

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

**Fakulta strojní, Katedra energetiky
a Výzkumné energetické centrum**

Kvalita spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů

Disertační práce

Obor: 16-07/9, Ochrana životního prostředí v průmyslu

Školitel: Prof. Ing. Pavel Noskievič, CSc.

Ostrava, leden 2001

Jiří Horák

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat Hospodinu mému Bohu, své ženě Janě a dvěma svým dcerkám za to, že se mnou prošli nelehké a poměrně dlouhé období, ve kterém se tato práce rodila, a že mne po celou dobu podporovali a nepřestali mne milovat.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří měrou nemalou přispěli svou myšlenkou, připomínkami a zvědavými otázkami k uspořádání a tvorbě této práce.

Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů. Pozornost je zaměřena především na spalování uhlí a hodnocení spalovacího procesu jak z hlediska energetického tak i enviromentálního. V rámci experimentální části práce byly v menším rozsahu také prováděny spalovací zkoušky s různými druhy biomasy.

V první části je popsán postoj legislativy ČR k problematice emisí z malých zdrojů znečištění ovzduší, včetně obecného rozboru problematiky ovzduší a jeho znečišťování. Bilance emisí z malých zdrojů znečištění ovzduší byla provedena na základě analýzy výsledků „Registru emisí a zdrojů znečištění ovzduší“ pro malé zdroje tzv. REZZO3. Zde je podrobně uvedena metodika stanovování, včetně porovnání výsledků bilance s jinými zdroji. Některé znečišťující látky, které produkují malé zdroje znečištění, představují více než poloviční produkci všech stacionárních zdrojů znečištění ovzduší v ČR.

Dále jsou uvedeny základní charakteristiky tuhých fosilních paliv a byl proveden teoretický rozbor spalovacího procesu tuhých paliv v ohništích malých výkonů.

Je zde zpracováno základní rozdělení a popis technologií spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů od nejstarších přes běžně používané až po nejmodernější.

Podstatný díl práce představuje experimentální část. Jsou v ní charakterizovány typy zařízení a paliv, na kterých byly provedeny spalovací zkoušky a popsány sledované parametry včetně metodik jejich stanovení. Získané naměřené a vypočtené hodnoty jsou podrobeny diskusi včetně zobecnění jednotlivých trendů a závislostí. Zejména se jedná o:

- porovnání naměřených a předepsaných emisních faktorů,
- hodnocení tvorby škodlivin na změně výkonu kotle, teploty v ohništi, měrném tepelném zatížení ohniště, součiniteli přebytku spalovacího vzduchu,
- posouzení vlivu typu spalovacího zařízení na tvorbu škodlivin,
- hodnocení a analýza aditivního odsíření spalin v kotlích malých výkonů,
- posouzení opakovatelnosti spalovacích zkoušek,
- stanovení účinnosti kotle,
- hodnocení palivových nákladů na produkci tepla.

Uskutečněné teoretické rozborů a výsledky provedených experimentů byly součástí řešení grantů: „Kvalita spalovacího procesu v kotlech malých výkonů“ (GAČR 101/98/0820) a „Výzkumně-průmyslové centrum pro vývoj zařízení určeného k ekologickému spalování tuhých paliv, zejména biomasy“ (MPO ČR, FB-C2/15) v rámci kterých byl vyvíjen nový typ

ohniště se spodním kontinuálním přikládáním paliva. Výsledkem tohoto projektu byl vznik moderního kotle na tuhá paliva, který úspěšně prošel certifikací ve státní zkušebně a našel uplatnění na domácím trhu.

Abstract

This dissertation essay takes into account combustion of solid fuels in minor output combustors. An attention is focused on the coal combustion and assessment of the combustion process both from the point of view of energy and environment. In the framework of the experimental part of the enquiry, also a limited range of combustion experiments, as regards various biomass, has been carried out.

In the opening chapter, the CZ legislature attitudes are described, regarding the air pollution by minor combustors, inclusive the general analysis of atmosphere and its pollution. The emission balance for minor combustors has been based on the analysis of Air Pollution Register („Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší“) for minor combustors, the so called REZZO3. The assessment method is detailed here, including the reference comparison. Some polluting substances produced by minor combustors represent more than half of all those generated by stationary polluters in the Czech Republic.

Further chapters provide basic characteristics for solid fossil fuels, as well as theoretically analyse the combustion process of solid fuels in minor combustors.

In the range from the classical to state-of-the-art, the essay provides for basic classification and technology report concerning the combustion of solid fuels in minor combustors

Experiments represent an essential part of the essay. Types of experimental equipment and fuels are characterised, which were employed for tests, as well as the explored parameters described, inclusive methods for their analysis. The results of measurements and calculations are subject of discussion, including the assessment of individual trends and dependences. In particular:

- Comparison of the emission factors measured and decreed,
- assessment of pollutants generation, as regards the combustor output change, thermal load coefficient, combustion surfeit air coefficients,
- assessment of the effect of the combustor type on pollutant formation,
- assessment and analysis of flue gas additive desulphurisation for minor combustors,

- assessment for combustion test replication,
- establishment of combustor efficiency,
- assessment of fuel costs, as regards heat generation.

The theoretical analyses and experimental results have been part of investigation made within the following grants: „Kvalita spalovacího procesu v kotlech malých výkonů (Combustion Process Quality for low output boilers)“ (GAČR 101/98/0820) a „Výzkumně-průmyslové centrum pro vývoj zařízení určeného k ekologickému spalování tuhých paliv, zejména biomasy (Industry/Research Centre for Solid Fuel Ecological Combustion, Biomass in Particular)“ (MPO ČR, FB-C2/15), which were dedicated to a development of an innovative combustor technology with a continual bottom supply of fuel. A modern solid fuel combustor technology has been the outcome of the project. The technology has been certified by a State Testing Facility and could find its success on the domestic market.

Obsah:

PODĚKOVÁNÍ	2
ABSTRAKT	3
OBSAH:	6
SEZNAM OBRÁZKŮ:	9
SEZNAM TABULEK:	10
SEZNAM GRAFŮ:	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:	13
SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH VELIČIN:	14
1. ÚVOD	16
2. CÍLE PRÁCE	19
3. POSTOJ LEGISLATIVY ČR K PROBLEMATICE EMISÍ Z MALÝCH ZDROJŮ	20
4. OVZDUŠÍ A JEHO ZNEČIŠŤOVÁNÍ PŘI SPALOVÁNÍ PALIV	24
4.1. Ovzduší	24
4.2. Znečišťování a znečištění ovzduší	25
4.3. Látky znečišťující ovzduší	27
4.3.1. Tuhé znečišťující látky	28
4.3.2. Oxidy síry	29
4.3.3. Oxidy dusíku	30
4.3.4. Oxid uhelnatý	30
4.3.5. Organické polutanty	30
5. REGISTR EMISÍ A ZDROJŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ OVZDUŠÍ	32
5.1. Metodika stanovování emisí z malých zdrojů znečišťování (REZZO3)	33
5.1.1. Vstupní údaje pro výpočet emisí	34
5.1.2. Postup výpočtu	36
5.2. Výsledky emisní bilance malých zdrojů znečišťování	38
5.2.1. Spotřeba paliv pro REZZO3	38
5.2.2. Množství produkovaného tepla	39
5.2.3. Množství emisí	39
5.3. Srovnání emisí všech kategorií REZZO	40
5.4. Skladba vytápění bytů v ČR	44
5.5. Statistiky mimo REZZO3	44

5.6.	Shrnutí bilance emisí z malých zdrojů znečištění.....	46
6.	PALIVO	48
7.	SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV	52
7.1.	Statika spalování.....	53
7.2.	Kinetika spalování	54
7.2.1.	Kinetika spalovacích reakcí.....	54
7.2.2.	Vliv teploty na rychlost kinetického spalování	55
7.2.3.	Řetězový mechanismus reakcí při spalování.....	56
7.2.4.	Heterogenní spalování uhlovodíků spojené s tvorbou sazí	57
7.2.5.	Heterogenní spalování fosilních tuhých paliv	57
7.2.6.	Analýza spalovacího procesu v ohništi s jednorázovým příkládáním.....	58
8.	TECHNOLOGIE PRO SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV VE ZDROJÍCH O MALÉM VÝKONU.....	61
8.1.	Historický vývoj technologií pro spalování tuhých paliv	61
8.2.	Roštové kotle	62
8.2.1.	Kotle s horním odhoříváním paliva	62
8.2.2.	Kotle se spodním odhoříváním paliva	63
8.3.	Lokální vytápění	63
8.3.1.	Obyčejná ohniště lokálních topidel (sporáky).....	64
8.3.2.	Šachtová ohniště lokálních topidel.....	64
8.4.	Kotle pro ústřední vytápění	66
8.5.	Doprava paliva do ohniště	67
9.	SPALOVACÍ ZKOUŠKY (EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST)	68
9.1.	Sledované parametry	68
9.2.	Metodiky stanovení sledovaných parametrů	69
9.2.1.	Stanovení výkonu kotle	69
9.2.2.	Stanovení hmotnostního toku paliva	71
9.2.3.	Stanovení parametrů paliva	72
9.2.4.	Součinitel přebytku vzduchu	73
9.2.5.	Stanovení teploty spalin v ohništi a za kotlem	73
9.2.6.	Stanovení účinnosti spalovacího zařízení.....	74
9.2.7.	Stanovení palivových nákladů na vyrobené teplo	74
9.2.8.	Stanovení koncentrace CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x ve spalinách	74
9.2.9.	Stanovení koncentrace O ₂ ve spalinách.....	75
9.2.10.	Stanovení koncentrací uhlovodíků C _x H _y	76
9.2.11.	Stanovení koncentrace TZL	76
9.2.12.	Způsob vyjadřování a přepočtu emisí.....	77

