

# SPALOVÁNÍ A KOTLE

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

1

## 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,

2

## 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. koksů, topného oleje, syngasu nebo zkapalněných plynů.

3

## 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)

4

# 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
Tritikale	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



tritikale



chrastice

## 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 nedávají, ale jsou chemicky vázány na uhlovodíky
  - kyslíku (O)
  - dusíku (N)

## Přítěž (balast)

- u paliv tuhých a kapalných
  - popeloviny
  - voda
- u plynných paliv
  - obsah vodní páry
  - nehořlavých plynů.
- hlavními složkami popelovin jsou minerální látky
  - jílové minerály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),
  - karbonáty ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ),
  - sulfidy ( $\text{FeS}_2$ ),
  - sulfáty (např.  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ),
  - oxidy ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
  - chloridy alkalických kovů ( $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ) a další.

9

## Jednotkové množství paliv

Pro jednotlivé druhy paliv je **jednotkovým množstvím** paliva

1 kg pro pevná a kapalná paliva

1  $\text{Nm}^3$  pro plynná paliva = **normální metr krychlový**  
platí pro 0 °C a 101,325 kPa

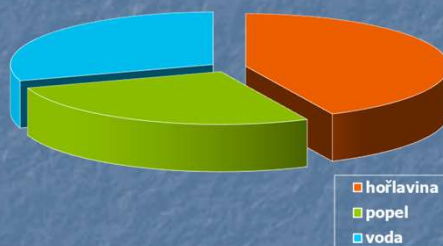
$\text{Nm}^3$  je základní objemovou jednotkou též pro určování objemů spalin a vzduchu – viz dále

10

## 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

11

## 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 rozborem** 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

12

## 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

13

## 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

14

## 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 zbude 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 rozborech)

15

## Poměrný obsah vody $W$

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

16



## 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  $815 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- 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 uhličitánů 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  $1,10$ .

17

## Poměrný obsah hořlaviny $h$

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

$$h = 1 - (W + A)$$

- 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

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

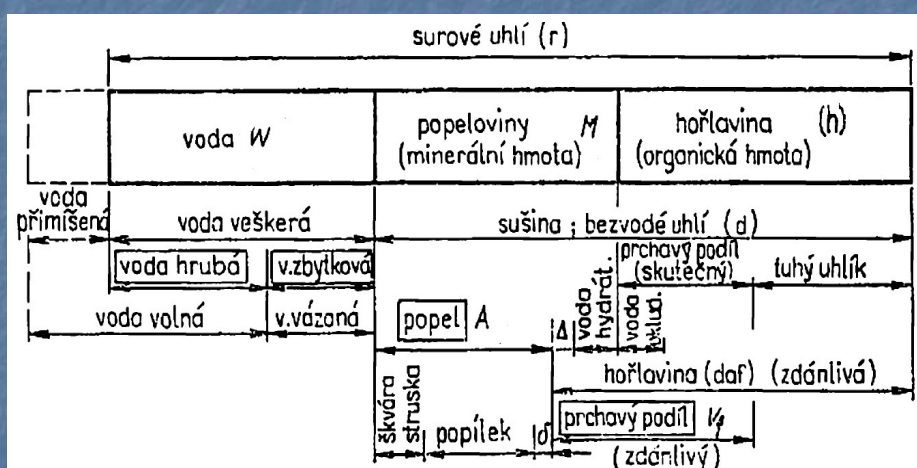
18

## Prchavá hořlavina $V$

- z hlediska spalování je významné rozdělení hořlaviny na **tuhý a prchavý podíl**
- poměr obou složek záleží na stáří paliva, u fosilních tuhých paliv charakterizuje stupeň prouhelnění
- prchavý podíl se stanoví z úbytku hmotnosti analytického vzorku (zrnění pod 0,2 mm) po 7 minutách žhání v uzavřeném kelímku při teplotě  $850 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- 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 žírného uhlí, až 20 MJ/kg u lignitů)
- množství a výhřevnost prchavé hořlaviny mají rozhodující vliv na reaktivitu paliva (rychlost jeho vzněcování a vyhořívání).

