

# SPALOVÁNÍ A KOTLE

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

1

## Literatura

V. Černý, B. Janeba, J. Teyssler: Parní kotle – technický průvodce, SNTL 1983

T. Dlouhý: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skripta ČVUT 2007

P. Basu, C. Kefa, L. Jestin: Boilers and Burners - Design and Theory, Springer 1999

2

## ENERGIE

Pro výrobu elektřiny a dodávky tepla jsou využívány především tyto formy energie:

- primární energetické zdroje, zejména pak:
  - chemicky vázaná energie fosilních paliv jako je:
    - uhlí
    - uhlovodíková paliva, ropa a zemní plyn
  - jaderná energie
- obnovitelné zdroje energie – z těchto je z hlediska tepelné energetiky zajímavá
  - biomasa
  - solární energie
- energie získaná z tzv. „Druhotných energetických zdrojů“ (DEZ)
  - palivové DEZ
  - tepelné DEZ,

3

## Fosilní paliva

**Fosilními palivy** označujeme všechny látky, které vznikly nejspíše již v době třetihor z biomasy či organismů a které při slučování s kyslíkem uvolňují tepelnou energii.

Mohou mít skupenství

- > tuhé (uhlí, rašelina, olejnaté břidlice),
- > kapalné (ropa)
- > plynné (zemní plyn)

Fosilní (přírodní) paliva jsou základem pro výrobu paliv umělých, tzn. koksu, topného oleje, syngasu nebo zkapalněných plynů.

4

## Přírodní a umělá paliva

Stav přírodního paliva	Přírodní palivo	Umělá paliva
pevné	uhlí, rašelina	koks, brikety, uhelný prášek
kapalné	ropa	všechny destilační produkty z ropy a zkapalněného uhlí
plynné	zemní plyn, plyn z ropného nadloží, důlní plyn	plyny vzniklé odplyněním (koksárenský), zplyněním (svítiplyn, generátorový plyn) a při destilaci plynu (kapalné plyny - propan, butan)

5

## BIOMASA

Obnovitelné palivo

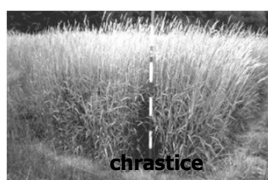
Rozeznáváme především

- zbytkovou (odpadní) biomasu
  - dřevní odpady z lesního hospodářství - štěpka
  - odpady z celulózo-papírenského, dřevařského a nábytkářského průmyslu
  - rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny
  - komunální bioodpad
  - odpady z potravinářského průmyslu
- cíleně pěstovanou biomasu
  - energetické byliny
  - rychlerostoucí dřeviny



## Energetické byliny

Druh rostlin	Termín setí	Termín sklizně	Výnos suché hmoty v t/ha
Třitikale	25. 9. – 10. 10.	VII, VIII	10–12
Komonice bílá	IV–V	(VIII), IX	12–15
Slunečnice topinambur	V	IX (X, XI)	8–10
Šťovík krmný	V–VII	VII, (VIII)	15–25
Chrastice–lesknice rákosovitá	podzim (brzy z jara)	VI, VII	9–10 (15)
Kostřava rákosovitá	III, IV	VII	8–14



## Rychlerostoucí dřeviny

### Vrby a topoly

- vysoká produkce dřeva v první dekádě růstu
- 10 t (suš.)/ha/rok = 180 GJ/ha/rok
- rychlý výškový růst (1 - 3 m/rok)
- snadné a levné rozmnožování
- pařezová výmladnost



## Složení paliv

Každé palivo se skládá z

- hořlaviny
- přítěže = balastu

Hořlavina = část, jejímž oxidováním se uvolňuje teplo chemicky vázané v palivu. Skládá se z

- aktivních látek, jejichž spalováním vzniká teplo
  - uhlíku (C),
  - vodíku (H)
  - síry (S),
- z pasivních látek, které teplo nedodávají, ale jsou chemicky vázány na uhlovodíky
  - kyslíku (O)
  - dusíku (N)

