

# Výpočet objemu spalin

Ing. Vladimír Neužil, CSc.

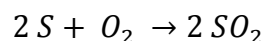
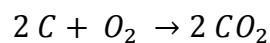
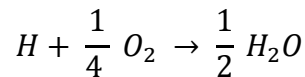
KONEKO marketing, spol. s r. o., Praha 2012

## 1. Teoretické základy výpočtu objemu spalin z jejich složení

Při spalování paliv se mění v palivu obsažená chemicky vázaná energie v energii tepelnou o vysokém teplotním potenciálu. Výsledkem teoretických spalovacích reakcí je odpadní plyn (spaliny), který obsahuje oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ), vodní páru ( $\text{H}_2\text{O}$ ) a směs inertních složek vzduchu, které ve spalinách zůstanou po vyčerpání kyslíku. V praxi jsou uvedené zplodiny spalovacích reakcí doprovázeny řadou dalších produktů oxidačních rovnic, jako je oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ), směs oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), a také složky unášené spalinami z původního paliva nebo produkty nedokonalého spalování (prachový úlet, směs uhlovodíků). Objem těchto příměsí je však relativně malý a pro výpočet objemu spalin pro účely této práce je možno je zanedbat.

Cílem této práce je získat rovnice pro výpočet objemu suchých spalin, neboť emisní limity jsou stanoveny pro suché spaliny.

Základ pro výpočty objemu spalin tvoří 3 stechiometrické spalovací rovnice:



Uvedené spalovací rovnice jsou využity pro stanovení objemu spalin pro tuhá a kapalná paliva.

Měrný objem suchých spalin po dokonalém spálení 1 kg paliva v původním stavu [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] lze vypočítat pomocí rovnice:

$$v_{min}^{SS} = \frac{V_m^{CO_2}}{M^C} \cdot C^r + \frac{V_m^{SO_2}}{M^S} \cdot S^r + \frac{V_m^{N_2}}{M^{N_2}} \cdot N^r + \omega_{max}^{N_2, VS} \cdot v_{min}^{VS}, \text{ kde}$$

$v_{min}^{SS}$  minimální (teoretický) objem suchých spalin [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$C^r$  hmotnostní podíl uhlíku v původním palivu

$S^r$  hmotnostní podíl síry v původním palivu

$N^r$  hmotnostní podíl dusíku v původním palivu

$V_m^{CO_2}$  molární objem oxidu uhličitého (reálný plyn za norm. podmínek - 22,263  $\text{m}^3/\text{kmol}$ )

$M^C$  relativní atomová hmotnost uhlíku (12,011  $\text{kg}/\text{kmol}$ )

$V_m^{SO_2}$  molární objem oxidu siřičitého (reálný plyn za normálních podmínek - 21,89  $\text{m}^3/\text{kmol}$ )

$M^S$  relativní atomová hmotnost síry (32,066  $\text{kg}/\text{kmol}$ )

$V_m^{N_2}$  molární objem dusíku (reálný plyn za normálních podmínek - 22,403  $\text{m}^3/\text{kmol}$ )

$M^{N_2}$  molární hmotnost dusíku (28,013  $\text{kg}/\text{kmol}$ )

$\omega_{max}^{N_2, VS}$  objemový podíl inertních složek (dusíku) v suchém vzduchu (0,7905)

$v_{min}^{VS}$  minimální (teoretický) objem spalovacího vzduchu [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

Minimální (teoretický) objem spalovacího vzduchu se vypočítá podle rovnice:

$$v_{min}^{Vs} = \frac{V_m^{O_2}}{\omega_{max}^{O_2, Vs}} \cdot \left( \frac{C^r}{M^C} + \frac{H^r}{2 \cdot M^{H_2}} + \frac{S^r}{M^S} - \frac{O^r}{M^{O_2}} \right), \text{ kde}$$

$V_m^{O_2}$  molární objem kyslíku (reálný plyn za normálních podmínek - 22,392 m<sup>3</sup>/kmol)

$\omega_{max}^{O_2, Vs}$  objemový podíl kyslíku v suchém vzduchu (0,2095)

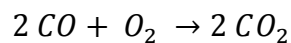
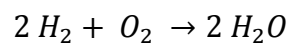
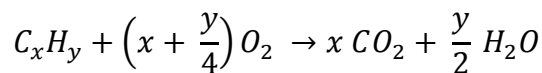
$H^r$  hmotnostní podíl vodíku v původním palivu