9.3. Testovaná spalovací zařízení	78
9.3.1. Kotel U22	78
9.3.2. Kotel Varimatik 25	80
9.3.3. Kotel Varimatik 40	81
9.3.4. Kotel Ling 25	81
9.3.5. Kotel Ling 50	81
10. VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ A JEJICH DISKUSE	83
10.1. Rozsah experimentů a použitá paliva	83
10.2. Předepsané a skutečné emisní faktory	85
10.2.1. Emisní faktory CO	87
10.2.2. Emisní faktory NO _x	89
10.2.3. Emisní faktory CO ₂	91
10.3. Závislost tvorby emisí na změně výkonu kotle	92
10.4. Závislost tvorby emisí na typu spalovacího zařízení	97
10.5. Teplota v ohništi a tvorba emisí	98
10.6. Odsiřování v roštových kotlích malých výkonů	99
10.6.1. Mechanismus odsíření a specifika roštových kotlů	100
10.6.2. Termodynamický rozbor možných reakcí	101
10.6.3. Experimentální výsledky odsíření v kotlích malých výkonů	105
10.7. Střední měrné tepelné zatížení ohniště a vznik CO	108
10.8. Součinitel přebytku spalovacího vzduchu	111
10.9. Opakovatelnost spalovacích zkoušek	113
10.10. Spalování biomasy a tvorba znečišťujících látek	114
10.11. Závislost účinnosti kotle na změně výkonu kotle	115
10.12. Palivové náklady na produkci tepla	117
11. ZÁVĚR	121
11.1. Cíl práce a jeho zplnění	121
11.2. Teoretická část	121
11.3. Experimentální část	122
POUŽITÁ LITERATURA:	129
PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K PROBLEMATICE DISERTACE:	131

Seznam obrázků:

obr. č. 1	Závislost teploty a tlaku ovzduší na vzdálenosti od zemského povrchu [33]	24
obr. č. 2	Schéma vazeb ISKO na zdroje dat a kooperující systémy [4].....	33
obr. č. 3	Schéma složení uhlí	48
obr. č. 4	Řetězová reakce při spalování vodíku	56
obr. č. 5	Model spalování uhlíku	57
obr. č. 6	Schéma kotle s horním odhoříváním paliva	63
obr. č. 7	Schéma kotle se spodním odhoříváním paliva	63
obr. č. 8	Schéma kamen Petr 8	65
obr. č. 9	Schéma kamen Thermo 420	66
obr. č. 10	Umístění teplotního čidla pro měření teploty kotlové vody	70
obr. č. 11	Schéma zapojení kotle na měřící smyčku.....	70
obr. č. 12	Vážící most během kalibrace.....	71
obr. č. 13	Vodní uzávěr kouřovodu	72
obr. č. 14	Schéma aparatury pro kontinuální analýzu CO, SO ₂ , NO _x , CO ₂ , O ₂	75
obr. č. 15	Schéma aparatury pro kontinuální analýzu C _x H _y	76
obr. č. 16	Schéma aparatury pro jednorázový izokinetický odběr TZL z proudící tekutiny	77
obr. č. 17	Schéma kotle U22.....	79
obr. č. 18	Kotel U22 po spalovací zkoušce	79
obr. č. 19	Schéma kotle VARIMATIK 25.....	80
obr. č. 20	Kotel Varimatik 25 při spalovací zkoušce.....	80
obr. č. 21	Schéma kotle LING 25	82
obr. č. 22	Kotel LING 25 při spalovací zkoušce	82
obr. č. 23	Příklad zapojení akumulární nádoby do systému.....	96

Seznam tabulek:

tab. č. 1	Životnost průmyslových zásob uhlí v ČR [17]	18
tab. č. 2	Sazba poplatků za malé zdroje znečišťování [42].....	21
tab. č. 3	Požadavky na jakost paliva dodávaného pro spalování v malých zdrojích znečišťování a obyvatelstvu [27]	22
tab. č. 4	Hlavní plynné složky přirozené atmosféry [1].....	25
tab. č. 5	Vedlejší plynné složky přirozené atmosféry [1]	25
tab. č. 6	Kategorie problémů znečišťování ovzduší.....	26
tab. č. 7	Seznam základních znečišťujících látek (0. skupina) [27].....	27
tab. č. 8	Plynné a kapalně znečišťující látky podle chemického složení [1]	28
tab. č. 9	Rozdělení stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší v registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší	32
tab. č. 10	Parametry regresní přímky závislosti průměrné teploty topné sezóny na nadmořské výšce pro TS 1997/98.....	34
tab. č. 11	Průměrné jakostní parametry pevných paliv pro jednotlivé kraje v roce 1998 [34].....	37
tab. č. 12	Průměrné účinnosti kotlů dle spalovaných paliv	37
tab. č. 13	Podíl jednotlivých druhů pevných paliv v jednotlivých krajích za topnou sezónu 97/98	37
tab. č. 14	Emisní faktory pro malé zdroje znečištění.....	38
tab. č. 15	Podíl emisí z malých zdrojů znečišťování na celkových emisích REZZO a na emisích ze stacionárních zdrojů znečišťování	43
tab. č. 16	Základní rozdělení paliv.....	48
tab. č. 17	Znaky jakosti tuhých paliv	50
tab. č. 18	Seznam paliv, která byla použita při spalovacích zkouškách	83
tab. č. 19	Hrubý rozbor paliv použitých při spalovacích zkouškách	84
tab. č. 20	Seznam provedených spalovacích zkoušek a počet vyhodnocených režimů kotlů	84

tab. č. 21	Příklad kompletního vyhodnocení jednoho režimu na kotli Ling 50.....	86
tab. č. 22	Průměrné emisní faktory pro jednotlivé kotle ze všech zkoušek pro spalování hnědého uhlí.....	89
tab. č. 23	Naměřené hodnoty H ₂ S v průběhu spalovací zkoušky na kotli U22, černé uhlí	106
tab. č. 24	Výsledky účinnosti odsíření spalin pomocí aditivace hnědého uhlí při spalování na kotli Ling 25 a Varimatik 25	107
tab. č. 25	Měrné tepelné zatížení ohniště kotle Ling 25 a Ling 50.....	109
tab. č. 26	Výpočet doby setrvání plynné hořlaviny v oblasti ohniště kotle Ling 25	111
tab. č. 27	Optimální hodnoty součinitelů přebytků spalovacího vzduchu pro základní typy ohnišť kotlů vyšších výkonů.....	111
tab. č. 28	Opakovatelnost spalovacích zkoušek na kotli Ling 25	114
tab. č. 29	Kritéria pro analýzu při výběru typu topení.....	119

Seznam grafů:

graf č. 1	Předpoklad vývoje světových cen pro fosilní paliva [24]	17
graf č. 2	Průměrná velikost nových zdrojů instalovaných v USA [44]	17
graf č. 3	Spotřeba jednotlivých paliv zdrojů REZZO3 (1992÷1999).....	39
graf č. 4	Množství produkovaného tepla REZZO3 (1992÷1998).....	39
graf č. 5	Množství produkovaných emisí REZZO3 (1990÷1999).....	40
graf č. 6	Podíl jednotlivých kategorií REZZO na celkových emisích TZL v ČR a vývoj emisí v letech 1990÷1999 v % roku 1990	40
graf č. 7	Podíl jednotlivých kategorií REZZO na celkových emisích SO ₂ v ČR a vývoj emisí v letech 1990÷1999 v % roku 1990	41
graf č. 8	Podíl jednotlivých kategorií REZZO na celkových emisích NO _x v ČR a vývoj emisí v letech 1990÷1999 v % roku 1990	41
graf č. 9	Podíl jednotlivých kategorií REZZO na celkových emisích CO v ČR a vývoj emisí v letech 1990÷1999 v % roku 1990	42

graf č. 10	Podíl jednotlivých kategorií REZZO na celkových emisích C _x H _y V ČR a vývoj emisí v letech 1990÷1998 v % roku 1990	42
graf č. 11	Změna skladby vytápění bytů v roce 1999 ve srovnání s rokem 1991.....	44
graf č. 12	Průběh konečné spotřeby paliv a energie podle odvětví národního hospodářství (1990÷1999)	45
graf č. 13	Srovnání měrné spotřeby energie a nákladů obyvatelstva na energii v zemích bývalého východního bloku [9]	46
graf č. 14	Hrubý rozbor černých a hnědých uhlí v ČR dle pánví [23].....	49
graf č. 15	Závislost spalného tepla hořlaviny na obsahu prchavé hořlaviny [35]	51
graf č. 16	Energetický potenciál při reakcích vodík/kyslík	54
graf č. 17	Časový průběh spalování přiložené dávky uhlí	59
graf č. 18	Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů CO pro spalování hnědého uhlí	87
graf č. 19	Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů CO pro spalování černého uhlí	88
graf č. 20	Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů CO pro spalování biomasy.....	88
graf č. 21	Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů NO _x pro spalování hnědého uhlí	90
graf č. 22	Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů NO _x pro spalování černého uhlí	90
graf č. 23	Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů NO _x pro spalování biomasy.....	91
graf č. 24	Porovnání skutečných a doporučených hodnot emisních faktorů CO ₂ pro spalování hnědého uhlí	92
graf č. 25	Porovnání skutečných a doporučených hodnot emisních faktorů CO ₂ pro spalování černého uhlí	92
graf č. 26	Závislost měrných emisí na výkonu kotle Ling 25 při spalování dvou druhů černého uhlí.....	93

graf č. 27	Závislost měrných emisí na výkonu kotle Ling 25, Ling 50, Varimatik 25 a Varimatik 40 při spalování hnědého uhlí.....	94
graf č. 28	Měrné emise při spalování hnědého uhlí v kotlích U22, Varimatik 25, Varimatik 40, Ling 25 a Ling 50	98
graf č. 29	Závislost měrných emisí CO a NO _x na teplotě ve spalovací komoře kotlů Ling 25 a Ling 50.....	99
graf č. 30	Změna Gibbsovy energie reakcí (25) až (36)	104
graf č. 31	Typický průběh koncentrací plyných emisí pro roštový kotel s nepohyblivým roštem (kotel U22, černé uhlí)	106
graf č. 32	Střední měrná tepelná zatížení ohnišť a tepelných motorů	110
graf č. 33	Závislost měrných emisí CO na přebytku vzduchu při spalování různých druhů paliv v různých kotlích při jmenovitého výkonu.....	112
graf č. 34	Závislost měrných emisí CO, NO _x a teploty spalin na součiniteli přebytku spalovacího vzduchu při spalování černého uhlí I.....	113
graf č. 35	Měrné emise ze spalování pelet I až IV v závislosti na výkonu kotle Ling 25 a Ling 50	115
graf č. 36	Měrné emise ze spalování pelet v závislosti na průměru pelet	115
graf č. 37	Závislost účinnosti kotle Ling 25 na výkonu při spalování černého uhlí.....	116
graf č. 38	Závislost účinnosti kotle Ling 25 na výkonu při spalování hnědého uhlí.....	117
graf č. 39	Závislost účinnosti kotle Ling 25 na výkonu při spalování dřevěných pelet	117
graf č. 40	Palivové a celkové náklady na výrobu tepla pro různé druhy vytápění	120