9

## Přítěž (balast)

- u paliv tuhých a kapalných
  - popeloviny
  - voda
- u plyných paliv
  - obsah vodní páry
  - nehořlavých plynů.
- hlavními složkami popelovin jsou minerální látky
  - jílové minerály ( $Al_2O_3$ ,  $2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ),
  - karbonáty ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $FeCO_3$ ),
  - sulfidy ( $FeS_2$ ),
  - sulfáty (např.  $MgSO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ),
  - oxidy ( $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ )
  - chloridy alkalických kovů (KCl, NaCl) a další.

10

## Jednotkové množství paliv

Pro jednotlivé druhy paliv je jednotkovým množstvím paliva

1 kg pro pevná a kapalná paliva

1 Nm<sup>3</sup> pro plyná paliva = normální metr krychlový platí pro 0 °C a 101,325 kPa

Nm<sup>3</sup> je základní objemovou jednotkou též pro určování objemů spalin a vzduchu – viz dále

11

## Vlastnosti tuhých paliv

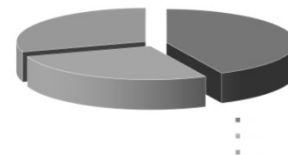
Složení – uvádí se hmotnostním podílem základních složek

- hořlaviny  $h^r$
- popela  $A^r$
- vody  $W^r$

platí

$$h^r + A^r + W^r = 1 \text{ resp. } 100 \% \text{ hm.}$$

Složení paliva se určuje hrubým rozborem analytického vzorku



12

## Hrubý rozbor tuhého paliva

- složení a tedy i jakost tuhých paliv je proměnlivá
- pro zajištění jednotných vlastností musí být tuhé palivo před spalováním rozměrově i kvalitativně homogenizováno
- kvalita dodávky a složení paliva se stanovuje hrubým rozbořem odebraných reprezentativních vzorků

### Vzorkování

- při odběru vzorku musí být zachovány všechny důležité charakteristiky původního paliva
- ČSN ISO 5069-1,2 Hnědá uhlí a lignity – zásady vzorkování
- ČSN EN ISO 18135 – Tuhá biopaliva – Vzorkování
  - předepisuje především způsob odběru dílčích vzorků z různých dopravních prostředků i skládek
  - způsob úpravy hrubého vzorku na vzorek laboratorní, popř. analytický

13

## Vzorkování

Obecný postup při odběru a úpravě vzorku je následující :

- z paliva se odebírají dílčí vzorky o předem stanovené hmotnosti  $m$  (kg), která závisí na maximální velikosti zrna  $D$  (mm)

$$m = 0,06 \cdot D$$

- Dílčí vzorky se odebírají
  - v určitých místech (vagónu, skládky apod.)
  - v určitých intervalech (u proudícího množství)
- Počet  $n$  těchto dílčích vzorků závisí na celkovém množství vzorkovaného paliva  $b$  (t) a požadované přesnosti  $P$

$$n = i \sqrt{\frac{b}{1000}}$$

kde  $i$  je normou stanovený výchozí počet dílčích vzorků z množství do 1000 t

14

## Úprava vzorků

- souhrn všech odebraných dílčích vzorků dává tzv. hrubý vzorek
- hrubý vzorek se upravuje na analytický vzorek podle ČSN 44 1304 - Metody odběru a úpravy vzorků pro laboratorní zkoušení

