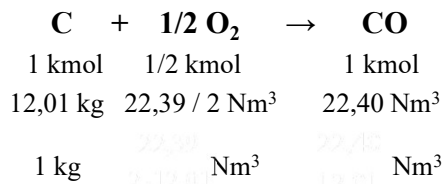


## Nedokonalé spalování

- palivo v kotli nikdy nevyhoří dokonale
- nedokonalost spalování je příčinou ztrát
  - hořlavinou ve spalínách
  - hořlavinou v tuhých zbytcích
- nedokonalost spalování tuhých a kapalných paliv se obvykle vztahuje pouze k nedokonalému vyhoření uhlíku
  - podíl  $a$  [kg/kg] uhlíku shoří nedokonalě na CO
  - podíl  $b$  [kg/kg] uhlíku neshoří vůbec

1

## Spalování uhlíku C na CO



2

## Části uhlíku $a$ a $b$

Části uhlíku  $a$  a  $b$  je možné vyjádřit ze ztráty chemickým a mechanickým nedopalem

$$a = \frac{Z_{co} \cdot Q_i}{(33828,5 - 10334) \cdot C^r} \quad b = \frac{Z_c \cdot Q_i}{33828,5 \cdot C^r} \quad [-]$$

kde

$Z_{co}$  a  $Z_c$  [-] je ztráta chemickým a mechanickým nedopalem,  
 $Q_i$  [kJ/kg] je výhřevnost paliva,  
 $C^r$  [-] je podíl uhlíku v původním palivu a  
 konstanty 33828,5 a 10334 kJ/kg jsou reakční tepla 1 kg uhlíku na CO<sub>2</sub> a CO

3

## Vliv nedokonalosti na složení a objem spalin

objem oxidu uhličitého

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{T^S \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

objem oxidu uhelnatého

$$O_{CO}^N = a \cdot \frac{22,4}{12,01} \cdot C^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

objem kyslíku

$$O_{O_2}^N = \left( \frac{a}{2} + b \right) \cdot \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

minimální objem suchých spalin při nedokonalém spalování pak je

$$O_{S^N \min}^N = O_{CO_2}^N + O_{SO_2}^N + O_{N_2}^N + O_{Ar}^N + O_{CO}^N + O_{O_2}^N \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

minimální objem vlhkých spalin je dán vztahem

$$O_{S^r \min}^N = O_{S^N \min}^N + O_{H_2O}^E \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

a objem spalin z 1 kg paliva při nedokonalém spalování s přebytkem vzduchu  $\alpha > 1$  bude

$$O_{S^r}^N = O_{S^r \min}^N + (\alpha - 1) \cdot O_{T^r \min} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

4

## Kontrola jakosti spalování

- jakost spalování nemá specifický ukazatel
- hodnotí se nepřímou pomocí
  - ztráty hořlavinou ve spalínách
  - ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích
  - přebytku spalovacího vzduchu
- pro jejich vyhodnocení je třeba určit
  - obsah kyslíku a CO ve spalínách
  - podíl nespálených látek v tuhých zbytcích

5

## Metodika kontroly spalování

Je třeba provést :

- chemickou analýzu spalin s cílem určit obsah O<sub>2</sub> a CO (případně i dalších emisních látek) – provádí se speciálními analyzátoři spalin
- chemický rozbor tuhých zbytků po spalování (škvára, úlet) s cílem určit podíl spalitelných látek – provádí se rozбором odebraných vzorků tuhých zbytků ve specializovaných laboratořích

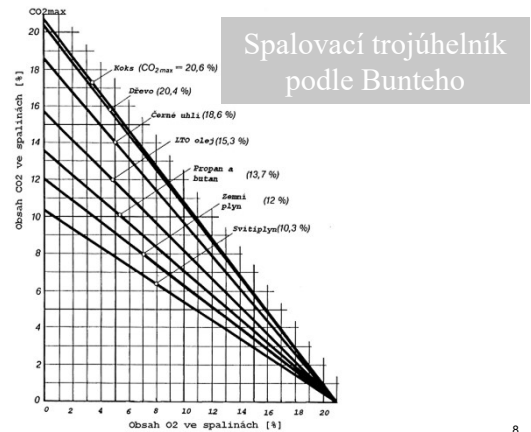
6

## Základní pravidla

Pro suché spaliny konkrétního paliva platí :