Seznam použitých zkratk:

A _p	afinita chemické reakce
B_MDK	počet bytů vytápěných malými domovními kotelny
C	uhlík
Cl ⁻	iont chlóru
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
C _{paliva}	cena paliva v Kč/t
C _x H _y	uhlovodík jako směs uhlíku a vodíku
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČOV	čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika

E_a	aktivační energie v J/mol
EŠV	Ekologicky šetrný výrobek
F^-	iont flóru
H	vodík
H_2O	voda
H_2S	sirovodík
ISKO	Informačního systému kvality ovzduší
M_{pv}	množstvím spotřebovaného paliva v kg/s
n	součinitel přebytku vzduchu
N_2O	oxid dusný (rajský plyn)
NO	oxid dusnatý
NO_2	oxid dusičitý
NO_x	oxidy dusíku
N_{pal}	palivové náklady v Kč/GJ
NV	nadmořská výška v m
PAU	polyaromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované bifenyly
PCDD/F	polychlorované dibenzo dioxiny, dibenzo furany
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší
S	síra
SLDB	Sčítání lidu, domů a bytů
SO_2	oxid siřičitý
SO_3	oxid sírový
SVOC	polotěkavé organické látky (Semivolatile organic compounds)
TS	topná sezóna
\bar{t}_{vzd}^{TS}	průměrná teplota venkovního vzduchu topné sezóny ve °C
TZL	tuhé znečišťující látky
USA	Spojené státy americké
VEC	Výzkumné energetické centrum
VOC	těkavé organické látky (Volatile organic compounds)

Seznam použitých fyzikálních veličin:

A^r	obsah popele v palivu v % _{hm}
C_{O_2}	naměřený obsah kyslíku ve spalínách v % _{obj}
\bar{q}_r	měrný tepelný výkon roštu v kW/m ²
\bar{q}_v	střední měrné tepelné zatížení ohniště v kW/m ³
Q_{rok}	roční potřeby tepla na byt v GJ/r
Q_i^r	výhřevnost paliva v MJ/kg nebo v MJ/m ³ _N
S_{plyn}	obsah síry v původním vzorku plynných paliv v mg/m ³ _N
S^r	obsah spalitelné síry v palivu v % _{hm}
S_r	plocha roštu v m ²
t_c	celková doba hoření v s
t_f	doba potřebná k proběhnutí dějů fyzikálního charakteru v s
t_{ch}	doba potřebná k proběhnutí chemických reakcí v s
\bar{t}_{vzd}^{TS}	průměrná teplota venkovního vzduchu topné sezóny ve °C
\bar{V}_{pal}^{byt}	průměrná roční spotřeba paliva na bytovou jednotku v t/r nebo v tis. m ³ _{N/r}
V^{daf}	obsah prchavé hořlaviny v % _{hm}
V_o	objem ohniště v m ³

$V_{sp,t}^s$	teoretické množství suchých spalin v m^3_N/kg
$V_{vz,t}^s$	teoretická spotřeba suchého vzduchu v m^3_N/kg
w_t^r	obsah vody v palivu v $\%_{hm}$
Δh	úbytek paliva v kg
η_k	účinnost kotle v $\%$

1. Úvod

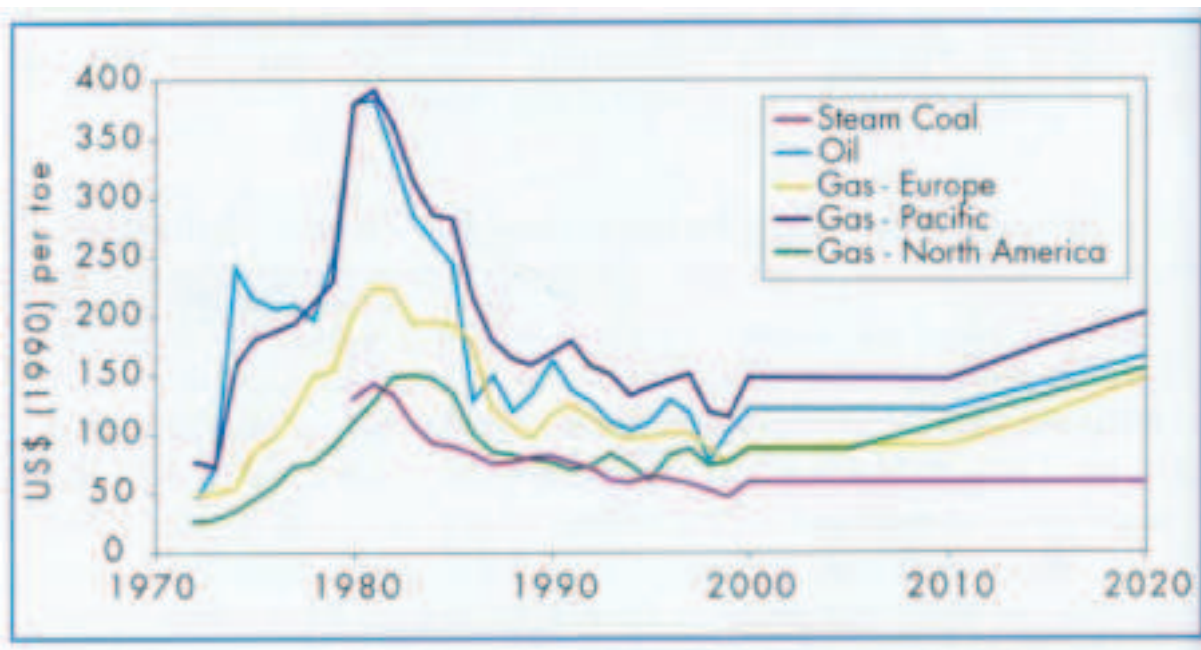
Je vůbec možné a vhodné s ohledem na ekologicko-ekonomické požadavky spalovat uhlí v ohništi malého výkonu? Patří uhlí do kotlů o malém výkonu?

Rostoucí světová spotřeba primárních zdrojů energie přináší zvyšující se tlak na efektivnější využití těchto zdrojů. S ohledem na strukturu světových zásob energie je možné očekávat zvyšující se podíl využití tuhých paliv (uhlí) nejen u velkých zdrojů (nad 5 MW), ale také u malých a středních zdrojů (do 200 kW a do 5 MW). Problematika spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů je oblast, kterou se tato práce zabývá.

Řízení kvality spalování uhlí v ohništích velkých zdrojů představuje v současné době běžně používanou oblast, která je v pokročilém stádiu řešení a užívání, což však není možno říci o zdrojích malých výkonů. Malý objem ohniště (krátký čas setrvání v oblasti vysokých teplot a velká citlivost na dynamiku vlastního spalovacího procesu) u malých zdrojů představuje horší podmínky pro řízení kvality spalování. Značný rozdíl poměrů investic do řízení kvality spalování ku instalovanému výkonu představuje další nevýhodu malých zdrojů. Investicí do zkvalitnění spalování uhlí ve zdrojích malých výkonů se zásadně (několikanásobně) zvýší cena zařízení a tím se zařízení stává prakticky neprodejným.

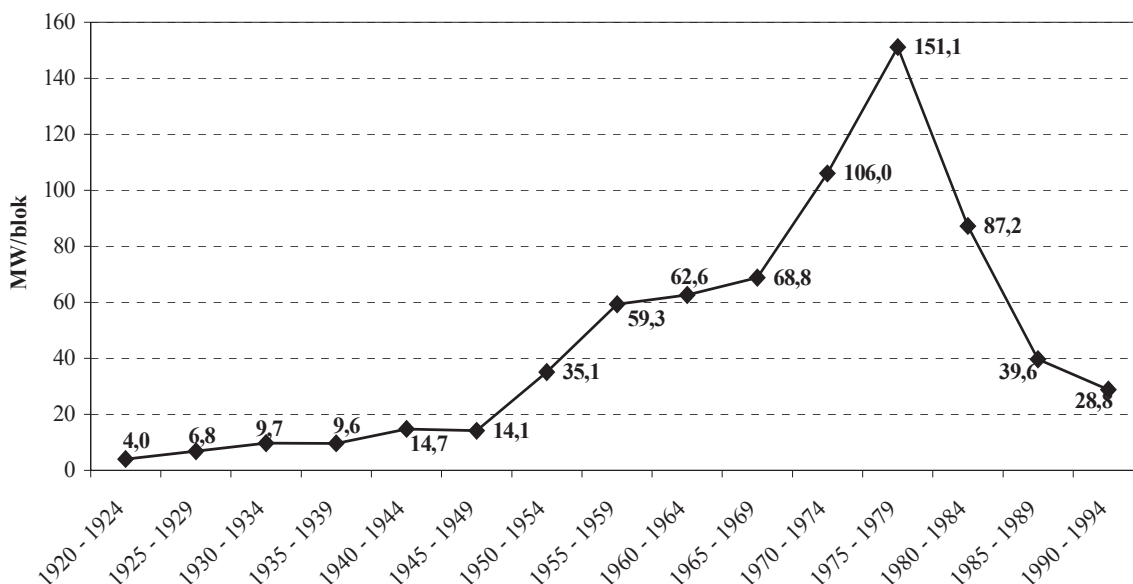
Mezinárodní energetická agentura (Energy Agency) publikovala předpoklad vývoje světových cen pro fosilní paliva (viz graf č. 1). Jak je z grafu zřejmé, přibližně do roku 2010 prognóza očekává růst ceny pouze u plynu ze Severní Ameriky. V roce 2010 je předpokládán všeobecný růst ceny ropy a plynu. U uhlí je uváděna přibližně konstantní cena až do konce prognózy, což je rok 2020.