### Hrubý rozbor

- cílem je stanovení obsahu vody, popela a hořlaviny

15

## Poměrný obsah vody $W$

Voda je v palivu nebo na palivo vázána různými způsoby

- **Přimíšená voda**
  - dá se z paliva odstranit mechanicky - odkapáním nebo odstředěním
  - nepovažuje se za část původního paliva
- **Hrubá voda** se zjistí z úbytku hmotnosti vzorku jeho sušením na vzduchu při teplotě místnosti a relativní vlhkosti vzduchu asi 50 %.
- **Zbylá voda**
  - je kapilárně vázaná voda, která zůstane ve vzorku po odstranění vody hrubé
  - zjistí se z úbytku hmotnosti laboratorního vzorku (vzorek bez hrubé vody se zrněním pod 3 mm) jeho sušením ve vzdušné sušárně při teplotě 105 až 110 °C.
- **Veškerá voda** je pojem označující součet hrubé a zbylé vody (zpravidla se uvádí v technických rozbořech)

16

## Poměrný obsah vody $W$

- **Okludovaná voda**
  - je nepatrné množství vody adsorbované na hořlavinu paliva
  - při rozbořu se zahrnuje do prchavé hořlaviny.
- **Hydrátová voda**
  - je krystalová voda minerálů
  - počítá se k popelovinám.

17

## Poměrný obsah popela $A$

**Popel** je zbytek po žhání vzorku paliva.

- laboratorně se poměrné množství popela v palivu zjistí z úbytku hmotnosti analytického vzorku oxidací při teplotě  $815 \pm 25$  °C
- vzorek v otevřeném kelímku se zahřívá v elektrické muflové peci způsobem předepsaným normou ČSN ISO 5071-1
- popel není totožný s popelovinami  $M$  = minerální část surového paliva
- Při spalování se jednotlivé složky popelovin mění
  - vypařuje se hydrátová voda
  - kalcinací uhlíčanů se odštěpuje  $\text{CO}_2$ ,
  - při pražení pyritů se odštěpuje  $\text{SO}_2$
  - oxiduje Fe atd.
- v konečné hmotnostní bilanci je zpravidla hmotnost popela  $A$  menší než hmotnost popelovin  $M$
- poměr  $M/A = f$  se nazývá **popelový faktor**
- u domácích uhlí bývá  $f = 1,03$  až  $1,10$ .

18

### Poměrný obsah hořlaviny $h$

- určuje se pouze počtetně jako doplněk součtu poměrného obsahu veškeré vody a popela na 100 %

$$\bar{h} = 1 - (W + A)$$

- u paliv s větším obsahem popela (přibližně  $A \geq 10\%$ ) je nutno respektovat vliv popelového faktoru, obsah hořlaviny  $h$  je pouze zdánlivý, skutečný obsah hořlaviny bude

$$h' = h - A \cdot (1 - f)$$

neboli

$$h' = 100 - (W + M)$$

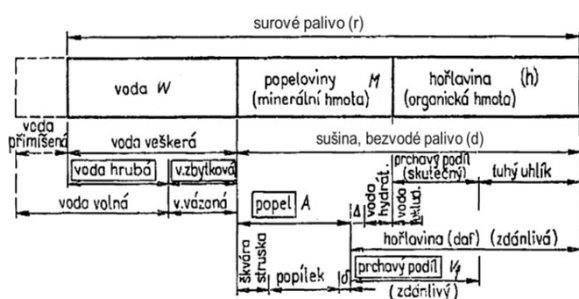
19

### Prchavá hořlavina $V$

- z hlediska spalování je významné rozdělení hořlaviny na tuhý a prchavý podíl
- poměr obou složek závisí na stáří paliva, u fosilních tuhých paliv charakterizuje stupeň prouhelnění
- prchavý podíl se stanoví z úbytku hmotnosti analytického vzorku (změni pod 0,2 mm) po 7 minutách žhání v uzavřeném kelímku při teplotě  $850 \pm 15^\circ\text{C}$
- zbývající část hořlaviny tvoří neprchavý organický zbytek - v podstatě pouze tuhý uhlík (koks), jehož výhřevnost je konstantní (zhruba 33,9 MJ/kg)
- výhřevnost prchavé hořlaviny je značně proměnlivá v závislosti na stupni prouhelnění (v mezích asi 56 MJ/kg u černého uhlí až 20 MJ/kg u dřeva)
- množství a výhřevnost prchavé hořlaviny mají rozhodující vliv na reaktivitu paliva (rychlost jeho vznícování a vyhořívání).