$M^{H_2}$  molární hmotnost vodíku (2,016 kg/kmol)

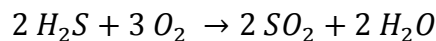
$O^r$  hmotnostní podíl kyslíku v původním palivu

$M^{O_2}$  molární hmotnost kyslíku (31,999 kg/kmol)

Pro plynná paliva se objem spalin počítá dle následujících spalovacích rovnic:



případně



$$v_{min}^{SS} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot V_{C_x H_y} + V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2S} + V_{N_2} + v_{min}^{Vs}, \text{ kde}$$

$v_{min}^{SS}$  minimální (teoretický) objem suchých spalin [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$x_i$  počet atomů uhlíku i-tého plynného uhlovodíku v plynném palivu

$V_{C_x H_y}$  objemový podíl plynného uhlovodíku v palivu

$V_{CO_2}$  objemový podíl oxidu uhličitého v palivu

$V_{CO}$  objemový podíl oxidu uhelnatého v palivu

$V_{H_2S}$  objemový podíl sulfanu v palivu

$V_{N_2}$  objemový podíl dusíku v palivu

$v_{min}^{Vs}$  minimální (teoretický) objem spalovacího vzduchu [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$$v_{min}^{Vs} = \frac{79,05}{20,95} \cdot \left( \left( \sum_{i=1}^n \left( x_i + \frac{y_i}{4} \right) \cdot V_{C_x H_y} + \frac{1}{2} V_{H_2} + V_{CO} + \frac{3}{2} V_{H_2S} - V_{O_2} \right) \right), \text{ kde}$$

$y_i$  počet atomů vodíku i-tého plynného uhlovodíku v plynném palivu

$V_{H_2}$  objemový podíl vodíku v palivu

$V_{O_2}$  objemový podíl kyslíku v palivu

Emisní limity jsou stanoveny pro jednotlivé typy paliv ve vztahu ke spalinám s referenčním obsahem kyslíku, pro tuhá paliva je referenční obsah kyslíku 6 %, pro kapalná a plynná paliva 3 % O<sub>2</sub>, resp. 11 % pro turbíny a spalovací motory.

Přebytek vzduchu při referenčním obsahu kyslíku v suchých spalinách se vypočte podle následujících vzorců:

pro tuhá paliva:

$$v_{ref}^{Ss} = \frac{20,95}{(20,95 - 6)} \cdot v_{min}^{Ss}$$

pro plynná a kapalná paliva:

$$v_{ref}^{Ss} = \frac{20,95}{(20,95 - 3)} \cdot v_{min}^{Ss}$$

pro plynná a kapalná paliva při spalování ve stacionárních spalovacích motorech a turbínách:

$$v_{ref}^{Ss} = \frac{20,95}{(20,95 - 11)} \cdot v_{min}^{Ss}$$

## 2. Aktuální údaje o složení jednotlivých druhů paliv

Přechodný národní plán aplikují provozovatelé stacionárních spalovacích zdrojů s celkovým jmenovitým tepelným příkonem 50 MW a vyšším. Z toho důvodu byly použity údaje o složení těchto paliv, která jsou využívána právě na této skupině zdrojů. Údaje o složení jednotlivých druhů uhlí z různých těžebních lokalit, používané dřevní hmoty a dalších biopaliv, vysokopecního plynu, koksárenského plynu a konvertorového plynu byly získány přímo od provozovatelů jednotlivých spalovacích zařízení, případně od výrobců nebo dodavatelů těchto paliv. Složení kapalných paliv bylo nutno získat literárním průzkumem, neboť jejich spotřebitelé, ani dodavatelé aktuální analýzy těchto paliv nemají k dispozici. Je však třeba konstatovat, že elementární složení kapalných paliv je značně stabilní a že rozmezí jejich výhřevností se nalézá v relativně úzkém pásu. Složení LPG je dáno poměrným zastoupením obou složek v letní a zimní směsi. Pro zemní plyn byly k dispozici analýzy z let 2007 až 2012, které byly provedeny v laboratoři společnosti NET4GAS na předávací stanici Lanžhot. Data o koksárenském, vysokopecním a konvertorovém plynu byly získány přímo od jejich výrobců.