19

## Schéma hrubého rozboru



20

## 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°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 °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 [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

21

## Statistické vzorce pro určení výhřevnosti TP

- Du Longův vzorec vhodný pro starší, silně prouhelnatělá uhlí (antracit, černé uhlí)

$$Q_i^r = 33,91 \cdot C^r + 121,42 \cdot H^r - 15,18 \cdot O^r + 10,47 \cdot S^r - 2,45 \cdot W^r \quad [\text{MJ/kg}]$$

- Vondráčkův vzorec doporučovaný pro mladší paliva (hnědé uhlí, lignit)

$$Q_i^r = (37,14 - 2,58 \cdot C^{daf}) \cdot C^r + 90,88 \cdot H^r - 11,26 \cdot O^r + 10,47 \cdot S^r - 2,45 \cdot W^r \quad [\text{MJ/kg}]$$

- statistický vzorec vypracovaný z rozborů československých paliv používaný v celém rozsahu prakticky používaných tuhých paliv od koksu až po dřevo

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

22

## Značení

Analytické ukazatele tuhých paliv se označují

- **základním symbolem** - vyjadřuje určitou charakteristiku nebo vlastnosti 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

23

## Přepočet výsledků rozboru na různé stavy paliva

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

24

## Přepočty výhřevnosti

$$\begin{aligned}
 Q_i^r &= Q_s^r - 2453 \cdot (W_t^r + 8,94 \cdot H^r) \\
 Q_i^a &= Q_s^a - 2453 \cdot (W^a + 8,94 \cdot H^a) \\
 Q_i^d &= Q_s^d - 21930 \cdot H^d \quad [kJ / kg] \\
 Q_i^{daf} &= Q_s^{daf} - 21930 \cdot H^{daf} \\
 Q_i^o &= Q_s^o - 21930 \cdot H^o
 \end{aligned}$$

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

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

25

## 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 rozborem**

26

## Vlastnosti hořlaviny tuhých paliv

PALIVO		Složení hořlaviny				Spalné teplo	Typ plamene
Druh	Popis	V <sup>dat</sup> [%]	C <sup>dat</sup> [%]	H <sup>dat</sup> [%]	O <sup>dat</sup> [%]	Q <sub>s</sub> <sup>dat</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
Hnědé	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	OKD	10-16	90-91	4,0-3,7	6,0-4,5	36600-35600	krátký a málo svitivý

27

## 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),
  - zvyšuje podíl SO<sub>2</sub> ve spalinách odcházejících do ovzduší,
  - výrazně zvyšuje rosný bod spalin (koroze a zalepování výhřevných ploch v oblasti nízkých teplot),
  - způsobuje snížení charakteristických teplot popela (struskové nánosy v oblasti vysokých teplot),
  - přispívá k samovznícení uhlí na skládkách.

28

## 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 siřičků (sulfidů)  $S_s$
    - ve formě pyritů  $S_p$
    - ve formě síranů (sulfátů)  $S_{SO_4}$  nespalitelná
- } spalitelná
- Lepší představu než podíl síry v palivu  $S^r$  nebo  $S^{daf}$  dává tzv. **měrná sirnatost**  $S$  – udává, kolik gramů síry připadá na jednotku výhřevnosti surového paliva

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

29

## Další nežádoucí příměsi tuhých paliv

### Chlor

- přítomen převážně ve formě chloridů v uhlí i v biomase
- 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, ...)

