaľovanie palivového dreva s vlhkosťou $W = 10$ – 60 %, teplote spalín emitovaných z kotla do atmosféry $t = 120$ – 250 °C a regulácií procesu spaľovania, pri ktorej nebudú prekračované hodnoty emisií kotlov triedy 3 v zmysle STN EN 303-5:2012, t.j. koncentrácie oxidu uhľoňatého $\text{CO} = 2500 \text{ mg.m}^{-3}$ a popolčeka (sadzí) $\text{TZL}_c = 150 \text{ mg.m}^{-3}$ v spalinách.

Z vykonaných analýz a prezentovaných výsledkov tepelných strát kotla plynie, že najväčšou tepelnou stratou kotla pri spaľovaní suchého palivového dreva a ochladzovaním spalín na teplotu $t = 120$ °C je komínová strata, tvoriaca 8.39% podiel na celkových tepelných stratách kotla. Vplyvom vlhkosti palivového dreva komínová strata narastá o 76,2 %.

Zvýšená vlhkosť palivového dreva negatívne vplyva na tepelnú účinnosť kotla. Kým, pri spaľovaní palivového dreva s vlhkosťou $W = 10$ %, teplote emitovaných spalín do atmosféry $t = 120$ °C kotol dosahuje tepelnú účinnosť $\eta_{K-10\%} = 89,81$ %, tak pri tých istých prevádzkových podmienkach spaľovaním palivového dreva s vlhkosťou $W = 60$ % tepelná účinnosť kotla klesá na $\eta_{K-60\%} = 82,95$ %. S rastúcou teplotou emitovaných spalín je uvedený pokles tepelnej účinnosti kotla ešte výraznejší. Teplovodný kotol pri spaľovaní mokrého palivového dreva s vlhkosťou $W = 60$ % a teplote spalín $t = 250$ °C dosahuje tepelnú účinnosť kotla len $\eta_{K-60\%} = 64,58$ %.

Poklesy tepelnej účinnosti kotla spaľujúceho palivové drevo vyššej vlhkosti a legislatívne požiadavky na prevádzku kotlov sú vážnym argumentom pre znižovanie vlhkosti palivového dreva pred jeho spaľovaním a využívanie ekonomicky efektívnych foriem vlhkosťnej homogenizácie, akými sú napr. technológie transpiračného sušenia konárov

a vrcholcov stromov pred ich štiepkovaním, resp. prirodzeného predšúšania kusového palivového dreva.

Podakovanie:

Táto práca bola vypracovaná v rámci riešenia grantového projektu KEGA-SR č.003TU Z-4/2018 „Tvorba mikroklimy v interiéroch a vykurovanie budov palivovým drevom“, ako výsledok práce autora a výraznej pomoci agentúry KEGA-SR.