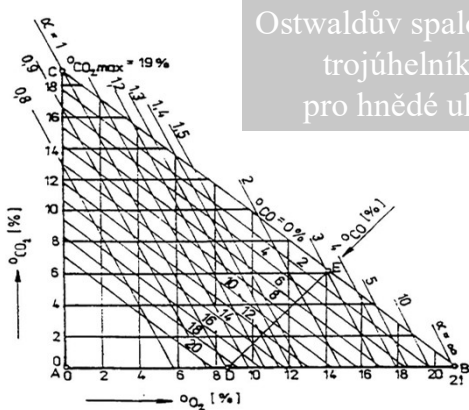
- při dokonalém spalování musí vzájemně odpovídat měřením určený obsah  $\text{CO}_2$  s obsahem  $\text{O}_2$  (resp. přebytkem vzduchu  $\alpha$ ).
- při nedokonalém spalování plynu musí vzájemně odpovídat měřením určený obsah  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  a obsah  $\text{O}_2$  (resp. přebytek vzduchu  $\alpha$ )
- při nedokonalém spalování tuhých a kalných paliv musí vzájemně odpovídat měřením určený obsah  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  (resp. přebytek vzduchu  $\alpha$ ) a obsah nespáleného uhlíku v TZ

7



8

## Ostwaldův spalovací trojúhelník pro hnědé uhlí



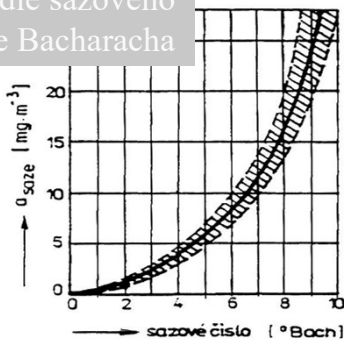
9

## Kontrola jakosti spalování

- V minulosti se Ostwaldův a Bunteův spalovací trojúhelník používaly ke kontrole spalovacího procesu.
- Dnes slouží
  - jako názorná pomůcka pro vysvětlení pevné závislosti mezi složkami suchých spalin  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$
  - pro kontrolu běžně používané měřicí techniky

10

## Koncentrace sazí ve spalninách dle sazového čísla podle Bacharacha



11

## Určení součinitele přebytku vzduchu

Za provozu kotle lze součinitel přebytku vzduchu určit

- pro dokonalé spalování z objemové koncentrace kyslíku v suchých spalinách ze vztahu

$$\alpha = \frac{0,21 + \left( \frac{O_{SS\min}}{O_{VS\min}} - 1 \right) \cdot o_{O_2}}{0,21 - o_{O_2}} \approx \frac{0,21}{0,21 - o_{O_2}}$$

- pro nedokonalé spalování pomocí numericko-početní metody prof. Jirouše zahrnuté do ČSN 07 0302 Přejímací zkoušky parních kotlů

12

## Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Metodicky je určení účinnosti kotlů měřením dáno normou ČSN EN 12952-15 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – Část 15: Přejímací zkoušky

- norma uvádí základní požadavky na zkoušky tepelného výkonu (přejímací zkoušky) používané u parních nebo horkovodních kotlů s přímým ohřevem
- zkoušky prokazují, že byly splněny garance s ohledem na účinnost a výkon nebo jiné parametry
- norma obsahuje (mimo jiné):
  - doporučení pro provádění přejímacích zkoušek
  - definici vnějšího okruhu kotelní sestavy a definici účinnosti
  - podrobnosti o nejistotě měření

13

## Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Zjednodušená metodika:

- používá se při návrhu nových kotlů – je zakomponována do návrhové metodiky
- při běžných provozních bilancích

Lze použít dvě metody určení účinnosti kotle :

- metoda přímá – vychází z definice účinnosti

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{vyr}}}{\dot{Q}_{\text{pr}}}$$

- metoda nepřímá

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{pr}} - \dot{Q}_z}{\dot{Q}_{\text{pr}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_{\text{pr}}} = 1 - \sum Z_i$$

14

## Určení účinnosti kotle a tepelných ztrát

Volba metody:

- přímá**
  - je-li možné provést přesná měření průtoku paliva – zemní plyn, olej
  - u malých kotlů - zahrnuje ztráty sáláním a konvekcí, čímž eliminuje nejistotu jejich měření
- nepřímá**
  - pro tuhá paliva, kdy není možné nebo je velmi obtížné přesně změřit velké hmotnostní průtoky
  - kdy se velmi mění vlastnosti paliv
- metody mají různé úrovně nejistoty měření - vždy by měla být použita metoda s největší přesností.

