

# 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. koksů, 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 celulózno-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



## 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 okysličováním 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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),
  - 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.

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 plynná 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

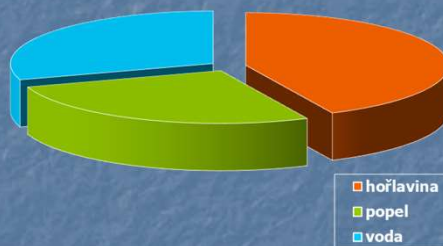
**Složení** – uvádí se hmotnostním podílem základních složek

- 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 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 rozbořech)

16



## Poměrný obsah vody $W$

- **Okludovaná voda**
  - je nepatrné množství vody adsorbované na hořlavinu paliva
  - při rozboru se zahrnuje do prehavé 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 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  $1,10$ .

18

## 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

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

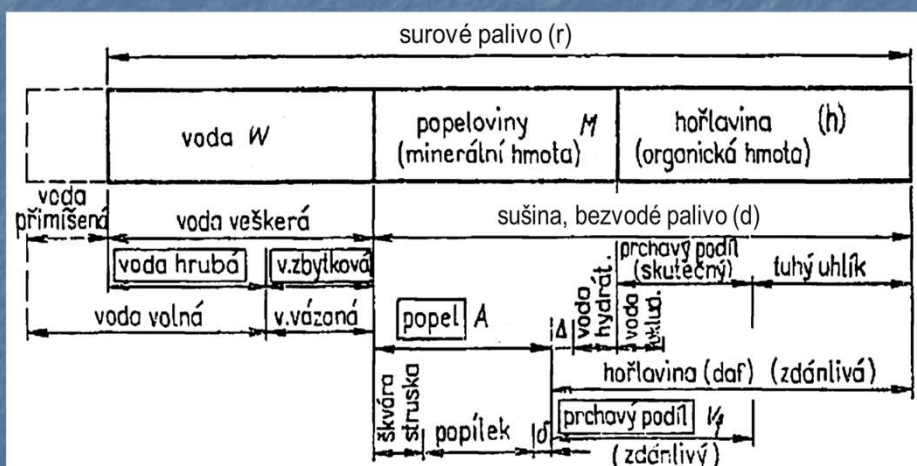
19

## 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 (změnění pod 0,2 mm) po 7 minutách žíhání 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 uhlí až 20 MJ/kg u dřeva)
- množství a výhřevnost prchavé hořlaviny mají rozhodující vliv na reaktivitu paliva (rychlost jeho vzněcování 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 [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

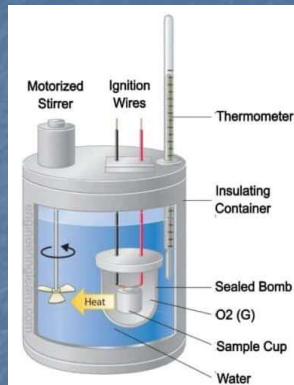
2453 je měrné skupenské teplo vodní páry [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

22



## Stanovení výhřevnosti tuhého paliva

- klasický kalorimetr
  - vzorek paliva se spálí v uzavřené nádobě naplněné kyslíkem ponořené ve vodní lázni o teplotě 20 °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 koksu až po dřevo



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

23

## 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

24

## Přepočet výsledků rozboru na různé stavy paliva

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

25

## Přepočty výhřevnosti

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

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

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

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

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

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 rozbořem**

27

## Vlastnosti hořlaviny tuhých paliv

PALIVO		Složení hořlaviny				Spalné teplo	Typ plamene
Druh	Popis	V <sup>daf</sup> [%]	C <sup>daf</sup> [%]	H <sup>daf</sup> [%]	O <sup>daf</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
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

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),
  - zvyšuje podíl  $\text{SO}_2$  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.

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 siřičků (sulfidů)  $S_s$
    - ve formě pyritů  $S_p$
    - ve formě síranů (sulfátů)  $S_{SO_4}$  nespalitelná
- } spalitelná  
} nespalitelná
- Lepší představu než podíl síry v palivu  $S^r$  nebo  $S^{daf}$  dává tzv. **měrná siřinatost**  $S$  – 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  $\rho_{syp}$**  ( $\text{t/m}^3$ ), 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 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) podrocné nevytříděné surové smrkové větve



## 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

## 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 rozbořem; způsob a postup stanovení je předepsán ČSN 44 1358

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

$SiO_2$ ;  $Al_2O_3$ ;  $Fe_2O_3$ ;  $CaO$ ;  $MgO$ ;  $Na_2O$ ;  $K_2O$ ;  $SO_3$ ;

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

$TiO_2$ ;  $P_2O_5$ ;  $Cl$  atd.