LITERATÚRA

- BUGALA M., DZURENDA L., PŇAKOVIČ L. 2015. Produkčný potenciál a energetické vlastnosti prirodzených porastov jelše lepkavej (*Alnus glutinosa* L.Gaertn.) z oblasti Kremnických vrchov. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 57 (2):15–25.
- DOMANSKI M., DZURENDA L., JABLONSKI M., OSIPIUK J. 2008. Drewno jako material energetyczny. Warszawa, SGGW: 131 s.
- DZURENDA L., GEFFERTOVA J., HECL.V. 2010. Energy characteristics of wood-chips produced from *Salix viminalis* – clone ULV. Drvna industrija, 61 (1): 27–31.
- DZURENDA L., ZOLIAK M. 2011. Chemické zloženie horľaviny energetickej štiepky z dendromasy plantážnický pestovanej dreviny *Populus klon Max 5*. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 53 (1): 87–92.
- DZURENDA L. 2015. Model of heat load on the atmosphere by flue gases. Manufacturing Technology, 15(5): 804–808.
- DZURENDA L., LADOMERSKÝ J., HRONCOVÁ E. 2015. Conversion factor of fuel-bound nitrogen to oxides in the process of spruce wood combustion in boiler grate furnaces. Polish Journal of Environmental Studies, 24 (2): 505–509.
- DZURENDA L., BANSKI A. 2015. Dependence of the boiler flue gas losses on humidity of woody biomass. Archives of Thermodynamics, 36 (4): 77–86.
- DZURENDA L., BANSKI A. 2016. Výroba tepla a energie z dendromasy. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene: 239 s.
- DZURENDA L., HRONCOVÁ E., LADOMERSKÝ J. 2017. Extensive operating experiments on the conversion of fuel-bound nitrogen into nitrogen oxides in the combustion of wood fuel. Forests, 8 (1): 1–9.
- DZURENDA L., BANSKI A. 2017. Influence of moisture content of combusted wood on the thermal efficiency of a boiler. Archives of Thermodynamics, 38 (1): 63–74.
- DZURENDA L., BANSKI A. 2019a. Firewood consumption model to create thermally comfortable indoor environment regarding the climate in Slovakia. In: AIP Conference Proceedings, 2118 (1): 30012:1-5. DOI: 10.1063/1.5114740
- DZURENDA L., BANSKI A. 2019b. The effect of firewood moisture content on the atmospheric thermal load by flue gases emitted by a boiler. Sustainability, 11 (1): 284.
- GEJDOŠ M., LIESKOVSKÝ M., SLANČÍK M., NĚMEC M., DANIHELOVA Z. 2015. Storage and fuel quality of coniferous wood chips. BioResources, 10 (3): 5544–5553.
- HOLUBEK D. 2002. Spaľovacie zariadenia, výmenníky tepla a kotly. Košice, ARS LITERA: 215 s.
- HOLUBČÍK M., JANDAČKA J. 2018. The effect of moisture content of firewood on the energy efficiency of fireplace insert and emission production in the combustion process. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 60 (2): 187–195.
- HORAK J., KUBONOVA L., KRPEC K., HOPAN F., KUBESA P., MOTYKA O., LACIOK V., DEJ M., OCHODEK T., PLACHA D. 2017. PAH emissions from old and new types of domestic hot water boilers. Environmental Pollution, 225: 31–39. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.034
- JANDAČKA J., MALCHO M., MIKULÍK M. 2007a. Biomasa ako zdroj energie. Žilina, GEORG: 241 s.
- JANDAČKA J., MALCHO M., MIKULÍK M. 2007b. Technológie pre prípravu a energetické využitie biomasy. Žilina, GEORG: 222 s.
- JANDAČKA J., MIČIETA J., HOLUBČÍK M., NOSEK R. 2016. Inovácie na zefektívnenie procesu spaľovania biomasy. Žilina, EDIS – vydavateľské centrum ŽU: 265.
- KOLLMANN F. 1951. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin-Göttingen-Heidelberg-Munchen, Springer Bd.I. 1050 s.
- MALAŤÁK J., VACULÍK P. 2008. Biomasa pro výrobu energie. Praha, ČZU: 206 s.
- MARUTZKY R., SEEGER K. 1999. Energie aus Holz und anderer Biomasse. Grundlagen, Technik, Emissionen, Wirtschaftlichkeit, Entsorgung, Recht. Leinfelden-Echterdingen, DRW: 352 s.
- NEUŽIL V., HEPPNER P., PICKOVÁ H. 1997. Emisní zátěž při použití různých druhů paliv. Energetika, 11/97: 359–363.
- NOSEK R., HOLUBČÍK M. 2016. Energy properties of air dry firewood. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 58 (1): 105–112.
- PASTOR M., DZURENDA L., BANSKI A., SLOBODNÍK B., BENČAĽ T. 2017. Energetic characteristics of the dendromass of branches in the Sweet Chestnut (*Castanea Sativa* Mill.). Acta Facultatis Xylogologiae, 59 (2): 127–135.
- RAJNIAK I., ZAVODNOV L., KUČÁK L. 1997. Tepelno-energetické a emisné merania. Bratislava, Ister Science: 481 s.
- RIMÁR M., FEDÁK M., KORSHUNOV A., KULIKOV A., MINDŽAKOVÁ J. 2016. Determination of excess air ratio during combustion of wood chips respect to moisture content. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 58 (2): 133–140.
- SIMANOV V. 1995. Energetické využití dřeva. Olomouc, Terapolis: 98 s.
- STN EN 303-5:2012. Vykurovacie kotly, časť 5. Vykurovacie kotly na tuhé palivá s ručným a automatickým prikladaním paliva s menovitým výkonom do 500 kW. Terminológia, požiadavky, skúšanie a označovanie. Bratislava, SUTN: 76 s.

EFFECT OF MOISTURE CONTENT OF FIREWOOD ON THE ENERGY EFFICIENCY OF LOW AND MEDIUM TEMPERATURE PROCESSING BOILERS

SUMMARY

Wood in a form of brushwood, branches or wood chips is considered a valuable energy source. In comparison to other solid fuels, wood is described as a fuel of medium calorific value, with the high proportion of volatile combustible and low proportion of inorganic elements – ash content. Affinity for water and water vapour is a negative property of firewood. Average moisture content of timber of freshly logged tree during the period of dormancy is $W = 35\text{--}65\%$ depending upon tree species. Firewood made of brushwood stored in a sheltered position can be air seasoned to the relative moisture content $W = 18\text{--}25\%$. Unprocessed wood waste resulting from mechanical processing of wood with the moisture content of $W = 10\%$ or dimensionally homogenous biofuel in a form of briquettes or pellets is attractive in terms of energy efficiency. Thermal efficiency for firewood depends on both boiler construction, operation and heating properties of firewood. Heating properties of dendromass are mainly dependent upon its moisture content. Basic heating characteristics, such as gross calorific value Q_g and net calorific value Q_n , as well as the process of burning wood in the boiler: flame temperature, flue gas volume, dew point of flue gas, emission production is affected by moisture content of firewood in negative way. Boiler energy efficiency is one of the essential criteria to evaluate the efficiency of heat production. It is defined as heat-to-power ratio. Indirect method, i.e. determining the energy efficiency following the standard heat losses of the boiler is one of the alternatives to determine boiler energy efficiency.