**Tabulka 1** Přehled analýz vzorků uhlí, které pro zpracování výpočtů poskytlo Teplárenské sdružení ČR (říjen – listopad 2012).

doly	uhlí	počet analýz	Qi - min [MJ/kg]	Qi - max [MJ/kg]
OKD - 1. série	ČUPR	14	21,096	25,105
OKD - 2. série	ČUPR	28	22,985	27,783
MUS - 1. série	HUPR	13	10,398	17,617
MUS - 2. série	HUPR	28	13,984	23,395
MUS Vršany - 1. série	HUTR	7	11,326	11,779
MUS Vršany - 2. série	HUTR	13	13,813	15,507
Nástup - 1. série	HUPR	14	9,973	10,630
Nástup - 2. série	HUPR	28	14,363	15,791
Bílina - 1. série	HUPR	20	11,191	19,028
Bílina - 2. série	HUPR	26	14,361	22,851
SU - 1. série	HUPR	14	11,478	12,685

doly	uhlí	počet analýz	Qi - min [MJ/kg]	Qi - max [MJ/kg]
SU - 2. série	HUPR	13	18,245	19,758
směs HU – bez lokalizace	HUPR	56	14,115	24,452
<b>Celkem</b>		<b>274</b>	<b>9,973</b>	<b>27,783</b>

**Tabulka 2** Přehled analýz vzorků dřevní hmoty a ostatních biopaliv

Zdroj dat	druh biopaliva	počet analýz	Qi - min [MJ/kg]	Qi - max [MJ/kg]
Teplárenské sdružení ČR	biopalivo obecně	21	14,517	17,977
Teplárenské sdružení ČR	štěpka	2	17,657	18,228
Teplárenské sdružení ČR	peletky	3	16,167	17,662
Straka, F.: ÚVP Běchovice [1]	dřevěné pelety a brikety	5	16,840	18,110
Straka, F.: ÚVP Běchovice [1]	dřevní štěpka	5	8,730	18,620
Straka, F.: ÚVP Běchovice [2]	různé druhy	24	16,311	23,383
KRONOSPAN [3]	štěpka z klestu	9	8,869	11,615
KRONOSPAN [3]	homole, kůra, recyklát, shraby	8	8,493	15,259
CEN/TS 14961:2005	různé druhy biohmoty	16	17,052	19,600
<b>Celkem</b>		<b>93</b>	<b>8,493</b>	<b>23,383</b>

**Tabulka 3** Přehled získaných rozborů plyných paliv

Zdroj dat	druh plyného paliva	počet analýz	Qi - min [MJ/m <sup>3</sup> ]	Qi - max [MJ/m <sup>3</sup> ]
NET4GAS [4]	zemní plyn	58	34,099	34,608
Třinecké železářny [5]	vysokopecní plyn	12	2,910	3,250
ArcelorMittal [6]	vysokopecní plyn	12	3,034	3,477
Třinecké železářny [5]	koksárenský plyn	12	16,040	17,312
ArcelorMittal [6]	koksárenský plyn	12	16,752	17,850
Třinecké železářny [5]	konvertorový plyn	12	7,407	8,074
Straka, F.: ÚVP Běchovice [2]	bioplyn	4	21,100	25,500

**Tabulka 4** Přehled získaných rozborů kapalných paliv

Zdroj dat	druh plyného paliva	počet analýz	Qi - min [MJ/kg]	Qi - max [MJ/kg]
[7 až 11]	topné oleje	20	37,700	43,540

**Tabulka 5** Přehled získaných rozborů koksu

Zdroj dat	druh plyného paliva	počet analýz	Qi - min [MJ/kg]	Qi - max [MJ/kg]
[8, 11 - 13]	koks	4	27,500	28,500