30

## 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 a vlhkosti

### 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

**Melitelnost uhlí** - vyjadřuje poměr mlecí práce potřebné k rozemletí daného (zkoušeného) paliva a mlecí práce potřebné k rozemletí paliva standardního (etalonového, porovnávacího). Metody stanovení melitelnosti nejsou dosud normovány; používá se

- metoda podle Všesvazového tepelnětechnického institutu VTI
- metoda podle Hardgrovea
- metoda podle VÚK

31

## Sypná hmotnost paliv

Palivo	$\text{kg/m}^3$
Surové uhlí černé	800 – 1000
Surové uhlí hnědé	700 – 850
Kostka, severočeské hnědé	641 – 758
Ořech, severočeské hnědé	645 – 755
Prach 0 – 10 mm hnědý	650 – 750
Rašelina vyschlá na vzduchu	200 – 275
Jehličnaté palivové dřevo vyschlé na vzduchu	350 – 450
Listnaté palivové dřevo vyschlé na vzduchu	650 – 710
Dřevní štěpka	180 – 260
Pelety dřevní	450 – 650
Pelety rostlinné	300 – 550
Balíkováná sláma	80 – 160

32



## Zrnění tříděného uhlí a koksu

UHLÍ			KOKS		
Zn.	Třída	Rozměr [mm]	Zn.	Třída	Rozměr [mm]
<b>Hnědé uhlí</b>					
ko	kostka	40 - 100	SLK1	slévárenský koks 1	nad 80
h	pecka	20 - 100	SLK2	slévárenský 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		kostka	60-80
d3	drobné 3	0 - 16		ořech 1	40-60
hp	hruboprach	0 - 10		ořech 2	20-40
ts	topná směs	0 - 40		hrášek	10-20
ps	průmyslová směs	0 - 40		prach	0-10
<b>Černé uhlí</b>				karbonkoks	20-80
	kusy	50 - 200			
	kostka	50 - 80			
	ořech1	30 - 50			
	ETP	30 - 80			
	oříšek	10 - 30			
	hrášek	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)



2)



3)

- 1) nevytříděná štěpka lepší kvality
- 2) rozhraní mezi lepší a méně štěpkou
- 3) podroené 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
  - $3,15 \text{ mm} < P < 100 \text{ mm}$ ,
  - hrubý podíl  $\leq 10 \%$   $> 150 \text{ mm}$ ,
  - max. délka částic  $\leq 350 \text{ mm}$
- max. podíl jemných částic  $F < 3,15 \text{ mm}$  v rozpětí 5 až 30 a více hm %
- max. podíl vody M v rozpětí 10 až 55 a více hm %
- max. podíl popela  $A^d$  v rozpětí 0,5 až 10 a více hm %
- dále třídy dle obsahu  $N^d$ ,  $S^d$ ,  $Cl^d$  a sypné hmotnosti

35

## Fyzikální a chemické vlastnosti TP

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

- důležitými parametry jsou
  - velikost částic
  - obsah prchavé hořlaviny
  - vlhkost paliva

Druh paliva	Prchavý podíl $V^{daf}$ (%)	Teplota vznětu (prášek ve vzduchu) (°C)	Teplota výbuchu (prášek na kovové misce zahřáté na teplotu) (°C)	Meze výbušnosti ( $\text{gm}^{-3}$ )	
				spodní	horní
hnědé uhlí živíčné	až 60	208	375 až 400	35 až 80	$\geq 1300$
hnědé uhlí pálavé a celistvé	asi 52	218	450 až 470	50 až 120	1900 až 2600
černé uhlí:					
pálavé a plynné	28 až 40	214 až 230	580	80 až 200	$\geq 1600$
žírné	19 až 28	243 až 250	610	240 až 350	$< 2000$
koksové	14 až 19	260			
antracitové	10 až 14	340	680	asi 400	$\leq 1800$
antracit	6 až 10	485			
hutní koks	1,6 až 6	600	$> 750$		

## Fyzikální a chemické vlastnosti TP

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

PALIVO	Teplota vznícení [°C]
Antracit	480
Hnědé uhlí celistvé	250 až 350
Hnědé uhlí lignit	400 až 450
Hnědouhelné brikety	200 až 250
Hnědouhelný prach	150 až 170
Dřevo tvrdé	300 až 400
Dřevo měkké	200 až 300
Dřevěné uhlí	250 až 450
Koks	550 až 700
Saze	500 až 600
Černé uhlí	300 až 600
Černouhelný prach	150 až 220
Piliny	170
Rašelina vysušená	225 až 280
Celulóza	360

37

## 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 uhlí mají popeloviny epigenetické (sekundární) a popeloviny vnější

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

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

$\text{SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaO}$ ;  $\text{MgO}$ ;  $\text{Na}_2\text{O}$ ;  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{SO}_3$ ;

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

$\text{TiO}_2$ ;  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; Cl atd.