Zatímco cena uhlí je jen minimálně ovlivněna cenou ropy, cena zemního plynu vždy kopíruje cenu ropy. Současný vývoj cen ropy na světových trzích včetně vývoje ceny amerického dolaru (světový obchod s ropou je uskutečňován pouze v amerických dolarech), souběžně s liberalizací cen paliv a energií, značně zvyšují cenu ušlechtilých paliv, což logicky způsobuje snižující se zájem o tato paliva také u malých odběratelů. Obyvatelstvo se vrací ke spalování tuhých paliv. Nemusí to být fakt negativní, pokud se tuhá paliva budou spalovat v moderních kotlích s přijatelně nízkými emisemi škodlivin a maximální efektivitou.



GRAF Č. 1 PŘEDPOKLAD VÝVOJE SVĚTOVÝCH CEN PRO FOSILNÍ PALIVA [24]

S ohledem na zvyšování ekonomické efektivity, což představuje minimalizaci ztrát celého systému, je v poslední době v oblasti energetiky pozorována jednoznačná tendence k decentralizaci výroby. Výkon nově instalovaných zdrojů se zmenšuje. Vývoj v USA je zobrazen jako graf č. 2. Vývoj energetiky v USA s ohledem na její postavení ve světové energetice představuje trend, který čeká i ČR.



GRAF Č. 2 PRŮMĚRNÁ VELIKOST NOVÝCH ZDROJŮ INSTALOVANÝCH V USA [44]

Spalování tuhých paliv je vždy doprovázeno pozoruhodnou tvorbou emisí, což představuje největší problém a překážku v jejich dalším využívání. Problematika minimalizace tvorby emisí (mimo CO₂) při spalování uhlí u velkých zdrojů je již dobře zvládnutá, což nelze říci o zdrojích malého výkonu. Malé zdroje emisí představují oblast, jenž

je do dnešní doby značně opomíjená. Je zřejmé, že cesta plynofikace těchto zdrojů nemůže obsáhnout celou oblast.

V ČR jsou pozoruhodné zásoby primární energie pouze v uhlí. Měl by zde proto být zájem o maximální využití těchto zdrojů pro domácí spotřebu. V tab. č. 1 je uvedena životnost průmyslových zásob (bilančních prozkoumaných volných zásob) vycházející z průměrného ročního úbytku zásob v období 1996 až 2000.

Surovina	Životnost [roky]
Černé uhlí	81
Hnědé uhlí	34

TAB. Č. 1 ŽIVOTNOST PRŮMYSLOVÝCH ZÁSOB UHLÍ V ČR [17]

2. Cíle práce

Pozoruhodná část spotřeby tepla v českých domácnostech je získávána ze spalování tuhých paliv, zejména uhlí. Spalování tuhých paliv je vždy doprovázeno tvorbou znečišťujících látek a se snižujícím výkonem spalovacího zařízení rostou problémy s udržení jeho dostatečné technické úrovně. Klesá účinnost a roste produkce škodlivin, vznikajících jako produkty nedokonalého spalování.

V ČR představuje jedinou pozoruhodnou zásobu energie uhlí a v souvislosti s finanční dostupností jednotlivých zdrojů energie je možné i nadále reálně uvažovat o využívání uhlí jako zdroje energie pro domácnosti. Vyžaduje to však uplatnění nových technologií spalování, moderních uhelných kotlů, které budou schopny poskytnout také podstatně vyšší uživatelský komfort.

Základní cíl této práce jsem definoval takto:

- **analýza vhodnosti spalování uhlí v ohništích malých výkonů.**

V rámci řešení této problematiky jsem se především zaměřil na řešení dílčích cílů:

- experimentální ověření a zhodnocení předepsaných a běžně používaných emisních faktorů,
- analýza vlivu změny provozních parametrů kotle na tvorbu škodlivin,
- reprodukovatelnost výsledků experimentů.

Vlastní postup analýzy probíhal v následujících krocích, které bylo nutné řešit:

- bilance emisí z malých zdrojů,
- popis vývoje technologií spalování tuhých paliv ve zdrojích o malém výkonu,
- srovnání kotle staré a moderní konstrukce (spalovací zkoušky),
- provedení provozních zkoušek kotlů spalujících uhlí,
- vyhodnocení výsledků spalovacích zkoušek a jejich zobecnění,
- posouzení vlivu typu spalovacího zařízení na tvorbu škodlivin,
- hodnocení a analýza aditivního odsíření spalin v kotlích malých výkonů,
- stanovení účinnosti kotle,
- hodnocení palivových nákladů na produkci tepla.

S ohledem na neexistenci ucelené publikace, zabývající se problematikou spalování v ohništích malých výkonů, je dalším cílem této práce, aspoň malým dílem zaplnit toto prázdné místo.

3. Postoj legislativy ČR k problematice emisí z malých zdrojů

Základním zákonem zabývajícím se problematikou znečišťování ovzduší v ČR je Zákon o ochraně ovzduší před znečišťujícími látkami, tzv. Zákon o ovzduší [41]. Zákon upravuje práva a povinnosti právnických a fyzických osob při ochraně vnějšího ovzduší před vnášením znečišťujících látek lidskou činností a způsob omezování příčin a zmírňování následků znečišťování.

Zjednodušeně (z pohledu spalovacích zařízení) je možno říci, že zákon o ovzduší dělí zdroje znečištění na:

- stacionární zařízení ke spalování paliv
- pohyblivá zařízení se spalovacími nebo jinými motory (mobilní zdroje znečišťování)

Stacionární zařízení ke spalování paliv se člení dle tepelného výkonu na:

- velké zdroje znečišťování (tepelný výkon vyšší než 5 MW)
- střední zdroje znečišťování (tepelný výkon v rozsahu od 0,2 MW do 5 MW)
- malé zdroje znečišťování (tepelný výkon nižší než 0,2 MW)

Pro účely tohoto zákona [41] je provozovatelem zdroje znečišťování právnická nebo fyzická osoba, která má právo nebo faktickou možnost provozovat tento zdroj (§ 4 odst.a), tímto je z pohledu zákona každý vlastník funkčního kotle provozovatelem zdroje znečišťování.

Zákon o ovzduší uvádí čtyři základní povinnosti provozovatelů malých zdrojů znečištění (§ 8 odst.1):

- povinnost uvádět do provozu a provozovat zdroje znečišťování v souladu s podmínkami pro provoz těchto zařízení, které stanoví výrobci nebo orgány ochrany ovzduší, pokud zpřísní podmínky stanovené pro provoz těchto zařízení,
- povinnost umožnit pracovníkům orgánů ochrany ovzduší nebo těmito orgány pověřeným osobám přístup ke zdrojům znečišťování za účelem zjištění množství znečišťujících látek a kontroly zdroje znečišťování a jeho provozu a předkládat jim k tomu potřebné podklady, podrobnosti o zjišťování množství vypouštěných znečišťujících látek ze zdroje znečišťování a stupně znečišťování ovzduší stanoví zvláštní předpisy,
- povinnost plnit pokyny orgánu ochrany ovzduší ke sjednání nápravy,
- povinnost dodržovat přípustnou tmavost kouře.

Druhá, ale z pohledu kontroly nejdůležitější povinnost se nevztahuje na provozovatele malých zdrojů znečišťování (lokální topeniště), které jsou umístěny v bytech v obytných domech, v rodinných domcích a ve stavbách pro individuální rekreaci (§ 8 odst.), jinak řečeno pro fyzické osoby nepodnikatele, tedy obyvatelstvo.

Pokud provozovatel malého zdroje znečišťování neplní povinnosti stanovené zákonem o ovzduší a dalšími obecně závaznými právními předpisy, upravujícími povinnosti při ochraně ovzduší, má orgán ochrany ovzduší oprávnění a dokonce povinnost uložit sjednání nápravy (§ 12 odst. 1).

Zákon o ovzduší (§17 odst. 2) uložil povinnost platit poplatky za znečišťování ovzduší pro fyzické osoby provozující malé zdroje znečištění o tepelném výkonu do 50 kW pouze tehdy, je-li tento zdroj užíván k výkonu podnikatelské činnosti. Později byla povinnost platit poplatky pro provozovatele malých zdrojů znečištění upravena tak, že povinnost se nevztahuje na fyzické osoby, provozující malé zdroje znečišťování o tepelném výkonu do 50 kW (§7 odst. 2 zákona 389/1991 Sb. [42]). Vznikl však problém ve výkladu pojmu „fyzické osoby“ (jde o občany a také o podnikatele?). Pojem fyzické osoby je vykládán na obecních úřadech různě. Ve většině případů se v praxi pracuje s výkladem, že povinnost platit poplatky se nevztahuje na fyzické osoby (občany, lokální zdroje) a také ani na fyzické osoby oprávněné k podnikání (oznamovací povinnost však platí), které jsou provozovateli malých zdrojů znečišťování s tepelným výkonem do 50 kW. O výši poplatku provozovatelů malých zdrojů znečišťování rozhodují a poplatek vybírají orgány obce. Tyto poplatky jsou příjmem rozpočtu obce a musí být účelově vázány k ochraně životního prostředí obce. Roční sazby poplatků pro jeden malý zdroj znečišťování se stanoví pevnou částkou do výše 40 000 Kč úměrně k velikosti zdroje znečišťování a škodlivosti produkovaného znečištění a to dle tab. č. 2. V metodickém pokynu odboru ochrany ovzduší Ministerstva životního prostředí, který je nezávazný, je doporučen maximální roční poplatek 10 000 Kč [28].

Palivo	rozsah sazby v Kč/rok		
	0 - 50 kW	50 - 100 kW	100 - 200 kW
	právnické osoby	fyzické osoby, fyzické osoby oprávněné k podnikání, právnické osoby	
koks, dřevo, zemní plyn, svítiplyn, petrolej, topný olej s obsahem síry do 0,3 %	0	0	0
topné oleje s obsahem síry od 0,3 do 1 %	400 - 800	800 - 1 250	1 250 - 1 700
lehký topný olej	700 - 1 400	1 400 - 2 100	2 100 - 2 800
ostatní topné oleje	1 000 - 2 000	2 000 - 3 000	3 000 - 4 000
černé uhlí	500 - 1 000	1 000 - 1 500	1 500 - 2 000
hnědé uhlí tříděné, paliva z hnědého uhlí	1 050 - 2 100	2 100 - 3 300	3 300 - 4 200
hnědé uhlí energetické	2 000 - 4 000	4 000 - 6 000	6 000 - 8 000
kaly, proplásky	10 000	10 000 - 20 000	20 000 - 40 000

TAB. Č. 2 SAZBA POPLATKŮ ZA MALÉ ZDROJE ZNEČIŠŤOVÁNÍ [42]

Provozovatel (fyzické osoby oprávněné k podnikání a právnické osoby provozující malý zdroj znečištění o tepelném výkonu v rozsahu 0 – 200 kW) je povinen vypočítat poplatek a oznámit tento výpočet do 15. února kalendářního roku příslušnému orgánu ochrany ovzduší. Orgány státní správy ochrany ovzduší pro malé zdroje znečišťování jsou orgány obce. Fyzické osoby oprávněné k podnikání provozující malý zdroj znečištění o tepelném výkonu do 50 kW neplatí poplatky, ale musí podat oznámení.