### 3. Zpracování dat – výpočty objemu spalin a konverzních faktorů

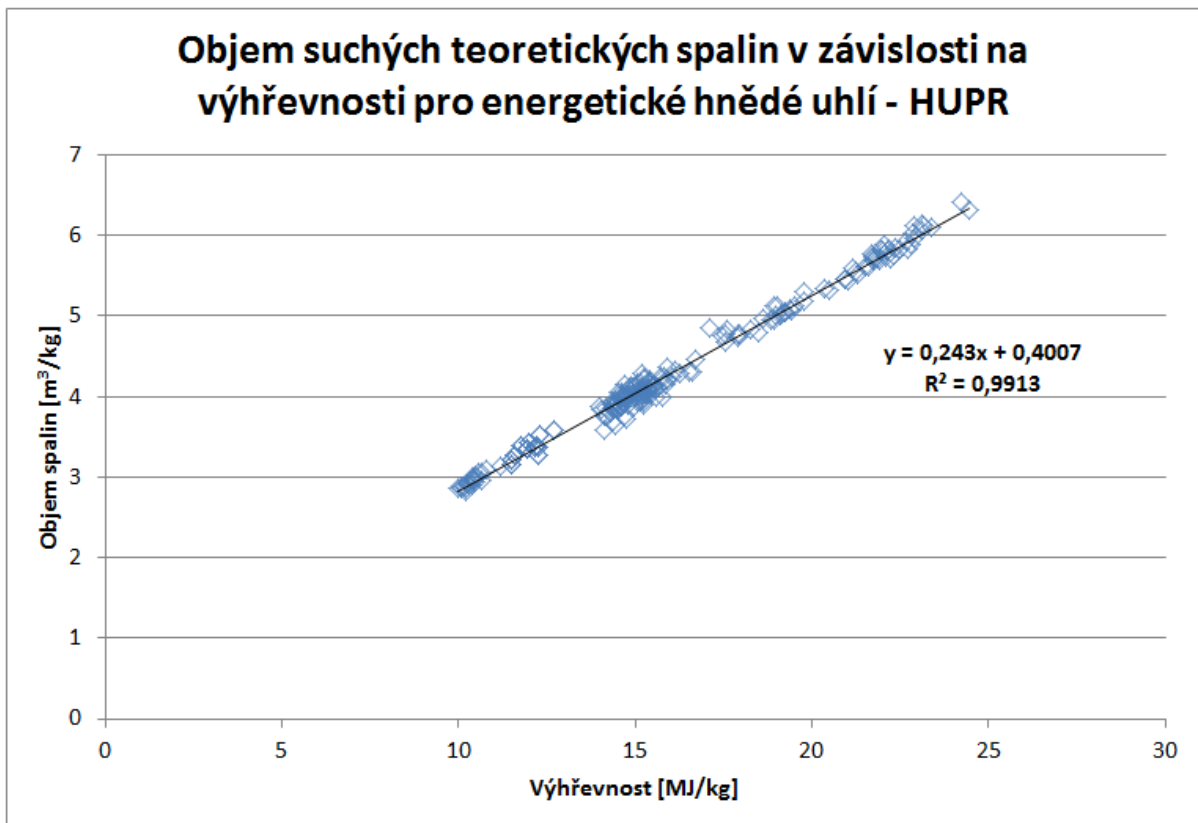
Údaje o složení jednotlivých druhů paliv byly vloženy do příslušných vzorců uvedených v kapitole 2. K výpočtům byl použit tabulkový procesor EXCEL. Výsledky výpočtů objemu spalin byly vyneseny do grafů v závislosti na výhřevnosti paliv a byla hledána optimální aproximace metodou nejmenších čtverců. Porovnáním výsledků různých stupňů polynomicke aproximace bylo zjištěno, že zcela vyhovující je použití polynomu prvního stupně, tedy lineární závislost mezi výhřevností  $Q_i$  a objemem teoretických spalin ve tvaru

$$v_{min}^{Ss} = a \cdot Q_i + b, \text{ kde}$$

$a, b$  konstanty parametrické rovnice

$Q_i$  výhřevnost paliva [MJ/kg] pro tuhá paliva, kapalná paliva a LPG  
výhřevnost paliva [MJ/m<sup>3</sup>] pro plynná paliva

Použití vyšších stupňů polynomu již nevedlo ke zlepšení aproximace, naopak došlo ke zhoršení přesnosti vyjádřené koeficientem spolehlivosti  $R^2$ . Koeficient spolehlivosti  $R^2$ , označovaný též jako koeficient determinace, představuje indikátor v rozsahu 0 až 1, který udává jak přesně odpovídají předpokládané hodnoty aproximace skutečným údajům. Aproximace je nejpřesnější v případě, že se velikost spolehlivosti blíží nebo rovná 1 [14].



