

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 nejspíše vznikly v době třetihor z biomasy či organismů a které při slučování s kyslíkem uvolňují tepelnou energii.

Mohou mít skupenství

- tuhé (uhlí),
- kapalné (ropa)
- plynné (zemní plyn)

Fosilní (přírodní) paliva jsou základem pro výrobu paliv **umělých**, tzn. koksu, 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 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 vázány chemicky 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 (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.

9

Jednotkové množství paliv

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

1 kg pro pevná a kapalná paliva

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

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

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

Složení paliva se určuje **hrubým rozbořem** 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 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

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 žihání 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 $1,10$.

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

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

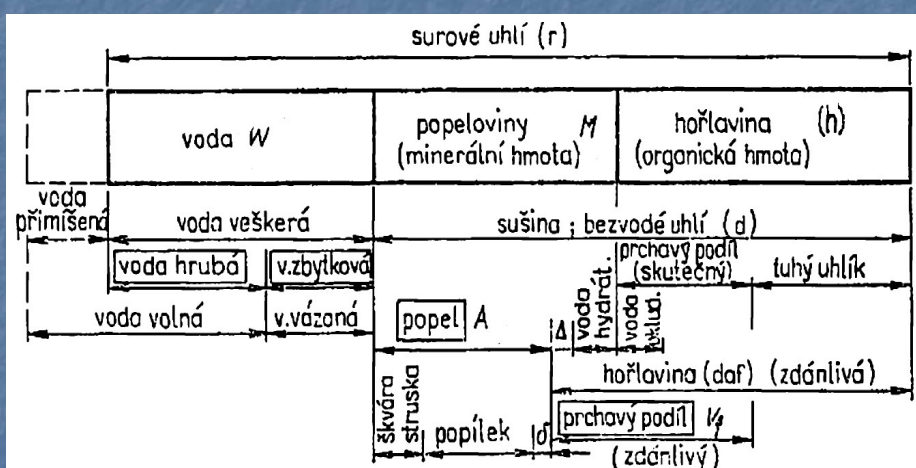
18

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 $850 \pm 15^\circ\text{C}$
- 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 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 rozбором**

26

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

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 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),
 - 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 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

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

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 uhlí

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

Zrnění - uhlí se třídí na zrna určité velikosti (resp. rozmezí velikosti). Třídy zrnění uhlí jsou uvedeny v tabulce.

Melitelnost - 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 Věševazového tepelnětechnického institutu VTI
- metoda podle Hardgrovea
- metoda podle VÚK

31

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			

Fyzikální a chemické vlastnosti uhlí

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

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

Druh paliva	Prchavý podíl V^{daf} (%)	Teplota vznětu (prášek ve vzduchu) (°C)	Teplota výbuchu (prášek na kovové misce zahřáté na teplotu) (°C)	Meze výbušnosti ($g\cdot m^{-3}$)	
				spodní	horní
hnědé uhlí živičné	až 60	208	375 až 400	35 až 80	≥ 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	≥ 1600
žirné	19 až 28	243 až 250	610	240 až 350	< 2000
koksové	14 až 19	260			
antracitové	10 až 14	340	680	asi 400	≤ 1800
antracit	6 až 10	485			
hutní koks	1,6 až 6	600	> 750		

33

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:

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.

34

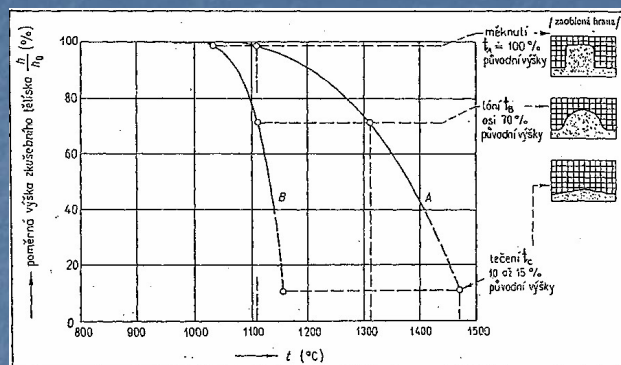
Fyzikální a chemické vlastnosti popelovin

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 tělísko 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

35

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.

36

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

37

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

38

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

39

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

40

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

41

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

42

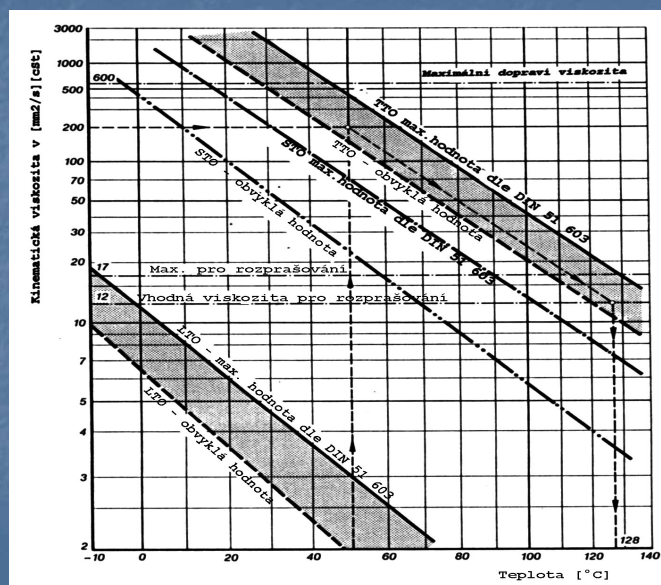
Vlastnosti topných olejů

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

43

Závislost viskozity topných olejů na teplotě



44

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 (NO_x , CO , SO_2 , TL)
- nejnižší měrná emise [g.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

45

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**

46

Složení plynných 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/Nm³

47

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).

48

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 $u_{\max}$

49

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

50