20

### Schéma hrubého rozboru



21

### Výhřevnost a spalné teplo

Výhřevnost paliva  $Q_i$  [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{kJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ,  $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$  nebo  $\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ] je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg (1  $\text{Nm}^3$ ) paliva při ochlazení spalin na standardní výchozí teplotu  $20^\circ\text{C}$ , přičemž vzniklá vodní pára nezkondenzuje.

Spalné teplo  $Q_s$  [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , atd.] je celkové latentní chemicky vázané teplo v palivu vztažené ke  $20^\circ\text{C}$  včetně kondenzačního tepla vodní páry ve spalinách z paliva.

Vztah mezi spalným teplem a výhřevností je

$$Q_i = Q_s - 2453 \cdot (W + 8,94 \cdot H) \quad [\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$$

$W$  je obsah vody v palivu [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

$H$  je obsah vodíku v palivu [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

2453 je měrné skupenské teplo vodní páry [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

22

### Stanovení výhřevnosti tuhého paliva

- klasický kalorimetr
  - vzorek paliva se spálí v uzavřené nádobě naplněné kyslíkem ponořené ve vodní lázni o teplotě  $20^\circ\text{C}$
  - uvolněné teplo ohřeje vodní lázeň
  - z ohřátí lázně se vyhodnotí spalné teplo
  - ze spalného tepla se vypočte výhřevnost
- moderní kalorimetr
  - pracuje zcela automaticky
  - výsledkem měření je spalné teplo i výhřevnost
- statistický vzorec vypracovaný z rozborů českých paliv používaný v celém rozsahu prakticky používaných tuhých paliv od koksů až po dřevo



$$Q_i' = 34,75 \cdot C' + 95,3 \cdot H' - 10,9 \cdot (O' - S') - 2,5 \cdot W' \quad [\text{MJ/kg}]$$

23

### Značení

Analytické ukazatele tuhých paliv se označují

- základním symbolem - vyjadřuje určitou charakteristiku nebo vlastnost paliva (např.:  $W$  - obsah vody,  $Q$  - chemicky vázané teplo, aj.),
- dolním indexem - doplňuje a blíže specifikuje základní symbol (např.  $W_t$  - veškerá voda,  $W_M$  - hydrátová voda, atd.),
- horním indexem - udává stav paliva, na který je daná charakteristika nebo vlastnost vztažena (např.  $W^r$  - voda v původním stavu, atd.)
- výsledky analýz a spalné teplo se přepočítávají na různý stav tak, že se vynásobí faktorem podle tabulky

24

Prepočet výsledků rozboru na různé stavy paliva

Faktor pro prepočet na	původní stav	analytický vzorek	bezvodé palivo	hořlavinu (zdánlivou)	organickou hmotu (skutečnou hořlavinu)
Prepočet z	r	a	d	daf	o
původního stavu	r	1	$\frac{1-W^r}{1-W^d}$	$\frac{1}{1-W^d-A^d}$	$\frac{1}{1-W^d-M^d}$
analytického vzorku	a	$\frac{1-W^r}{1-W^a}$	1	$\frac{1}{1-W^a-A^a}$	$\frac{1}{1-W^a-M^a}$
bezvodého paliva	d	$1-W^r$	$1-W^a$	1	$\frac{1}{1-A^d}$
hořlaviny (zdánlivé)	daf	$1-W^r-A^r$	$1-W^a-A^a$	$1-A^d$	1
organické hmoty (skutečné hořlaviny)	o	$1-W^r-M^r$	$1-W^a-M^a$	$1-M^d$	$\frac{1-A^d}{1-A^d}$