Dle § 5 odst. 2 zákona 389/1991 Sb. orgány obce

- mohou stanovit obecně závaznou vyhláškou:

a) městské zóny s omezením provozu zdrojů znečišťování

b) zvláštní požadavky na druh paliva pro malé zdroje znečišťování

- kontrolují dodržování povinností provozovatelů malých zdrojů znečišťování a za nedodržení povinností jim ukládají pokuty (od 500 do 100 000 Kč)
- kontrolují dodržování přípustné tmavosti kouře u provozovatelů malých zdrojů znečišťování a za nedodržení povinností jim ukládají pokuty
- ukládají provozovatelům malých zdrojů znečišťování, kteří neplní povinnosti při ochraně ovzduší opatření ke sjednání nápravy, včetně zastavení nebo omezení provozu zdroje znečišťování
- rozhodují o poplatcích za malé zdroje znečišťování

Z všeobecných povinností právnických a fyzických osob, které zákon o ovzduší ukládá, je z pohledu emisí z lokálních topenišť důležitá povinnost uložena výrobcí, dovozci a prodejci paliv (§ 6 odst. 3 zákona 309/1991 Sb.), kteří jsou povinni vyrábět, dovážet a prodávat paliva v souladu s požadavky na kvalitu stanovenou zvláštním předpisem. V § 20 odst. 3 vyhlášky č.117/1997 [27] je v kapitole požadavky na kvalitu, způsob dodávky a prodej paliv uvedeno, že palivo dodávané pro spalování v malých zdrojích znečišťování a obyvatelstvu musí splňovat požadavky na jakost uvedené v tab. č. 3. Jedná se o stanovení maximální hodnoty obsahu síry v palivu.

Limitní měrná sirnatost paliva	jednotky	tuzemská produkce	zahraniční produkce
hnědá uhlí	g/MJ	1,07	0,5
černá uhlí	g/MJ	0,78	0,5
brikety	g/MJ	0,6	0,5
Limitní obsah síry			
kapalná paliva	% _{hm.}	0,2	0,2
topná nafta	% _{hm.}	0,05	0,05

TAB. Č. 3 POŽADAVKY NA JAKOST PALIVA DODÁVANÉHO PRO SPALOVÁNÍ V MALÝCH ZDROJÍCH ZNEČIŠŤOVÁNÍ A OBYVATELSTVU [27]

Limitní měrná sirtatost paliva je nejvýše přípustný obsah sloučenin síry vyjádřených jako síra v gramech v palivu v původním stavu, vztažený na výhřevnost. Limitní měrná sirtatost pro hnědé uhlí (1,07 g/MJ) při průměrné hodnotě výhřevnosti u hnědého uhlí cca 17 MJ/kg představuje pro uhlí tuzemské výroby dosti vysoký limitní obsah síry cca 1,8 %_{hm.}. Zákon také neříká, o jakou síru se jedná (spalitelná, celková). Kontrolou dodržování plnění povinnosti výrobců, dovozců a prodejců paliv je ze zákona ustanoven okresní úřad (§ 4 odst. 2 zákona 389/1991 Sb.). Tato kontrola se provádí minimálně a je založena na výsledcích analýz, deklarovaných výrobcí (nejedná se o odběr a analýzu nezávislou osobou).

Souhrnně je možné říci, že zákon ukládá i malým provozovatelům znečištění mnoho povinností. U právnických a fyzických osob oprávněných k podnikání dává v praxi dostatečné právní nástroje ke kontrole plnění povinností a také donucovací nástroje k realizaci případné nápravy. Jiná situace (z pohledu právních nástrojů) je u fyzických osob „nepodnikatelů“ (lokální topeniště). V případě podezření na neplnění zákona o ovzduší u těchto obyvatel je velice problematické a zdoluhavé toto podezření dokázat (provozovatel zástupce orgánu ochrany ovzduší nevpustí do objektu). Také dokazování překročení povolené tmavosti kouřové vlečky je právně a hlavně organizačně velmi složité. V běžné praxi se obecní úřady lokálními topeništi zabývají jen zřídkakdy. U stanovené měrné limitní sirtatosti paliva není přesně řečeno, o jakou síru se jedná (zda jde jen o spalitelnou či veškerou síru).

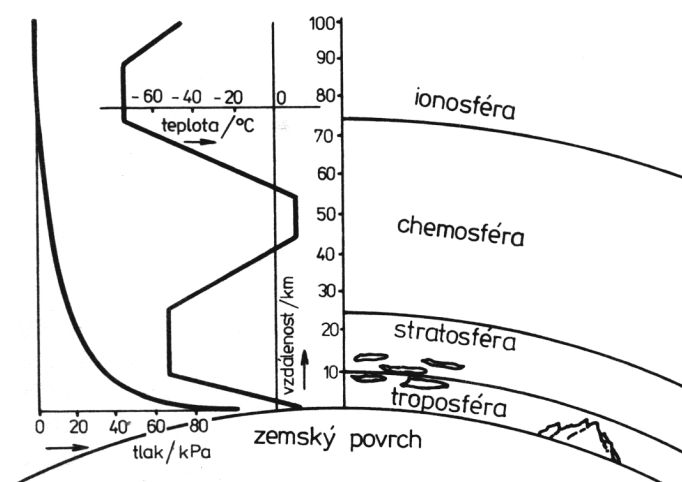
V současnosti je problematika požadavků kladených na spalovací zařízení pro tuhá paliva (před uvedením na trh) řešena zákonem o technických požadavcích na výrobky [39], [43]. Kotle na tuhá paliva jsou dle příslušného nařízení vlády [29] označeny jako výrobky stanovené. V seznamu výrobků s vyznačením postupu posouzení shody jsou vedeny pod oblastí „Technická zařízení staveb“ ve skupině č.5 (zařízení pro přípravu teplé vody, ústřední vytápění, tepelná čerpadla a zásobníky) a č.6 (domovní spalovací topná zařízení na pevná a kapalná paliva). Nařízení vlády stanovuje povinnost pro výrobce nebo dovozce stanovených výrobků před uvedením výrobků na trh zajistit ověření shody výrobku. K nařízení vlády se vyhlašují technické požadavky, které jsou vyjádřeny harmonizovanými normami [6]. Harmonizované normy jsou uveřejňovány ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví [36]. V příslušných normách [13] jsou uvedeny limity emisí CO, VOC, TZL pro jednotlivé třídy kotlů. Je zajímavé, že nejsou stanoveny limity pro NO_x.

4. Ovzduší a jeho znečišťování při spalování paliv

Spalování paliv je vždy doprovázeno negativním působením na jednotlivé složky životního prostředí. Protože z pohledu kvality spalování lze nejvíce ovlivnit tvorbu emisí, bude v této práci soustředěna pozornost na ovzduší a jeho znečišťování.

4.1. Ovzduší

Obecně se ovzduším rozumí vzdušný obal zeměkoule, tedy zemská atmosféra, která je tvořena směsí různých plynů a aerosolových částic tuhého i kapalného skupenství. Atmosféra nemá výraznou horní hranici. Hustota jejích plynů se postupně přibližuje hustotě plynů v meziplanetárním prostoru. Za horní hranici celé atmosféry Země je považována výška, kde vzduchové částice ještě rotují se Zemí. Klade se do výšky 35 000 km. Tlak a teplota ovzduší se s různou vzdáleností od zemského povrchu mění (viz obr. č. 1). Nad každým čtverečním centimetrem zemského povrchu je přibližně jeden kg vzduchu. Z toho cca 90 %_{hm} vzduchu je do výšky 16 km, 99 %_{hm} do výšky 30 km a 99,9 %_{hm} do výšky 48 km.



OBR. Č. 1 ZÁVISLOST TEPLoty A TLAKU OVZDUŠÍ NA VZDÁLENOSTI OD ZEMSKÉHO POVRCHU [33]

Čistý vzduch neobsahující žádný prach ani plynné znečišťující látky je ideální pojem a v přírodě se nevyskytuje, jelikož neustále dochází k dynamickým změnám mezi ovzduším, zemským povrchem, hydrosférou, biosférou apod. Vzhledem k neustálým změnám není ani přirozené chemické složení vzduchu konstantní. Atmosférický vzduch je chápán jako aerodisperzní systém neboli aerosol, tvořený mikroskopickými částicemi pevné i kapalně fáze, rozptýlenými v plynném prostředí. Přibližně 99,5 až 99,6 % přirozené atmosféry tvoří hlavní plynné složky (viz tab. č. 4) a zbytek vedlejší plynné složky (viz tab. č. 5).

Hlavní plynné složky přízemní atmosféry	Suchý vzduch			Vlhký vzduch		
	%obj.	g/m ³ _N	%hm.	%obj.	g/m ³ _N	%hm.
N ₂	78,09	895	75,54	75,65	867	74,08
O ₂	20,94	274	23,13	20,29	265	22,64
H ₂ O	-	-	-	3,12	23	1,97
Ar	0,93	15,2	1,28	0,9	14,7	1,26
Celkem	99,96	-	99,95	99,96	-	99,95

TAB. Č. 4 HLAVNÍ PLYNNÉ SLOŽKY PŘÍROZENÉ ATMOSFÉRY [1]

Obsah prachu ve vzduchu značně kolísá v závislosti na rychlosti větru, vlhkosti, povrchové prašnosti a výskytu zdrojů prachu. Jako průměrná hmotnostní koncentrace prachu v neznečištěném vzduchu se uvádí hodnota 20 µg/m³_N. Početní koncentrace dosahuje řádově 10⁶ částic v 1 m³_N vzduchu. Prach je tvořen organickými i anorganickými částicemi, které vzdušné proudy vynesou až do výšek 6 až 7 km.