**Obrázek 1** Ukázka grafického zpracování a vyhodnocení výpočtu objemu spalin

Pro vlastní zpracování byla data o elementárním složení paliv zařazena do skupin, které odpovídají kategorizaci paliv v národní emisní databázi REZZO. Pro každou skupinu paliv pak byla stanovena regresní závislost objemu spalin na výhřevnosti a stanoven interval výhřevností pro spalovací zdroje znečišťování ovzduší s příkonem kotlů nad 50 MW. Současně byla stanovena průměrná výhřevnost takto seskupených paliv váženým průměrem z vykázaných dat za rok 2010. Tento postup byl použit z toho důvodu, aby konečný výsledek co nejlépe odpovídal skutečnému stavu pro tuto kategorii zdrojů.

Popsaným způsobem byla zpracována veškerá dostupná data o složení jednotlivých druhů paliv a zjištěné koeficienty **a** a **b** pro každé palivo a jeho průměrná výhřevnost byly použity pro výpočet specifického konverzního faktoru pro každý druh paliva:

V prvním kroku byl vypočten specifický objem spalin pro průměrnou výhřevnost každého druhu paliva a pro referenční obsah kyslíku ve spalinách:

$$v_{ref}^{Ss-spec} = (a \cdot Q_i^A + b) \cdot \frac{21}{(21 - o_2^{ref})}, \text{ kde}$$

$v_{ref}^{Ss-spec}$  specifický objem spalin charakteristický pro průměrnou výhřevnost paliva s referenčním obsahem kyslíku

$Q_i^A$  průměrná výhřevnost paliva A zjištěná váženým průměrem ze skutečně vykázaných hodnot spotřeby paliva a jeho výhřevnosti z celé skupiny zdrojů (REZZO 2010)

Výpočet konverzních faktorů pro jednotlivá paliva byl proveden podle rovnice

$$KF = \frac{v_{ref}^{Ss-spec}}{Q_i^A}, \text{ kde}$$

**KF** konverzní faktor [ $\text{m}^3/\text{GJ}$ ]

#### 4. Výsledný návrh parametrů rovnic pro výpočet objemu spalin a konverzních faktorů

Výsledky výpočtů parametrů rovnic pro výpočet objemu spalin a konverzních faktorů jsou přehledně uspořádány do závěrečných tabulek. V tabulkách jsou uvedeny parametry rovnic pro výpočet objemu spalin z výhřevnosti. Dále jsou uvedeny hodnoty specifických spalin pro průměrnou výhřevnost jednotlivých druhů paliv a konečně jsou tabelovány i specifické konverzní faktory pro každý druh paliva a pro jeho průměrnou výhřevnost.

**Tabulka 6** Výsledný návrh rovnic pro výpočet objemu spalin a konverzních faktorů pro tuhá paliva

Tuhá paliva	a	b	R <sup>2</sup>	Q <sub>i</sub> <sup>prům</sup>	v <sub>min</sub> <sup>Ss</sup>	v <sub>ref</sub> <sup>Ss</sup>	KF
název paliva				[MJ/kg]	[m <sup>3</sup> /kg]	[m <sup>3</sup> /kg]	[m <sup>3</sup> /GJ]
hnědé uhlí tříděné	0,2502	0,2589	0,9647	16,500	4,39	6,15	<b>372,60</b>
hnědé uhlí prachové	0,243	0,4007	0,9913	12,117	3,35	4,69	<b>386,87</b>
černé uhlí tříděné	0,2536	0,2395	0,9839	24,660	6,49	9,10	<b>368,99</b>
černé uhlí prachové	0,2536	0,2395	0,9839	22,310	5,90	8,26	<b>370,42</b>
proplástek	0,2536	0,2395	0,9839	19,691	5,23	7,33	<b>372,42</b>
lignit	0,2492	0,3066	0,9949	8,711	2,48	3,47	<b>398,54</b>
koks	0,2374	0,6769	0,2089	27,896	7,30	10,23	<b>366,68</b>
uhelné brikety	0,2492	0,3066	0,9949	21,627	5,70	7,98	<b>369,08</b>
dřevo	0,2189	0,4234	0,9916	10,462	2,71	3,80	<b>363,47</b>
bylinná biomasa (sláma, apod.)	0,2189	0,4234	0,9916	12,990	3,27	4,58	<b>352,43</b>
jiný druh biomasy	0,2189	0,4234	0,9916	12,130	3,08	4,31	<b>355,67</b>
jiné tuhé palivo	0,2492	0,3066	0,9949	17,727	4,72	6,62	<b>373,45</b>