25

Prepočty výhřevnosti

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot (W_i^r + 8,94 \cdot H^r)$$

$$Q_i^a = Q_s^a - 2453 \cdot (W_i^a + 8,94 \cdot H^a)$$

$$Q_i^d = Q_s^d - 21930 \cdot H^d \quad [kJ / kg]$$

$$Q_i^{daf} = Q_s^{daf} - 21930 \cdot H^{daf}$$

$$Q_i^o = Q_s^o - 21930 \cdot H^o$$

Částečným vysušením paliva se obsah veškeré vody sníží z hodnoty  $W_1$  na hodnotu  $W_2$ , a tím se zvýší výhřevnost

$$Q_{i2}^r = Q_{i1}^r \cdot \frac{1-W_{t2}}{1-W_{t1}} + 2453 \cdot \frac{W_{t1}-W_{t2}}{1-W_{t1}} \quad [kJ / kg]$$

26

Prvkové složení hořlaviny tuhých paliv

- organická hmota fosilních tuhých paliv pochází hlavně z pravěkých rostlin
- C, H a O tvoří 95 až 98 % hořlaviny
- poměr C/O roste se stářím (se stupněm prouhelnatění) paliva
- obsah N a S pocházejících z bílkovin rostlinného původu nebo mikroorganismů je nepatrný, přesto významný
- podle prvkového složení lze hořlavinu popsat vztahem

$$h^{daf} = \frac{h}{1-A-W} = C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + N^{daf} + O^{daf} = 1$$

kde jsou

$C^{daf}, H^{daf}, S^{daf}, N^{daf}, O^{daf}$  hm. podíly prvků v hořlavině [kg/kg]

- zastoupení jednotlivých prvků se určuje analytickým rozбором

27

Vlastnosti hořlaviny tuhých paliv

Druh	Popis	Složení hořlaviny				Spalné teplo		Typ plamene
		V <sup>daf</sup> [%g]	C <sup>daf</sup> [%g]	H <sup>daf</sup> [%g]	O <sup>daf</sup> [%g]	Q <sub>s</sub> <sup>daf</sup> [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	Q <sub>s</sub> <sup>daf</sup> [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	
Dřevo	na otop	cca 85	40-50	6,0-5,0	45-30	21800		dlouhý-svitivý
Rašelina	sušená	cca 60	35-50	6,2-3,5	35-20	20400		dlouhý-svitivý
Lignit	hodonín	cca 55	50-60	6,0-5,0	30-20	26500		dlouhý-svitivý
Hnědė	severočes.	53-54	74-69	6,0-5,9	24-19	31700-28400		dlouhý-svitivý
Černé	karvinské	39-32	81-85	5,8-5,6	14-10	35800-33000		dlouhý a silně svitivý
Antracit	CKD	10-16	90-91	4,0-3,7	6,0-4,5	36600-35600		krátký a málo svitivý

28

Síra

- vyskytuje se ve všech druzích tuhých paliv
- její obsah může rozhodovat o tom, zda je vůbec palivo použitelné – nutné dodržení emisního limitu
- má nepříznivý vliv na všechny jeho kvalitativní ukazatele, zvláště však:
  - zhoršuje výhřevnost (spalné teplo síry je zhruba 1/3 spalného tepla uhlíku),
  - zvysuje podíl SO<sub>2</sub> ve spalinách odcházejících do ovzduší,
  - výrazně zvysuje rosný bod spalin (koroze a zalepování výhřevných ploch v oblasti nízkých teplot),
  - způsobuje snížení charakteristických teplot popela (struskové nánosy v oblasti vysokých teplot),
  - prispívá k samovznícení uhlí na skládkách.