Vedlejší plynné složky, tj. škodliviny	Index škodlivosti	Suchý vzduch			Vlhký vzduch		
		ppm _{obj.}	mg/m ³	ppm _{hm.}	ppm _{obj.}	mg/m ³	ppm _{hm.}
CO ₂	a, b	315	567	478	305	549	469
Ne		18	14,9	12,6	17,4	14,4	12,3
He		5,2	0,85	0,717	5	0,825	0,705
CH ₄	a, b	1	0,656	0,554	0,97	0,635	0,543
Kr	b	1	3,43	2,895	0,97	3,32	2,837
N ₂ O	a	0,5	0,9	0,76	0,49	0,873	0,746
H ₂		0,5	0,0413	0,0348	0,49	0,04	0,034
CO	a	0,1		0,2			
Xe		0,08	0,429	0,362	0,08	0,417	0,356
O ₃	b	0,02		0,06			
NH ₃	a	0,01		0,01			
NO ₂	a	0,001		0,003			
SO ₂	a	0,0002		0,0009			
H ₂ S	a, b						
C _x H _y	a, b						
Organické páry	a	0,02			0,02		
Celkem		341,4312		496,1967	330,42		486,521

Poznámky: 1. Složky označené indexem škodlivosti "a" se obvykle považují za látky znečišťující ovzduší
2. Složky označené indexem škodlivosti "b" se vyskytují v přírodním ovzduší i ve větších koncentracích, než uvádí tabulka, což závisí na počasí, sopečné činnosti a dalších faktorech; u sirovodíku a přírodních uhlovodíků číselné hodnoty neuvádí (jejich stopové množství se pohybuje prakticky kolem nulové hodnoty)

TAB. Č. 5 VEDLEJŠÍ PLYNNÉ SLOŽKY PŘÍROZENÉ ATMOSFÉRY [1]

4.2. Znečišťování a znečištění ovzduší

V oblasti ochrany ovzduší jsou používány dva základní pojmy a to znečišťování a znečištění ovzduší. Pro vypouštění neboli vnášení do atmosféry (emisí) látek znečišťujících ovzduší se používá pojem znečišťování ovzduší (označuje činnost nebo děj). Pojem znečištění ovzduší lze chápat jako přítomnost nebo obsah (imise) těchto látek v ovzduší v takové míře a době trvání, při nichž se projeví nepříznivé ovlivňování životního prostředí. Tento pojem tedy označuje určitý stav, který je důsledkem původního děje [19].

V obecném slova smyslu se do pojmu znečišťování ovzduší zahrnuje řada různých činností zamořujících zemskou atmosféru – od vypouštění hmotných látek přes emise

škodlivého elektromagnetického záření až po hluk, teplo atd. V užším slova smyslu se znečišťováním ovzduší rozumí vypouštění (vnášení) hmotných látek tuhého, kapalného nebo plynného skupenství ze zdrojů znečišťování do ovzduší, které buď přímo, nebo po chemických změnách v atmosféře, popř. ve spolupůsobení s jinou látkou (synergicky) negativně ovlivňují životní prostředí.

Různé kategorie problémů znečišťování ovzduší v závislosti na územním, vertikálním a časovém měřítku jsou ukázány v tab. č. 6. Vyplývá z ní, že k dynamickým jevům znečišťování ovzduší dochází především v přízemní vrstvě ovzduší, avšak z hlediska dlouhodobých změn ovlivňuje znečišťování ovzduší celou atmosféru.

Z hlediska místa vzniku se rozlišuje primární znečišťování, jímž se rozumí úlet ze zdrojů (emise) a sekundární znečišťování, jímž se rozumějí chemické změny některých látek, které nastanou při šíření exhalací (transmisí) v atmosféře. Místo termínu sekundární znečišťování se někdy užívá termín chemismus atmosféry. Pod tento pojem se zahrnují základní chemické reakce, jako je oxidace apod., v jejichž důsledku dochází ke změnám plynných látek v atmosféře, dále změny skupenství neboli konverze některých plynných látek na jemně disperzní částečkové tuhé látky, setrvávající potom trvale v horních vrstvách atmosféry a konečně i změny fotochemické (fotochemické smogy).

Kategorie problému	Měřítko			Kompetence orgánů
	územní	vertikální	časové	
globální	zeměkoule	atmosféra	desetiletí	mezinárodní
kontinentální	světadíl	stratosféra	roky	
celostátní	stát	troposféra	měsíce	státní
průmyslových aglomerací	větších		kraj	týdny
	menších	okres	dny	
města	město	přízemní vrstva do výše 500 až 1 500 m		
lokální	bezprostřední okolní zdroje	výška komínu	hodiny	

TAB. Č. 6 KATEGORIE PROBLÉMŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ OVZDUŠÍ

Znečišťování ovzduší má své příčiny i následky. Příčinou jsou úlety (emise) znečišťujících látek z jednotlivých zdrojů. Spojení mezi příčinami a následky obstarává zemská atmosféra. Mezi následky znečišťování ovzduší patří působení znečištěného ovzduší na jednotlivé příjemce, ať už člověka, zvířata, rostliny, neživou přírodu, půdu, vodu, krajinu, nebo stavby a materiály. V širším slova smyslu se někdy do pojmu působení zahrnuje i vliv znečišťování ovzduší na atmosféru samotnou, na klima, jeho ekonomické a společenské účinky.

4.3. Látky znečišťující ovzduší

Znečišťující látky zákon o ovzduší [41] definuje jako látky tuhé, kapalné a plynné, které přímo a nebo po chemické nebo fyzikální změně v ovzduší nebo po spolupůsobení s jinou látkou nepříznivě ovlivňují ovzduší a tím ohrožují a poškozují zdraví lidí nebo ostatních organismů, zhoršují jejich životní prostředí, nadměrně je obtěžují nebo poškozují majetek.

Látky znečišťující ovzduší jsou tedy hmotné látky, které nepříznivým způsobem ovlivňují životní prostředí. Nepříznivé ovlivňování se může projevat různými způsoby, např.:

- škodami na zdraví lidí a zvířat
- poškozováním prostředí (nebo některé jeho složky)
- nepříznivými změnami přirozeného složení ovzduší
- obtěžováním okolí, zhoršením pohody prostředí (pachem, snížením viditelnosti atd.)

Z hlediska skupenství se znečišťující látky rozdělují na tuhé, kapalné a plynné. V praxi se tyto tři skupiny spojují do skupin podle různých hledisek, např. způsobu odlučování, stanovení úletu atd.

Z hlediska chemického složení se látky znečišťující ovzduší dělí např. do skupin uvedených v tab. č. 8. Někteří autoři rozlišují ještě další skupiny podle jiných vlastností, např. alergenů, karcinogenů, těžké kovy, radioaktivní látky, uhlovodíky, zápach apod. Další podstatné hledisko pro rozdělení znečišťujících látek je míra škodlivosti (nebezpečnost, rizikovitost), které představuje samostatnou oblast (toxikologie).

Dle vyhlášky [27] jsou znečišťující látky rozděleny do pěti hlavních skupin. Nultou skupinu představují tzv. základní znečišťující látky (viz tab. č. 7). Z pohledu sledování kvality spalování a tedy tvorby škodlivin jsou tyto látky nejvíce sledované. Tato skutečnost je dána hlavně historickým vývojem. Některé ze znečišťujících látek, které člověk nyní považuje za škodliviny, v nedávné minulosti považoval za neškodné látky (azbest), nebo je vůbec neznal (PCDD/F). S rostoucí úrovní techniky je možné stanovovat přítomnost látek i ve velmi nízkých koncentracích.

1. tuhé znečišťující látky (TZL)
2. oxid siřičitý (SO ₂)
3. oxidy dusíku (NO _x)
4. oxid uhelnatý (CO)
5. těkavé organické sloučeniny (VOC)

TAB. Č. 7 SEZNAM ZÁKLADNÍCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK (0. SKUPINA) [27]

Sloučeniny síry	anorganické	oxidy síry (celkový obsah, suma) kyselina sírová (mlha), sirovodík, sírouhlík, jiné anorganické sloučeniny síry	oxid siřičitý, oxid sírový
	organické	thioly (merkaptany, např. methanthiol), dimethylsulfid, dimethyldisulfid, jiné organické sloučeniny síry	
Sloučeniny dusíku	anorganické	oxidy dusíku (celkový obsah, suma) kyselina dusičná, amoniak, dusitany, kyanovodík, kyanidy, peroxodusičnany, jiné anorganické sloučeniny dusíku	oxid dusnatý, oxid dusičitý, oxid dusný
	organické	aminy, peroxyacetylnitrát, dimethylformamid, jiné organické sloučeniny dusíku (rozpuštědla)	
Sloučeniny halogenů	anorganické	fluor, fluorovodík, fluorid křemičitý, chlor, chlorovodík, brom, jiné anorganické sloučeniny halogenů	
	organické	chlorované uhlovodíky (např. DDT, trichlorethylen, perchlorethylen, chlorbenzen, chloroform), trifluormethan, jiné organické sloučeniny halogenů	
Sloučeniny uhlíku	anorganické	oxidy uhlíku	oxid uhelnatý, oxid uhlíčitý
	organické	uhlovodíky alkoholy (methanol, ethanol, propanol, butanol, ethylenglykol), fénol, kresol, xylenon, ethery a estery, aldehydy a ketony, organické kyseliny, benzen a jeho deriváty, jiné organické sloučeniny a směsi (mlhy a páry olejů apod.)	alifatické, nasycené i nenasycené, aromatické (benzen, toluen, xylen), alicyklické, polycyklické a heterocyklické
Jiné plynné a kapalné znečišťující látky (sloučeniny kovů jako arsenovodík, oxid arsenitý a řada jiných)			

TAB. Č. 8 PLYNNÉ A KAPALNÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY PODLE CHEMICKÉHO SLOŽENÍ [1]

4.3.1. Tuhé znečišťující látky

Tuhé znečišťující látky v proudících spalinách jsou definovány jako částice tuhého skupenství jakéhokoliv tvaru, struktury a hustoty rozptýlené v plynné fázi [14]. Tuhé znečišťující látky obsažené v emisích mohou pocházet pouze z látek vstupujících do spalovacího procesu. To je především palivo (nedokonale spálená hořlavina, popelovina, produkty tepelného rozkladu paliva jako saze apod.), spalovací vzduch (tuhé příměsi) a samotné spalovací zařízení (rez).