The paper is focused on analysing the effect of moisture content of firewood on heat loss and energy efficiency of low and medium temperature processing boilers with the power input up to 500 kW. The results of the effect of moisture content of burnt wood with the moisture content in the range $W = 10\text{--}60\%$ on boiler energy efficiency during cooling the flue gas in a boiler at the temperature ranging from $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ and emission production with the concentration of $\text{CO} = 2500\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and soot $\text{TZL}_c = 150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ associated with the boiler requirements of Class 3 in accordance with the standard STN EN 303:2012 are presented in the paper. Following the analyses (Tab.1), the fact that the chimney heat loss is the major energy loss can be stated. In the case of burning wood with the moisture content of 10%, its value is 8.4% from the total heat losses of the boiler.

Due to an increase in the moisture content of wood from $w = 10\%$ to 60%, there is an increase in the heat loss by 76.2%. Other heat losses, such as loss of volatile and non-volatile combustible in flue gas with the proportion of 1.6% and soot with the proportion of 0.2% are much lower losses in comparison to the chimney heat loss.

Energy efficiency of the boiler decreases as a result of an increase in the heat loss due to the moisture content. Following the results of energy efficiency of the boiler the fact that boiler energy efficiency decreases from the value of $\eta = 89.81\%$ to $\eta = 82.95\%$ due to an increase in the moisture content of wood from $w = 10\%$ to 60% while the flue gas is cooled to the temperature $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ can be stated. When the flue gas is cooled to the temperature of $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, there is a decrease in energy efficiency from $\eta = 79.25\%$ to $\eta = 64.58\%$.

Consumption of firewood is affected by decreasing the energy efficiency of the hot-water boiler by burning firewood with higher moisture content. It can be clearly explained through the example: if the consumption of a hot-water boiler in a central boiler room with the heat output of 100 kW in a mountain area with the length of heating season of 253 days with the energy efficiency of $\eta_k = 89.81\%$ is 60.9 ton/year of dry wood or 75.4 ton/year of air seasoned wood, in the case of burning wet wood with the moisture content of $W = 60\%$ the consumption is 179.9 ton/year, it is 2.95 times more of wet wood comparing to dry wood. Heat production from wet wood with approximately three times higher consumption of fuel in comparison to dry firewood provides an evidence of wasting the firewood and non-efficient utilisation – renewable source of energy.

Not only the efficient operation of a boiler but also the environment in a form of the atmospheric thermal load as a result of the heat emitted by flue gases is affected negatively by the moisture content of firewood. The fact that the volume of flue gas $V = 656\text{ m}_n^3$ with the temperature of $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ is transferred to the atmosphere when producing 1GJ of heat using dry wood is proven. The atmosphere is overheated $Q = 96.2\text{ MJ}$ of heat. In the case of burning wet wood with the moisture content of $W = 60\%$ and the temperature of emitted flue gas $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, the volume of flue gas transferred to the atmosphere is $V = 1189\text{ m}_n^3$ and the thermal load of the atmosphere is $Q = 180\text{ MJ}$. Mentioned amount of heat transferred to the atmosphere is almost twice as in the case of dry wood.

Apart from given facts about inefficient and no eco or environmentally friendly heat production from wood with higher moisture content in the Czech Republic and Slovakia, decreasing the moisture content of burned wood is supported by valid legislation. Requirements for energy efficiency of low and medium temperature processing boilers mentioned in the standard STN EN 303:2012 is at least $\eta_k = 77\%$. Burning wet wood of any moisture content is not allowed according to the mentioned requirement (Tab. 2). When the flue gas cannot be cooled to the temperature of $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ because of the construction of hot-water boiler, the moisture content of burnt firewood can be up to $W = 30\%$. In the case of boilers with cooling the flue gas to the temperature of $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, the moisture content of burnt wood can be up to $W = 50\%$.

A decrease in energy efficiency of boilers burning firewood with higher moisture content and requirements given in the standard are considered to be the reasons to decrease the moisture content of firewood prior to its burning and to start using economic efficient forms of pre-drying and seasoning of firewood such as technology of transpiration used to dry branches and tree tops before the production of wood chips or natural pre-drying of stored firewood logs in a sheltered position.

Zasláno/Received: 22. 10. 2019

Přijato do tisku/Accepted: 21. 02. 2020