

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 spalínových výměníků, skriptá 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
 - geotermální 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 fosilní paliva

Stav přírodního paliva	Přírodní palivo	Umělá paliva
pevné	uhlí, rašelina	koks, brikety, uhlenný 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

Obnovitelná paliva

tuhá

- **biomasa** - veškerá hmota organického původu, tedy těla rostlin, živočichů, mikroorganismů a jejich zbytky, která slouží jako obnovitelný zdroj energie

kapalná

- určená pro dopravu
 - bioetanol
 - bionafta (MEŘO)
 - HVO - hydrogenovaný rostlinný olej vyráběný z odpadních tuků a olejů
- určená pro energetické využití
 - pyrolýzní olej získaný z biomasy či odpadů
 - syntetický olej získaný Fischer-Tropschovou syntézou syngasu

plynná

- bioplyn z ČOV a bioplynových stanic – vzniká anaerobní fermentací
- syntézní plyn (syngas) ze splňování biomasy a odpadů
- zelený vodík
- zelený metan – vyráběný z bioplynu či syntézou zeleného vodíku a CO_2

6

BIOMASA



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



Alternativní paliva

- odpady – SKO, průmyslové
- TAP – tuhé alternativní palivo
 - energeticky využitelný materiál vyráběný úpravou (drcením, separací) nerecyklovatelných komunálních či průmyslových odpadů,
 - musí splňovat normu ČSN EN ISO 21640
 - slouží jako ekologická a ekonomická náhrada fosilních paliv (uhlí) v cementárnách, teplárnách a spalovnách
 - obsahuje zejména plasty, papír, textil a dřevo v různém poměru
 - obvykle je rozměrově homogenizováno
 - alternativní označení
 - RDF (Refuse Derived Fuel)
 - SRF (Solid Recovered Fuel)



10

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)

11

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 , $2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),
 - 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.

12

Jednotkové množství paliv

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

1 kg pro pevná a kapalná paliva

1 Nm³ pro plynná paliva = **normální metr krychlový**
platí pro 0 °C a 101,325 kPa

Nm³ je základní objemovou jednotkou též pro určování objemů spalin a vzduchu – viz dále

13

Vlastnosti tuhých paliv

Složení – uvádí se hmotnostním podílem základních složek

■ hořlaviny h^r

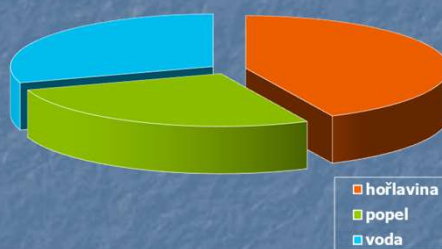
■ popela A^r

■ vody W^r

platí

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

Složení paliva se určuje **hrubým rozbořem** analytického vzorku



14

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

15

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

16

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

17

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)

18

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.

19

Poměrný obsah popela A

Popel je zbytek po žíhání vzorku paliva.

- laboratorně se poměrné množství popela v palivu zjistí z úbytku hmotnosti analytického vzorku oxidací při teplotě $815 \pm 25^\circ\text{C}$
- 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 CO_2 ,
 - při pražení pyritů se odštěpuje 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 $1,10$.

20

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

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

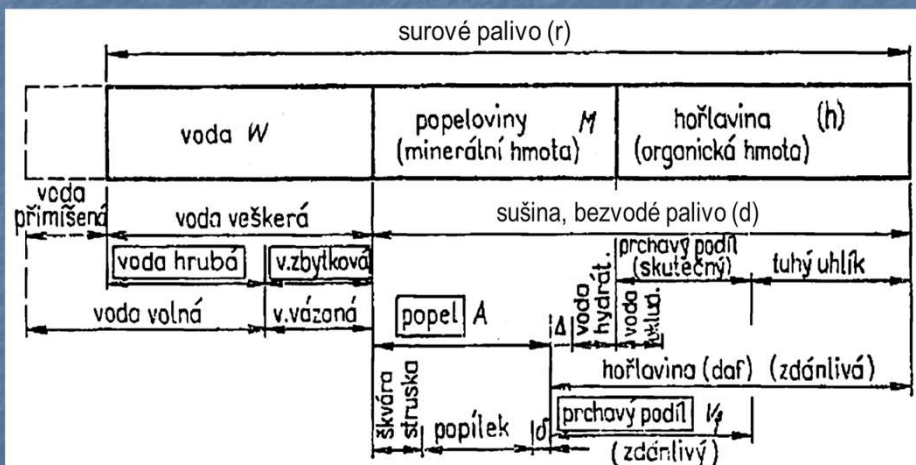
21

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 žíhání 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 vzněcování a vyhořívání).

22

Schéma hrubého rozboru



23

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

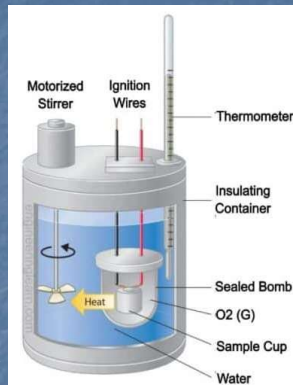
H je obsah vodíku v palivu [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$]

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

24

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



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

25

Výhřevnost a spalné teplo plyných paliv

- dá se určit dle ČSN EN ISO 6976 Zemní plyn - Výpočet spalného tepla, výhřevnosti, hustoty, relativní hustoty a Wobbeho čísla ze složení
- složení a spalné teplo zemního plynu lze najít na webu distribučních společností (Gasnet, Pražská plynárenská)
 - spalné teplo zemního plynu je zde uvedeno v kWh/m³ a vztaženo k teplotám $t_1/t_2 = 15/15$ °C a tlaku 101,325 kPa
 - t_1 odpovídá teplotě ochlazení spalin
 - t_2 je teplota plynu
 - pro aplikaci v energetických výpočtech je třeba spalné teplo plynu přepočítat na $t_1/t_2 = 20/0$ °C
 - pro přepočet spalného tepla plynu na výhřevnost Gasnet uvádí konstantu 0,9