Důležitým parametrem TZL je velikost jednotlivé částice, která je základním údajem pro stanovení granulometrického složení prachu. Jelikož se prach skládá z částic různých velikostí, vyjadřuje se poměrné zastoupení jednotlivých velikostí v souboru obvykle zbytkovou charakteristikou. V některých případech se jako charakteristický parametr používá rychlost pádu částice.

Popelovina obsahuje stopové prvky - těžké kovy, které se při spalování distribuují v emisích s popílkem do ovzduší nebo do tuhých zbytků po spalování (škvára, popel). TZL mohou být také ve formě aerosolů. Charakteristickým rysem prašných aerosolů emitovaných ze spalovacích procesů je heterogenita struktur částic. Hrubé částice o rozměrech 10-100 μm jsou tvořeny částicemi polokoksu, koksu, tuhých pyrolýzních zbytků a minerálních látek zbylých po spálení. Složitými fyzikálně-chemickými procesy probíhajícími na povrchu a v okolí hořících částic uhlí vznikají ultrajemné částice, které nesedimentují za určitých podmínek po celé týdny nebo dokonce měsíce a jsou zpravidla značně obohaceny těžkými kovy. Mezi stopové prvky provázející spalování uhlí patří: Ba, Be, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As, Co, Sr, V, Cu, Mo, Tl a Se. Tyto prvky se po spadu dostávají do půdy a narušují půdní ekosystém, resp. se dostávají až do potravinového řetězce.

4.3.2. Oxidy síry

Oxidy síry vznikají při spalování uhlí oxidací síry obsažené v palivu. Oxidace síry je exotermická reakce, a proto je síra považována za součást hořlaviny. Nad energetickým přínosem výrazně převažuje negativní dopad oxidů síry na životní prostředí. Síru obsaženou v palivu ve formě řady sloučenin lze rozdělit na část spalitelnou a část nespalitelnou. Nespalitelná část sloučenin síry je obsažena v tuhých zbytcích po spálení ve formě síranů.

Hlavním produktem oxidace síry obsažené v palivu je oxid siřičitý (SO_2) a částečně (1÷2 %) i oxid sírový (SO_3), jehož množství závisí na obsahu siřných látek v palivu a způsobu spalování. Při špatném seřízení spalovacího procesu může ze siřných komponentů v palivu vznikat ve spalínách sirovodík (H_2S) a to především za redukčních podmínek (nedostatek O_2).

Při spalování se vždy část spalitelné síry váže na popelovinu a u uhlí, které má vyšší obsah alkálií se takto může vázat 10-20 % vzniklého SO_2 . Tento stupeň zachycení síry na škváru lze ovlivnit vhodným vedením spalovacího procesu, avšak vždy záleží na poměru obsahu alkálií v popelovině ku obsahu síry v palivu [30]. Tzv. „Ekouhlí“, které se dováželo z Ruska, mělo velký obsah vápeníku (cca 50 %_{hm} v popelu).

V zásadě tedy platí, že tvorba oxidů síry je dána složením uhlí a jen málo ji lze snížit vhodným řízením spalovacího procesu. Proto existují pouze dvě použitelné metody snižování

jejich emisí. První z nich spočívá v úpravě uhlí před spalováním, při níž je uhlí zbaveno části spalitelné síry (bez komerčního uplatnění). Druhá pak v odstranění vzniklých oxidů síry ze spalin.

4.3.3. Oxidy dusíku

Oxidy dusíku (NO_x) představují směs oxidu dusnatého (NO), oxidu dusičitého (NO_2) a v poslední době stále více zmiňovaného oxidu dusného (N_2O , rajský plyn). Ve spalinách představuje podíl NO_2 z celkového množství NO_x jen 5-10 %. Podíl N_2O je minimální.

Tvorba NO_x je dána reakcí mezi atomem kyslíku a molekulou dusíku. Množství molekulárního kyslíku je úměrné stupni disociace molekuly kyslíku. Tyto procesy mají vysokou energetickou bariéru a jsou tedy výrazně závislé na teplotě. Podle vzniku se rozlišují tři druhy NO_x , označované jako:

- termické (exponenciální závislost na teplotě, vznikají reakcí s dusíkem dopraveným do ohniště ve spalovacím vzduchu),
- palivové (oxidace dusíkatých složek obsažených v palivu),
- rychlé (vazba molekul dusíku s radikály v reakcích s nízkou energetickou potřebou, svázáno s hořením uhlovodíků, malá oblast plamene).

Po vstupu spalin do atmosféry dochází k dookysličení NO na několikanásobně toxičtější NO_2 . Zde hraje hlavní roli atmosférický ozón, který reaguje s NO 10^5 krát rychleji než molekulární kyslík. Tak dochází k rychlé spotřebě ozónu, který např. zcela chybí v kouřové vlečce. Oxidy dusíku jsou jedním z hlavních původců fotochemického smogu.

4.3.4. Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý jako bezbarvý plyn bez zápachu vzniká nedokonalým spalováním uhlíku z paliva. Příčinou nedokonalého spalování je nedostatek spalovacího vzduchu v zóně hoření a může jí být také rychlé ochlazení plamene (nedostatek času potřebného pro proběhnutí oxidace uhlíku na CO_2). Řízením spalovacího procesu se může vznik CO omezit, ačkoliv zcela zabránit vzniku této látky nelze.

4.3.5. Organické polutanty

Uhlovodíky se vyskytují ve všech geologických formacích v litosféře, hydrosféře i v atmosféře. Některé pak vstupují do živých organismů, kde dále působí. Uhlovodíky řadíme do kategorie organických polutantů. Organické polutanty můžeme rozdělit podle jejich těkavosti na těkavé organické látky (Volatile organic compounds-VOC), polotěkavé organické látky (Semivolatile organic compounds-SVOC) a netěkavé organické látky (Non-

volatile substances). Těkavost je schopnost látky změnit se v páru nebo plyn bez chemické přeměny.

- **VOC** – do této skupiny řadíme všechny organické sloučeniny s výjimkou metanu, které při běžných podmínkách (20°C, 100 kPa) vykazují tlak par nejméně 0,01 kPa, nebo které jsou srovnatelně těkavé za daných podmínek jejich aplikace.
- **SVOC** – jsou organické látky, které se při běžných podmínkách (20°C, 100 kPa) pomalu vypařují. Z definice VOC vyplývá, že jsou to látky, které při běžných podmínkách vykazují tlak par menší než 0,01 kPa. Do této skupiny patří např. PCDD/F, PCB, většina PAU. Naftalen patřící do skupiny PAU je na hranici rozdělení VOC a SVOC.
- **Netěkavé organické látky** – tyto sloučeniny nejsou schopné přeměnit se z pevného nebo kapalného skupenství na plyn nebo páru. Jsou to strukturně složité sloučeniny, např. plasty, jejichž teplota vypařování je vyšší než teplota, při které dochází k jejich tepelnému rozkladu.

Z hlediska setrvávání organických látek v prostředí je významná skupina perzistentních organických polutantů (POP). Jsou to látky, které mají schopnost zůstat v prostředí po dlouhou dobu beze změny. POP jsou odolné vůči chemickému, fotochemickému, termickému i biochemickému rozkladu. To umožňuje jejich koloběh v prostředí a kumulaci v půdách, sedimentech i živých organismech. Řadíme zde látky patřící do skupiny pesticidů (Aldrin, DDT, Chlordan aj.), průmyslové chemikálie (Hexabrombifenylyl, Hexachlorbenzen, PCB) a látky vznikající jako nežádoucí vedlejší produkty (PCDD/F, PAU) [20].

Z pohledu platné legislativy není postoj k emisím uhlovodíků nikterak jednoznačný. Pokud platná legislativa hovoří o základních znečišťujících látkách (skupina nula viz tab. č. 7), hovoří o těkavých organických sloučeninách (VOC). Naproti tomu pokud stanovuje emisní limity, hovoří o organických látkách jako ΣC . U hodnot emisních faktorů pro stanovení množství emisí výpočtem se hovoří o C_xH_y . U metod měření a technických požadavků na přístroje pro kontinuální měření se hovoří o uhlovodících a organických látkách. Je zřejmé, že se jedná o rozpory, které jsou hlavně poplatné postupnému vývoji poznání organických látek stejně jako tvorbě návrhů vyhlášek a předpisů. Nezbyvá, než doufat, že po upozornění na výše uvedené rozpory bude novelizace příslušné vyhlášky oproštěna nejednotnosti a rozporů pohledů na emise organických látek.