29

Síra

V tuhých palivech je vázána

- na organickou hmotu – síra organická  $S_o$  spalitelná
- na minerální hmotu – síra anorganická  $S_M$ 
  - jako síra elementární (čistá)
  - ve formě sírníků (sulfidů)  $S_s$
  - ve formě pyritů  $S_p$
  - ve formě síranů (sulfátů)  $S_{SOM}$  nespalitelná
- Lepší představu než podíl síry v palivu  $S^r$  nebo  $S^{daf}$  dává tzv. měrná sírnatost  $S$  – udává, kolik gramů síry připadá na jednotku výhřevnosti surového paliva

$$S = \frac{1000 \cdot S^r}{Q_i^r} \quad [g / MJ]$$

30

## Další nežádoucí příměsi tuhých paliv

### Chlor

- přítomen převážně ve formě chloridů
- emisní plyn
- způsobuje korozi výhřevných ploch

### Alkalické kovy Na, K

- přítomné především v rostlinné biomase a odpadech
- způsobují intenzivní zanášení výhřevných ploch kotle a v kombinaci s Cl i jejich korozi

### Těžké kovy – Hg, Cd a další

- Hg v uhlí a odpadech – platí přísný emisní limit
- rostlinná biomasa může obsahovat dosti vysoké obsahy různých těžkých kovů v závislosti na biotopu (Sr, As, Se, ...)

31

## Fyzikální a chemické vlastnosti TP

**Hustota  $\rho$**  ( $\text{kg/m}^3$ ) nebo ( $\text{t/m}^3$ ) – závisí jednak na poměrném obsahu vody, popelovin a organické hmoty, jednak na chemickém složení hořlaviny (prouhelnění).

**Sypná hmotnost  $\rho_{\text{syp}}$**  ( $\text{t/m}^3$ ), je hmotnost objemové jednotky volně sypaného paliva; závisí především na hustotě  $\rho$ , ale také na zrnění

### Rozměr částic

- uhlí se třídí na zrna určité velikosti (resp. rozmezí velikosti) – viz tabulka
- pro biomasu platí ČSN EN ISO 17225-1 Tuhá biopalivy – Specifikace a třídy paliv

**Teplota vznětu** – je důležitá jak pro optimální návrh spalovacího zařízení tak i z hlediska bezpečnostního – riziko samovznícení paliva na skládkách v důsledku samovolné oxidace

**Výbušnost** – schopnost rozšířit spalování vyvolané v libovolném místě prachového mraku o dostatečné koncentraci na celý objem tohoto mraku

32

## Zrnění tříděného uhlí a koks

UHLÍ			KOKS		
Zn.	Třída	Rozměr [mm]	Zn.	Třída	Rozměr [mm]
<b>Hnědé uhlí</b>					
ko	kosťka	40 - 100	SLK1	slévarenský koks 1	nad 80
h	pecka	20 - 100	SLK2	slévarenský koks 2	60-100
o1	ořech 1	20 - 40	VK 1	vysokopecní koks 1	40-90
o2	ořech 2	10 - 20	VK 2	vysokopecní koks 2	40 90
o3	ořech 3	10 - 16	VK 3	vysokopecní koks 3	25-90
d1	drobné 1	0 - 40		otopová směs	40-100
d2	drobné 2	0 - 20		kosťka	60-80
d3	drobné 3	0 - 16		ořech 1	40-60
hp	hruboprach	0 - 10		ořech 2	20-40
ts	topná směs	0 - 40		hrašek	10-20
ps	průmyslová směs	0 - 40		prach	0-10
				karbonkoks	20-80
<b>Černé uhlí</b>					
	kusv	50 - 200			
	kosťka	50 - 80			
	ořech1	30 - 50			
	ETP	30 - 80			
	oříšek	10 - 30			
	hrašek	10 - 18			
	topná směs	0 - 10(30)			
	prach	0 - 5 (6)			
	proplástek	0 - 30			

## Rozměrové třídění dřevní štěpky

rozměrová nehomogenita i kvalita dřevní štěpky může být značná



- 1) nevytříděná štěpka lepší kvality
- 2) rozhraní mezi lepší a méně štěpkou
- 3) podrcené nevytříděné surové smrkové větve

34

## Rozměrové třídění dřevní štěpky

Pro dřevní štěpku ČSN EN ISO 17225-1 uvádí:

- rozměrové třídy
  - rozměrové rozpětí hlavního podílu – minimálně 60 hm %
  - délku a maximální podíl hrubých částic v mm a hm %
  - maximální délka částic v mm
- např. rozměrová třída P100
  - 3,15 mm < P < 100 mm,
  - hrubý podíl ≤ 10 % > 150 mm,
  - max. délka částic ≤ 350 mm
- max. podíl jemných částic F < 3,15 mm v rozpětí 5 až 30 a více hm %
- max. podíl vody M v rozpětí 10 až 55 a více hm %
- max. podíl popela A<sup>d</sup> v rozpětí 0,5 až 10 a více hm %
- dále třídy dle obsahu N<sup>d</sup>, S<sup>d</sup>, Cl<sup>d</sup> a sypné hmotnosti

35

## Popel (popelovina)

pochází

- z anorganických složek vegetace,
- z minerálů vniklých do usazenin (ve fázi vzniku uhlí)
- vnější popeloviny - určité množství minerálních příměsí, které se do paliva dostanou při těžbě, manipulaci a dopravě

Rozhodující vliv na složení a jakost popela mají popeloviny epigenetické (sekundární) a popeloviny vnější

Složení popelovin – určuje se jejich chemickým rozložením; způsob a postup stanovení je předepsán ČSN 44 1358

- zjišťují se zejména tyto složky vyskytující se v popelovinách prakticky všech uhelných typů:

SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; CaO; MgO; Na<sub>2</sub>O; K<sub>2</sub>O; SO<sub>3</sub>;

- podle okolností a potřeby se zjišťují také (popřípadě i nenormovanými metodami)

TiO<sub>2</sub>; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Cl atd.

36

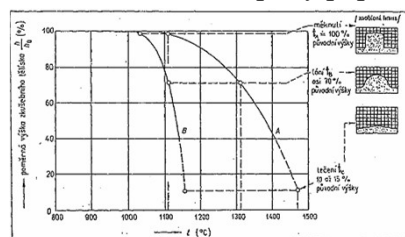
## Fyzikální a chemické vlastnosti popelovin

### Termofyzikální vlastnosti

- chování popelovin při vysokých teplotách v ohništi je u většiny paliv jedním z nejvýznamnějších faktorů jak z hlediska konstruktéra, tak i provozovatele
- nejrozšířenějším kritériem chování popelovin při vysokých teplotách jsou tzv. charakteristické teploty popela:
  - teplota měknutí  $t_m(T_M)$ ,
  - teplota tavení  $t_d(T_D)$
  - teplota tečení  $t_C(T_C)$
- definice těchto teplot jakož i způsob a postup jejich určení jsou uvedeny v ČSN 44 1359
  - popel získaný z laboratorního vzorku paliva se slisuje do tvaru válečku o výšce i průměru 3 mm (nebo do krychličky o hraně 3 mm);
  - toto tělíčko se zahřívá předepsanou rychlostí v elektrické peci
  - sleduje se (popřípadě současně fotografuje) jeho deformace a změny tvaru a zároveň se zaznamenává teplota
- zjištěné hodnoty  $T_M, T_D, T_C$  lze zakreslit do souřadnic  $t-h/h_0$  a třemi body proložit křivku tavení popela, která dává představu o chování popela v ohništi

37

## Charakteristické teploty popela



- Vzorek (A) je příklad tzv. dlouhého popela, s velkým intervalem mezi  $t_A$  a  $t_B$ . V oblasti těchto teplot popel ještě není plně roztaven, neteče, ale nalepuje se na stěny spalovací komory
- Vzorek (B) představuje tzv. krátký popel, který velice rychle přechází plastickou oblastí ( $t_A - t_B$ ) do taveniny o nízké viskozitě, takže na stěně spalovací komory se vytvoří poměrně tenká vrstva stékající strusky.