15

## Přímá metoda určení účinnosti kotle

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{vyr}}}{\dot{Q}_{\text{pr}}}$$

- tok tepla přivedeného do kotle (tepelný příkon)

$$\dot{Q}_{\text{pr}} = M_{\text{pal}} \cdot \dot{Q}_i \quad [kW] \quad \dot{Q}_{\text{pr}} = V_{\text{pl}} \cdot \dot{Q}_i \quad [kW]$$

- tepelný výkon kotle

$$\dot{Q}_{\text{vyr}} = M_w \cdot c_p \cdot (t_w - t_{nv}) \quad \text{resp.} \quad M_p \cdot (i_{pp} - i_{nv}) \quad [kW]$$

16

## Nepřímá metoda určení účinnosti kotle

$$\eta_V = 1 - \sum Z_i$$

Poměrné tepelné ztráty kotle  $i$  jsou

- $k$  - fyzickým teplem spalin (kominová)
  - $sv$  - sdílením tepla do okolí
  - $CO$  - hořlavinou ve spalinách
  - $C$  - hořlavinou v tuhých zbytcích
  - $f$  - fyzickým teplem tuhých zbytků
- } plynové kotle  
} kotle na tuhá paliva

Nejvýznamnější je ztráta kominová, závisí na

- teplotě spalin za kotlem
- přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem

17

## Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

- je způsobena obsahem uhlíku v tuhých zbytcích.

$$Z_c = \sum_i \dot{Q}_c \cdot \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot \frac{X_i}{\dot{Q}_i} \cdot A' = \frac{32700 \cdot A'}{\dot{Q}_i} \cdot \left( \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i + \frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r + \frac{C_p}{1 - C_p} \cdot X_p \right) \quad [-]$$

kvára (truska)      propad      popelk (úlet ve spalinách)

- $Q_c = 32700$  kJ/kg je výhřevnost uhlíku (nebo laboratorně zjištěná výhřevnost hořlaviny),
- $C_i$  (-) - obsah uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytku.
  - u roštových kotlů (9-16%, v propadu až 35 %),
  - u granulačních ohnišť 2 - 15 %,
  - u výtavných 0 %.
- $X_i$  - poměr hmotnosti popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků k hmotnosti popelovin v palivu (kg/kg).  
Součet  $X_s + X_r + X_p = 1$ .
- $A'$  (-) je obsah popelovin v palivu.

18

## Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

	$X_c$ (%)	$X_r$ (%)	$X_p$ (%)
Ohniště roštová	62-77	0-6	13-33
Ohniště granulární	10-20	-	75-80
Ohniště výtavná	35-50	-	40-55
Ohniště flučnická (stacionární)	68-80	0-2	20-30
Ohniště cyklonová	70-80	-	10-20

- Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích se nazývá též ztráta mechanickým nedopalem.

19

## Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

- spočívá v nevyužitém teple odcházejících TZ

$$Z_f = \sum_i \frac{1}{1 - C_i} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{Q_i^r} \cdot A^r = \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot \left( \frac{X_z \cdot i_z}{1 - C_z} + \frac{X_r \cdot i_r}{1 - C_r} \right)$$

- $i_i = c_i \cdot t_i$  (kJ/kg) je entalpie tuhých zbytků.
- Při výpočtech se pro teplotu TZ dosazuje
  - teplota škváry 600 °C,
  - teplota strusky 1500 °C.
- Ztráta fyzickým teplem popílku se obvykle zahrnuje do ztráty fyzickým teplem spalin formou entalpie úletu
- Ztráta  $Z_f$  je při spalování kapalných a plyných paliv nulová.