**Tabulka 7 Výsledný návrh rovnic pro výpočet objemu spalin a konverzních faktorů pro kapalná paliva**

Kapalná paliva a LPG paliva	a	b	R <sup>2</sup>	Q <sub>i</sub> <sup>prům</sup>	v <sup>Ss</sup> <sub>min</sub>	v <sup>Ss</sup> <sub>ref</sub>	KF
název paliva				[MJ/kg]	[m <sup>3</sup> /kg]	[m <sup>3</sup> /kg]	[m <sup>3</sup> /GJ]
těžký topný olej (TTO)	0,1864	2,5361	0,7177	39,946	9,98	11,65	<b>291,65</b>
plynový olej (LTO)	0,1864	2,5361	0,7177	42,910	10,53	12,30	<b>286,53</b>
nafta	0,1864	2,5361	0,7177	43,000	10,55	12,31	<b>286,39</b>
propan-butan	0,179	2,8657	1,000	47,000	11,28	13,16	<b>280,08</b>

**Tabulka 8 Výsledný návrh rovnic pro výpočet objemu spalin a konverzních faktorů pro plynná paliva**

Plynná paliva	a	b	R <sup>2</sup>	Q <sub>i</sub> <sup>prům</sup>	v <sup>Ss</sup> <sub>min</sub>	v <sup>Ss</sup> <sub>ref</sub>	KF
název paliva				[MJ/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /GJ]
zemní plyn	0,2589	-0,2352	0,9992	34,050	8,58	10,01	<b>294,11</b>
vysokopecní plyn AM	0,1559	0,9604	0,9827	3,292	1,47	1,72	<b>522,50</b>
vysokopecní plyn TŽ	0,1148	1,0513	0,7177	3,040	1,40	1,63	<b>537,78</b>
vysokopecní plyn obecně	0,2194	0,7426	0,8800	3,166	1,44	1,68	<b>529,86</b>
koksárenský plyn AM	0,1512	1,1954	0,9567	17,220	3,80	4,43	<b>257,49</b>
koksárenský plyn TŽ	0,2318	-0,2237	0,9898	16,946	3,70	4,32	<b>255,13</b>
koksárenský plyn obecně	0,2194	0,0037	0,9077	17,083	3,75	4,38	<b>256,32</b>
konvertorový plyn TŽ	0,1300	1,1159	0,9453	7,840	2,14	2,49	<b>317,86</b>
jiné plynné palivo	0,2092	0,5941	0,9858	25,000	5,82	6,80	<b>271,90</b>

## 5. Použitá literatura a prameny

1. Straka F., Kunčarová M., Lacek P.: Optimalizace vsázek pro bioplynové stanice při použití biomasy, živočišných odpadů nebo dalších možných vedlejších živočišných produktů, technická zpráva zakázky ÚVP č. 781/128/12, Praha září 2007
2. Straka F.: Tabulky s výpočty objemu spalin pro různé druhy paliv. osobní sdělení, Praha říjen 2012
3. Diviš M.: Interní materiál společnosti KRONOSPAN OSB, spol. s r.o., osobní sdělení, září 2012
4. NET4GAS s.r.o., Protokol kvality plynu, KPS Lanžhot, 1. 1. 2007 až 1. 1. 2012
5. Niedoba M.: Interní materiál, ENERGETIKA TŘINEC, a.s., 22. 11. 2012
6. Ostárek T.: Interní materiál, ArcelorMittal Energy Ostrava s.r.o., 14. 11. 2012
7. Benzina, katalog výrobků 1991
8. Landa S., Riedl R.: Tabulky a diagramy z oboru paliv, díl I, SNTL Praha 1956
9. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum: Charakteristiky paliv, presentace přednášky
10. EKOLUBE, s. r. o., <http://www.oleje.cz/clanek/Dalsi-uzitecne-tabulky>

11. Neuzil V.: Znečištění ovzduší, Sdružení KONEKO, VÚSTE APIS, Praha 1991
12. ANTRAK, v.o.s., <http://www.antrak.cz/>
13. Topinfo s.r.o., [www.tzb-info.cz](http://www.tzb-info.cz)
14. Dlouhý T.: Výpočet objemů vzduchu a spalin z výhřevnosti uhlí, ENERGETIKA 10/2000