38

## Mechanické a chemické působení popela

- při spalování dochází částečnému nebo úplnému roztavení popelových částic s těmito riziky
  - spékání – tvorba velkých shluků, které brzdí odvod popela
  - nalepování na výhřevné plochy kotle – nánosy blokují přestup tepla a intenzifikují korozi
- jemné popelové částičky jsou unášeny proudem spalin
  - usazují se na výhřevných plochách a blokují přestup tepla
  - způsobují otěr (abrazí a erozi) kovových materiálů, zvláště koncových výhřevných ploch a kouřovodů

39

## Teuneův index (KT)

sklonu paliva k tvoření struskových nánosů

$$K_T = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO}$$

Charakteristika	$K_T [-]$	Teplota tečení $t_C [°C]$
lehce tavitelné	< 2,4	< 1 150
středně tavitelné	2,4 až 4,5	1 150 až 1 400
těžce tavitelné	>4,5	> 1400

40

## Ukazatel Babcock - Wilcox

- pro tvorbu struskových nánosů

$$R_s = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \cdot S_d$$

- pro tvorbu popílkových nánosů

$$R_p = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \cdot Na_2O$$

kde  $S_d$  je síra v sušině v hmotnostních [%]

Náchylnost popela k tvorbě nánosů	Struskových (v ohništi) $R_s$	Popílkových (konvekční tah) $R_p$
slabá	<0,6	<0,2
střední	0,6 až 2,0	0,2 až 0,5
velká	2,0 až 2,6	0,5 až 1,0
velmi velká	>2,6	>1,0

41

## Kapalná paliva

= topné oleje – převážně se připravují z ropy

Ropa se skládá :

- z organických látek ve formě kapalných uhlovodíků
- z nepatrného podílu příměsí
  - síra
  - voda
  - minerální balast – v některých případech s vysokou koncentrací těžkých kovů, z nichž podstatný je zejména vanad

Proces zpracování surové ropy probíhá dvoustupňově

- frakční destilací
- krakováním

42





## Složení plyných paliv

Hlavními složkami topných plynů jsou

- uhlovodíky -  $C_mH_n$
- další hořlavé plyny –  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$
- balastní plyny –  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$

Složení se obvykle uvádí výčtem objemových podílů plyných složek v 1  $Nm^3$  paliva

$Nm^3$  = kubík plynu za normálních podmínek, tj. pro 0 °C a 101,325 kPa = normální metr krychlový

49

## Složení plyných paliv

Příklad složení zemního plynu

$CH_4$	0,981695
$C_2H_6$	0,005910
$C_3H_8$	0,002020
$C_4H_{10}$	0,000791
$C_5H_{12}$	0,000212
$C_6H_{14}$	0,000172
$CO_2$	0,000910
$N_2$	0,008290

Výhřevnost 36 409 kJ/ $Nm^3$

50

## Vlastnosti topných plynů

Vlastnosti topných plynů, které rozhodují

- o použití plynů
- o konstrukci hořáků pro jejich spalování

jsou :

- složení plynu
- spalné teplo  $Q_s$
- výhřevnost  $Q_i$
- relativní hustota plynu  $d_v$  = poměr hustoty plynu a hustoty suchého vzduchu při shodných podmínkách
- Wobbeho kritérium

$$W_i = \frac{Q_i}{\sqrt{d_v}}$$

- je základním kritériem záměnnosti druhů plynu
- vyjadřuje podmínku zachování tepelného příkonu spotřebiče při změně spalovacích vlastností zemního plynu
- teplota vznícení plynu
- rychlost hoření plynu  $u_{max}$

51

## Důležité vlastnosti paliv z hlediska spalování - shrnutí

- složení
- měrný tepelný obsah paliva (spalné teplo a výhřevnost)
- teplota vznícení paliva
- rychlost hoření
- spalovací teplota, resp. teplota plamene
- u tuhých paliv
  - podíl prchavé hořlaviny
  - termoplastické vlastnosti popela

52