26

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

27

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

28

Přepočty výhřevnosti tuhých a kapalných paliv

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

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

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

29

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**

30

Vlastnosti hořlaviny tuhých paliv

PALIVO		Složení hořlaviny				Spalné teplo	Typ plamene
Druh	Popis	V ^{dal} [%]	C ^{dal} [%]	H ^{dal} [%]	O ^{dal} [%]	Q _s ^{dal} [kJ.kg ⁻¹]	
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

31

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 SO₂ 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),

32

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 sirníků (sulfidů) S_s
 - ve formě pyritů S_p
 - ve formě síranů (sulfátů) S_{SO_4} nespalitelná
- 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

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

33

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, ...)

34

Fyzikální a chemické vlastnosti TP

Hustota ρ (kg/m³) nebo (t/m³) – závisí jednak na poměrném obsahu vody, popelovin a organické hmoty, jednak na chemickém složení hořlaviny (prouhelnění).

Sypná hmotnost ρ_{syp} (t/m³), je hmotnost objemové jednotky volně sypaného paliva; závisí především na hustotě ρ , 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

35

Zrnění tříděného uhlí a koksu

UHLÍ			KOKS		
Zn.	Třída	Rozměr [mm]	Zn.	Třída	Rozměr [mm]
	Hnědé uhlí				
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
	Černé uhlí			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) nevytříděná štěpka lepší kvality
- 2) rozhraní mezi lepší a méně štěpkou
- 3) podrcené nevytříděné surové smrkové větve

37

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

38

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.

39

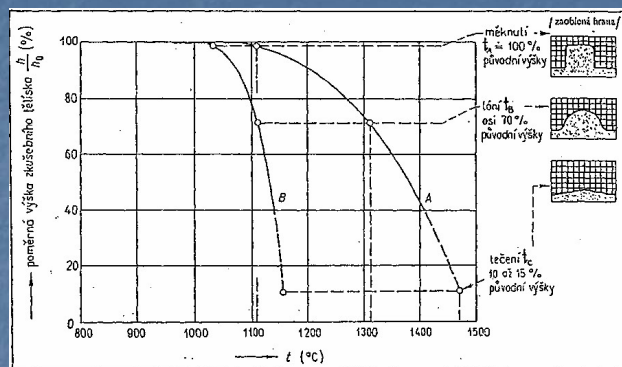
Fyzikální a chemické vlastnosti popelovin

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 $t - h/h_o$ a třemi body proložit křivku tavení popela, která dává představu o chování popela v ohništi

40

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.

41

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

42

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

43

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

44

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

45

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

46

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

47

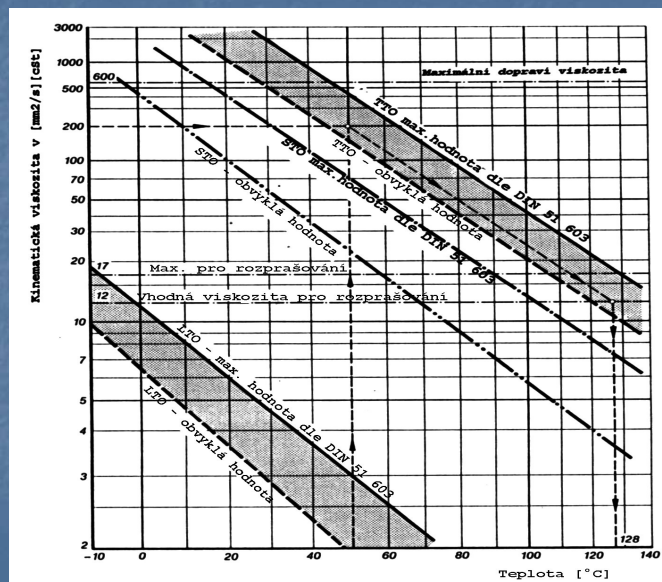
Vlastnosti topných olejů

Vlastnost	Jednotky		TOEL	LTO	TTO
Hustota při 20 °C	kg/m^3	max.	860	920	990
Do 350 °C predestiluje	% obj.	min.	85	20	-
Kinematická viskozita při 20 °C	mm^2/s	max.	6		-
Kinematická viskozita při 40 °C	mm^2/s		-	3,2 až 18	-
Kinematická viskozita při 100 °C	mm^2/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 ^a
Bod tuhnutí	°C	max.	-15	10 ^b	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

^a Bod vzplanutí v otevřeném kelímku ^b Platí pro letní období, v zimě -5 °C

48

Závislost viskozity topných olejů na teplotě



49

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 (NO_x , CO , SO_2 , TL)
- nejnižší měrná emise [$\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$] skleníkového plynu 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

50

Plynná paliva

Druhy plynných paliv

- zemní plyn naftový, břidlicový
- procesní plyn (syngas) 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

51

Složení plynných 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 molárních či objemových podílů plynných složek v 1 Nm^3 paliva

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

52

Složení plynných paliv

Příklad složení zemního plynu

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

Výhřevnost 36 409 kJ/Nm³

53

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 různých druhů plynu
- vyjadřuje podmínku zachování tepelného příkonu spotřebiče při změně spalovacích vlastností zemního plynu
- teplota vznícení plynu
- rychlost hoření plynu $u_{\max}$

54

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

55