36

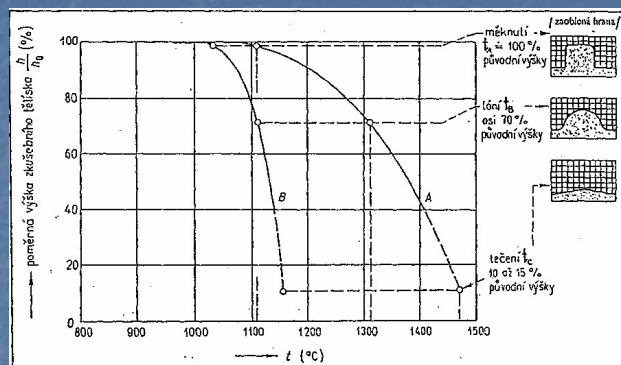
## Fyzikální a chemické vlastnosti popelovin

### 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  $t_{mk}(T_A)$ ,
  - teplota tavení  $t_{ta}(T_B)$
  - teplota tečení  $t_{tc}(T_C)$
- 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  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  lze zakreslit do souřadnic  $t-h/h_0$  a třemi body proložit křivku tavení popela, která dává představu o chování popela v ohništi

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 (abrazi 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

## 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

43

## 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

44

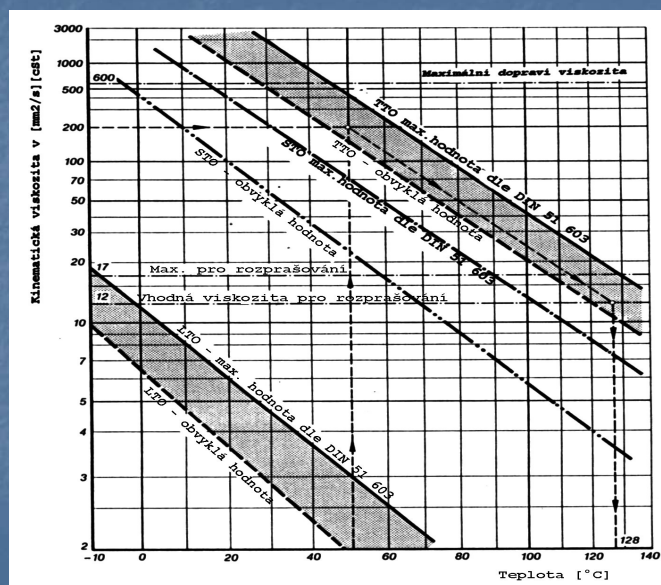
## Vlastnosti topných olejů

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

45

## Závislost viskozity topných olejů na teplotě



46

## Plynná paliva

- mají stále větší význam ve vytápěcí technice
- v oblasti malých a středních výkonů vytěsňují kapalná a tuhá paliva
- výhledově se s plynem počítá i pro velké elektrárenské zdroje – paroplynové elektrárny a teplárny

### Výhody :

- nízká měrná emise znečišťujících látek ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ , TL)
- nejnižší měrná emise [ $\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ] 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

47

## Plynná paliva

### Druhy plynných paliv

- zemní plyn naftový, břidlicový
- procesní plyn z termických procesů
  - zplyňovacích
  - pyrolyzních
- průmyslový odpadní plyn – koksárenský, kychtový, generátorový
- bioplyn
  - z bioplynových stanic
  - z ČOV
- zkapalněné plyny
  - LNG
  - LPG – Liquefied Petroleum Gas = zkapalněný ropný plyn – směs propanu a butanu

48



## 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  $1 \text{ Nm}^3$  paliva

**Nm<sup>3</sup>** = kubík plynu za normálních podmínek, tj.  
pro  $0 \text{ °C}$  a  $101,325 \text{ kPa}$  = **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  $36\,409 \text{ kJ/Nm}^3$

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