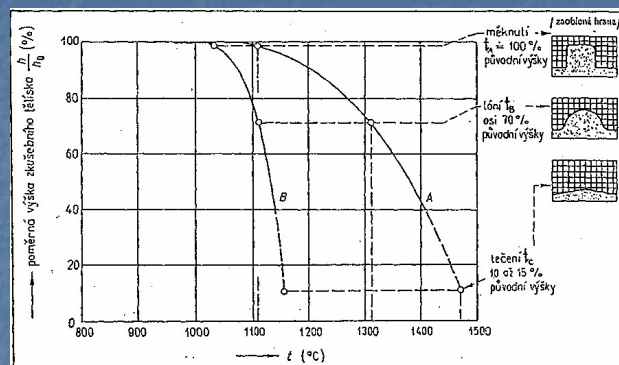
38

## 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**:
- definice teplot i způsob jejich určení jsou uvedeny v ČSN ISO 540 (441359)
  - 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 tělísko se zahřívá předepsanou rychlostí v elektrické peci
  - sleduje se (popřípadě současně fotografuje) jeho deformace a změny tvaru a zároveň se zaznamenává teplota
- stanovuje se
  - teplota deformace – prvotní známky zaoblení okrajů tělíska
  - teplota kulovitěho tvaru – dříve **teplota měknutí**  $t_{mk}(T_A)$ , okraje tělíska zcela zaobleny
  - teplota polokulovitěho tvaru – dříve **teplota tavení**  $t_{tv}(T_B)$ , tělísko roztaveno do tvaru připomínající polokouli, kdy je výška stejná jako polovina průměru základny
  - teplota tečení**  $t_c(T_C)$  - výška tělíska je rovna třetině výšky při  $T_B$
- zjištěné hodnoty  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  lze zakreslit do souřadnic  $t-h/h_0$  a třemi body proložit křivku tavení popela, která dává představu o chování popela v ohništi

## 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.

## 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 (abrazi a erozi) kovových materiálů, zvláště koncových výhřevných ploch a kouřovodů
- zvětšení obsahu popela v uhlí
  - zhoršuje jeho melitelnost (zvětšuje spotřebu mlecí práce)
  - zvyšuje opotřebení mlýnů a mlecích okruhů

41

## 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

42

## 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

43

## 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

44

## Kvalita topných olejů

- druhy se liší zejména
  - viskozitou
  - bodem tuhnutí
  - obsahem síry
- podle hustoty se topné oleje dělí na
  - **extra lehké (TOEL)** - z petrolejů a plynových olejů
  - **lehké (LTO)** - z atmosférických a vakuových plynových olejů
  - **těžké (TTO)** - směsi vysokovroucích ropných frakcí a zbytků

### Aditivace topných olejů

Obvykle se rozlišují tři typy pro

- zlepšení spalování
- zlepšení tekutosti
- korozní ochranu

45

## Vlastnosti topných olejů

Pro transport a spalování jsou důležité vlastnosti

- hustota
- viskozita a bod tuhnutí kapaliny
- výhřevnost  $Q_i$  [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
- bod zápalnosti
- bod samovznícení
- obsah vody  $W$
- obsah popelovin
- složení hořlaviny - uvádí se analogicky jako u tuhých paliv
- Conradsonovo číslo – zbytek při koksování
- obsah smoly
- mísitelnost olejů