20

## Ztráta hořlavinou ve spalinách

- je dána chemickou nedokonalostí spalování
- projevující se obsahem nespálených plynů CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>x</sub> event. dalšími ve spalinách

$$Z_{CO} = (1 - Z_c) \cdot O_{SV} \cdot \frac{\sum_i q_i}{Q_i^r}$$

- $q_i = 12640 \cdot \omega_{CO} + 10800 \cdot \omega_{H_2} + 35800 \cdot \omega_{CH_4} + \dots$
- $O_{SV}$  (Nm<sup>3</sup>/kg, Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>) je objem spalin z 1 kg paliva nebo 1 Nm<sup>3</sup> plynu

21

## Ztráta fyzickým teplem spalin

- je dána energií odcházejících plyných spalin.
- přibližně ji lze určit ze vztahu

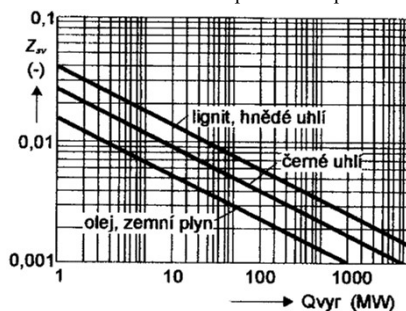
$$Z_k = (1 - Z_c) \frac{I_{S, \alpha_1}^{t_s, \alpha_1} - I_{S, \alpha_2}^{t_s, \alpha_1}}{Q_i}$$

- $I_{S, \alpha_1}^{t_s, \alpha_1}$  [kJ/kg<sub>paliva</sub> resp. kJ/Nm<sup>3</sup><sub>plynu</sub>] je entalpie spalin za kotlem
- $I_{S, \alpha_2}^{t_s, \alpha_2}$  [kJ/kg<sub>paliva</sub> resp. kJ/Nm<sup>3</sup><sub>plynu</sub>] je entalpie spalin při teplotě vzduchu v kotelně  $t_{vz}$  [°C]
- obvykle se označuje jako kominová ztráta
- bývá většinou největší ztrátou kotle
- rozhodující vliv má
  - teplota spalin za kotlem  $t_s$
  - součinitel přebytku vzduchu za kotlem  $\alpha$

22

## Ztráta sdílením tepla do okolí

- představuje teplo ztracené sáláním a vedením pláštěm kotle
- je funkcí velikosti kotle a druhu spalovaného paliva.



23

## Je třeba si uvědomit

- účinnost kotle není konstantní, mění se
  - s výkonem kotle
  - se změnou provozních parametrů kotle
  - se změnou teploty pracovního média
  - s vlastnostmi paliva
  - s teplotou okolního vzduchu
  - se zanesením výhřevných ploch kotle

Proto v ročních bilancích nelze počítat se jmenovitou účinností kotle, nýbrž s účinností průměrnou, která respektuje

- závislost účinnosti na výkonu kotle
- počet najždění kotle ze studeného stavu
- udržování kotle v teplé záloze atd.

24

## Optimalizace spalování

Cílem optimalizace spalování je dosažení maximální účinnosti kotle

- nejčastěji se provádí optimalizací množství a distribuce spalovacího vzduchu
- s rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu
  - klesají ztráty hořlavinou ve spalínách a TZ
  - roste ztráta komínová

25

## Optimální přebytek spalovacího vzduchu

Závisí na

- druhu spalovaného paliva
- možnostech spalovacího zařízení

Spalování plynu

- atmosférické hořáky  $\alpha \sim 1,5$  až  $2$
- přetlakový hořáky  $\alpha \sim 1,05$  až  $1,25$

Spalování uhlí

- na pevném roštu  $\alpha \sim 2$  až ???
- na mechanickém roštu  $\alpha \sim 1,5$  až  $2,5$
- ve formě prášku  $\alpha \sim 1,15$  až  $1,3$