46

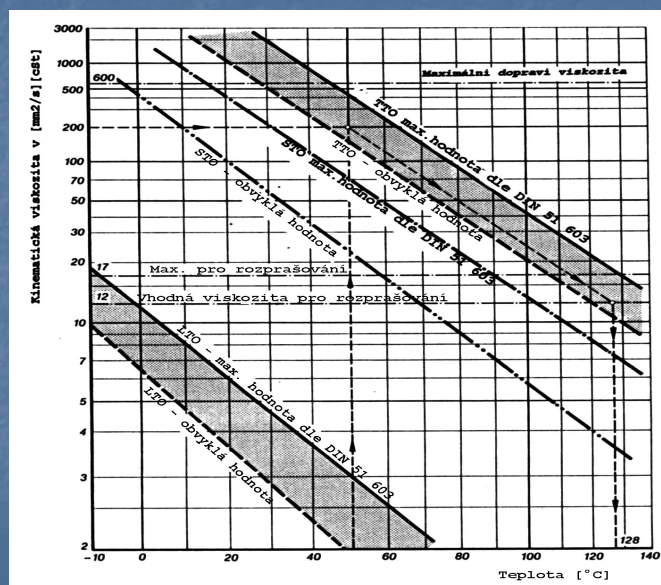
## Vlastnosti topných olejů

Vlastnost	Jednotky		TOEL	LTO	TTO
Hustota při 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	max.	860	920	990
Do 350 °C predestiluje	% obj.	min.	85	20	-
Kinematická viskozita při 20 °C	mm <sup>2</sup> /s	max.	6		-
Kinematická viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s		-	3,2 až 18	-
Kinematická viskozita při 100 °C	mm <sup>2</sup> /s	max.	-	-	57
Obsah popela	% hm.	max.	0,01	0,02	0,14
Obsah mechanických nečistot	% hm.	max.	0,1	0,1	1,0
Bod vzplanutí (Pensky-Martens)	°C	min.	56	66	110 <sup>a</sup>
Bod tuhnutí	°C	max.	-15	10 <sup>b</sup>	40
Výhřevnost MJ/kg	min.		42,9	41	39
Obsah síry	% hm.	max.	0,2	-	-
málosirný	% hm.	max.	-	1,0	1,0
středněsirný	% hm.	max.	-	2,0	2,0
vysokosirný	% hm.	max.	-	-	3,0

<sup>a</sup> Bod vzplanutí v otevřeném kelímku    <sup>b</sup> Platí pro letní období, v zimě -5 °C

47

## Závislost viskozity topných olejů na teplotě



48



## Plynná paliva

- mají stále větší význam ve vytápěcí technice
- v oblasti malých a středních výkonů vytěsňují kapalná a tuhá paliva

Výhody :

- nízká měrná emise znečišťujících látek ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ , TL)
- nejnižší měrná emise [ $\text{g.MJ}^{-1}$ ] skleníkového plynu  $\text{CO}_2$  ze všech fosilních paliv (především u zemního plynu)
- možnost lokální kogenerační výroby elektrické energie a tepla v malých jednotkách již od elektrického výkonu 5 kW
- možnost výroby elektrické energie s velmi vysokou účinností
- využití v palivových člancích

49

## Složení plyných paliv

Hlavními složkami topných plynů jsou

- uhlovodíky -  $\text{C}_m\text{H}_n$
- další hořlavé plyny –  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$
- balastní plyny –  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$

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

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

50

## Složení plyných paliv

Příklad složení zemního plynu

CH <sub>4</sub>	0,981695
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,005910
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,002020
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,000791
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,000212
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,000172
CO <sub>2</sub>	0,000910
N <sub>2</sub>	0,008290

Výhřevnost 36 409 kJ/Nm<sup>3</sup>

51

## Dělení topných plynů

dělení dle jejich původu na

- přírodní zemní plyn z ropných nalezišť
- průmyslové plyny
  - svítiplyn resp. dnes procesní plyn ze zplyňování uhlí, biomasy a odpadů (syngas)
  - koksárenský plyn
  - kychtový plyn z klasické hutní výroby železa
  - bioplyn z čistíren odpadních vod, z fermentačních procesů apod.
- kapalně plyny z rafinace ropy (propan a butan).

52

## 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  $W_i = \frac{Q_i}{\sqrt{d_v}}$
- teplota vznícení plynu
- rychlost hoření plynu  $u_{\max}$

53

## 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

54