26

## Spalování zemního plynu

Vliv nedokonalosti spalování na účinnost kotle

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SSmin}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_i^r}$$

$$O_{2ref} = 3 \%$$

$$O_{SSmin} = 8,54 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$$

$$Q_i^r = 36\,400 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$mgCO = 100 \text{ mg/Nm}^3$$

$$Z_{CO} = 0,028 \%$$

27

## Spalování zemního plynu

Vliv přebytku vzduchu na účinnost kotle

$$Z_k = \frac{I_S^{t_s, \alpha_t} - I_S^{t_s, \alpha_t}}{Q_i^r}$$

Určení součinitele přebytku vzduchu

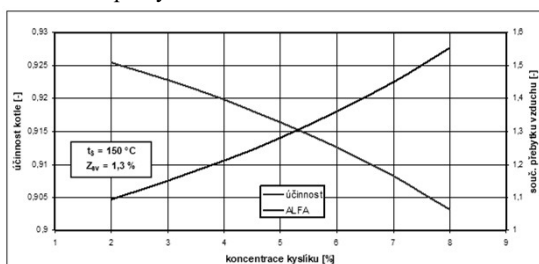
$$\alpha = \frac{0,21 + \left( \frac{O_{SSmin}}{O_{TSSmin}} - 1 \right) \cdot o_{O_2}}{0,21 - o_{O_2}}$$

$$O_{SSmin} \doteq O_{TSSmin} \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{0,21}{0,21 - o_{O_2}}$$

28

## Spalování zemního plynu

Vliv přebytku vzduchu na účinnost kotle



Optimální seřízení hořáku plynového kotle – na minimální přebytek vzduchu kdy je ještě dodržen emisní limit CO

29

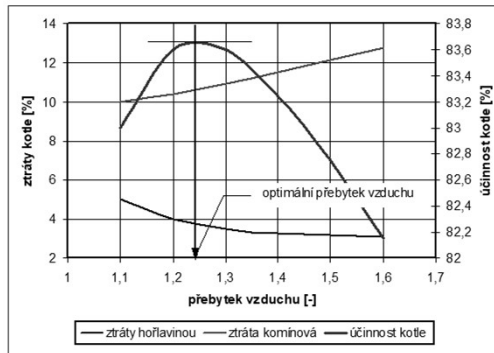
## Spalování tuhých paliv

přibývají další dvě ztráty

- fyzickým teplem tuhých zbytků
  - závisí na obsahu popela v palivu
  - pohybuje se v řádu desetin %
- hořlavinou v tuhých zbytcích
  - závisí na
    - vlastnostech paliva
    - způsobu spalování
    - přebytku spalovacího vzduchu
  - pohybuje se v řádu jednotek %

30

## Optimalizace spalování tuhých paliv



31

## Komplikace při určování účinnosti kotlů na tuhá paliva

- přímou metodu nelze obvykle použít – problém s určením průtoku paliva do kotle
- je třeba znát přesné složení paliva
- reálná výhřevnost paliva se mění v závislosti na obsahu vody
- přesné určení ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích vyžaduje laboratorní analýzu

32

## Shrnutí

- **Přímá metoda** určení účinnosti kotle
  - je poměrně jednoduchá, neboť vyžaduje minimální počet měřených veličin
  - dobře aplikovatelná u plynových a olejových kotlů
  - podává jen všeobecnou informaci o účinnosti kotle
  - nedostačující informace pro posuzování kvality provozu a zejména pak pro rozbor dosažených výsledků a návrh opatření
- **Nepřímá metoda** určení účinnosti kotle
  - poskytuje přesnější výsledky a podrobnější informaci o provozních vlastnostech kotle

33

## Kondenzační kotle

Problém :

- kondenzací částí vodní páry se mění složení a objem spalin připadajících na 1 Nm<sup>3</sup> spáleného plynu

Důsledek :

- u nepřímé metody nelze použít klasické vztahy pro určení tepelné kapacity spalin

Možné řešení :

- použít návod dle :  
Dlouhý-Valenta : Zjišťování tepelné účinnosti plynových kotlů a kotelen – viz [www.TZBinfo.cz](http://www.TZBinfo.cz)

Pozor :

- metoda vztahuje účinnost kotle ke spalnému teplu plynu => **výsledek není porovnatelný s účinností vyjádřenou pomocí výhřevností, která dává vyšší hodnoty**

34