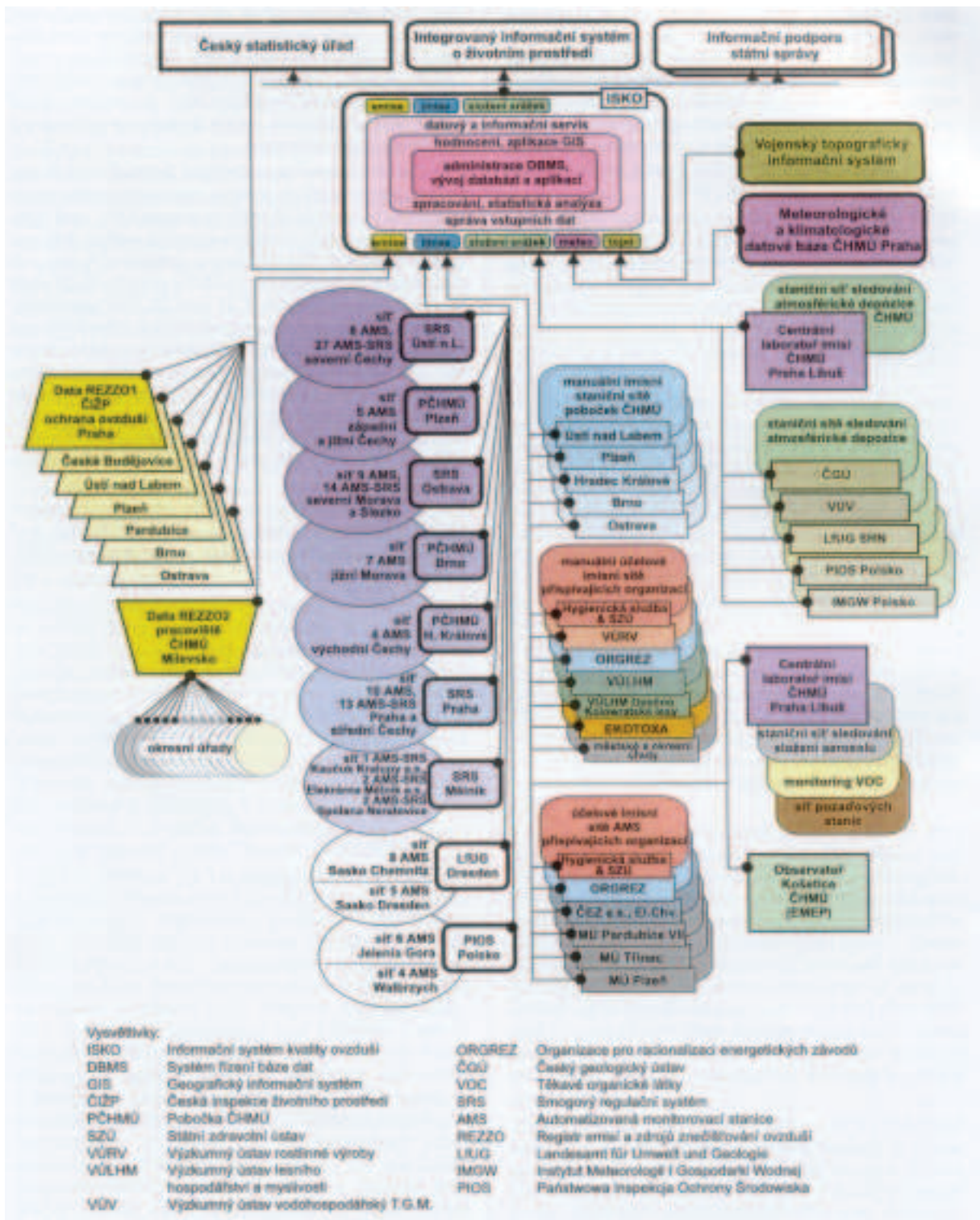
5. Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší

Zdroje emitující do ovzduší znečišťující látky jsou celostátně sledovány v rámci tzv. Registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO). Stacionární zdroje jsou zahrnuty v dílčích souborech REZZO 1÷3 (viz tab. č. 9), mobilní zdroje jsou začleněny v dílčím souboru REZZO 4.

Druh zdroje		
Velké zdroje znečišťování REZZO 1	Střední zdroje znečišťování REZZO 2	Malé zdroje znečišťování REZZO 3
stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu vyšším než 5 MW a zařízení zvláště závažných technologických procesů	stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu od 0,2 do 5 MW, zařízení závažných technologických procesů, uhelné lomy a plochy s možností hoření, zapaření nebo úletu znečišťujících látek	stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu, nižším než 0,2 MW zařízení technologických procesů, nespadajících do kategorie velkých a středních zdrojů, plochy, na kterých jsou prováděny práce, které mohou způsobovat znečišťování ovzduší, skládky paliv, surovin, produktů a odpadů a zachycených exhalátů a jiné stavby, zařízení a činnosti, výrazně znečišťující ovzduší
bodový zdroj	bodový zdroj	plošné zdroje
zdroje jednotlivě sledované	zdroje jednotlivě sledované	zdroje hromadně sledované

TAB. Č. 9 ROZDĚLENÍ STACIONÁRNÍCH ZDROJŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ OVZDUŠÍ V REGISTRU EMISÍ A ZDROJŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ OVZDUŠÍ

Správou databáze REZZO za celou ČR je pověřen ČHMÚ. Jednotlivé dílčí databáze REZZO 1-4, které slouží k archivaci a prezentaci údajů o stacionárních a mobilních zdrojích znečišťování ovzduší, tvoří součást Informačního systému kvality ovzduší (ISKO), provozovaného rovněž ČHMÚ jako jeden ze základních článků soustavy nástrojů pro sledování a hodnocení kvality ovzduší ČR (viz obr. č. 2). Jedním z pravidelných výsledků ročního zpracování údajů v datových bázích ISKO je tabelární a grafická ročenka „Znečištění ovzduší na území České republiky“.



OBR. Č. 2 SCHÉMA VAZEB ISKO NA ZDROJE DAT A KOOPERUJÍCÍ SYSTÉMY [4]

5.1. Metodika stanovování emisí z malých zdrojů znečišťování (REZZO3)

Bilancí emisí z malých zdrojů znečišťování je v rámci ČHMÚ pověřeno Oddělení emisí a zdrojů pracoviště Milevsko. Jedná se o plošné zdroje, které jsou sledovány hromadně. Zjednodušeně lze říci, že bilance emisí malých zdrojů se provádí na základě zpracování údajů ze Sčítání lidu, domů a bytů [7] provedeného v roce 1991, jehož výstupem jsou spotřeby základních druhů fosilních paliv spalovaných v domácnostech a dále z údajů aktualizovaných

ve spolupráci s regionálními dodavateli paliv a energií. Celková bilance malých zdrojů nezahrnuje údaje o emisích z drobných provozoven, zpoplatněných obecními a městskými úřady [5]. V další části bude popsán metodický postup výpočtu emisí z malých zdrojů znečištění použitý pro topnou sezónu 1997/98. V předchozích letech byla podstata metodiky výpočtu stejná, pouze postupem času byly zapracovávány nové korekce reagující na nové poznatky a zkušenosti. Do roku 1995 byla bilance prováděna na úrovni okresů a od následujícího roku se provádí bilance na úrovni obcí. Pojem byt, který se v metodice hojně užívá, je nutno chápat jako jedna bytová jednotka (domácnost).

Je nutné zmínit, že výsledné hodnoty emisí pro REZZO3 jsou hodnoty přibližné, protože jsou zatíženy značnou nejistotou vstupních údajů. Přínosná bude aktualizace vstupních údajů po zpracování sčítání lidu z roku 2001.

5.1.1. Vstupní údaje pro výpočet emisí

Průměrná teplota vzduchu v průběhu topné sezóny

Pro upřesnění výpočtu potřeby tepla na byt v dané obci byla použita průměrná teplota vzduchu topné sezóny (říjen až duben) jako funkce nadmořské výšky obce. Byla odvozena jako lineární regrese průměrné teploty vzduchu topné sezóny a nadmořské výšky meteorologických stanic pro jednotlivé pobočky, jejichž území působnosti zhruba odpovídá bývalým krajům. V tab. č. 10 jsou uvedeny hodnoty parametrů regresní přímky

$$\bar{t}_{\text{vzd}}^{\text{TS}} = A \cdot NV + B \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad (1)$$

NV je nadmořská výška v m pro oblasti jednotlivých poboček v topné sezóně 1997/98 včetně hodnoty spolehlivosti R^2 .

Pobočka	konstanta A	konstanta B	hodnota spolehlivosti R^2
Praha (30 stanic)	-0,0065	6,4679	0,8268
Č. Budějovice (27 stanic)	-0,0053	5,8441	0,7815
Plzeň (24 stanic)	-0,0042	5,1784	0,7451
Ústí n. L. (25 stanic)	-0,0054	5,9130	0,8807
Hradec Králové (25 stanic)	-0,0062	5,9490	0,9623
Brno (32 stanic)	-0,0056	5,8264	0,8738
Ostrava (37 stanic)	-0,0052	5,5909	0,9194

TAB. Č. 10 PARAMETRY REGRESNÍ PŘÍMKY ZÁVISLOSTI PRŮMĚRNÉ TEPLoty TOPNÉ SEZÓNY NA NADMOŘSKÉ VÝŠCE PRO TS 1997/98

Potřeba tepla pro vytápění bytů

Za mírné zimy (průměrná teplota venkovního vzduchu topné sezóny 3,2 °C) byla odhadnuta průměrná potřeba tepla na průměrný byt na 50 GJ. Z rozdílu spotřeby zemního

plynu mezi mírnou a chladnou topnou sezónou (rozdíl v průměrné teplotě topné sezóny 2,4 °C) byl odhadnut nárůst potřeby tepla na 10 GJ. Z těchto hodnot byla odvozena závislost roční potřeby tepla pro jednu bytovou jednotku (Q_{rok}) na průměrné teplotě venkovního vzduchu topné sezóny ($\bar{t}_{\text{vzd}}^{\text{TS}}$), kterou je možno vyjádřit rovnicí regresní přímky:

$$Q_{\text{rok}} = -4,1667 \cdot \bar{t}_{\text{vzd}}^{\text{TS}} + 63,3333 \quad [\text{GJ/r}]. \quad (2)$$

U měst, pro které jsou k dispozici statistické údaje o počtech domů s různým počtem bytů [7], byla nově zavedena korekce na zastoupení činžovních domů ve městě s více než čtyřmi byty. Protože rozdíl mezi roční potřebou tepla v bytových domech a rodinných domcích je podle dostupných podkladů cca 15 GJ, byla pro města použita korekce odečtením hodnoty 15 krát podíl činžovních domů.

Počet bytů s dálkovým vytápěním a vytápěním z blokových a domovních kotelen

Pro získání údajů o centrálním zásobování teplem včetně blokových kotelen byli osloveni dodavatelé tepla ve všech větších městech ČR. Byla obdržena data z převážné části krajských a okresních měst, méně již z měst menších (celkem z 66 míst). Vzhledem k tomu, že podle srovnání předešlého a aktuálního roku se koeficient meziroční změny blíží hodnotě jedna, byly v ostatních případech použity údaje z předchozího roku.

Počet bytů vytápěných zemním plynem

Pro topnou sezónu 1997/98 byla obdržena data za kategorii obyvatelstva od většiny plynárenských akciových společností s výjimkou Západočeské a Severočeské plynárenské. Pro vytápění byly použity údaje o počtu odběratelů a spotřebě zemního plynu v pásmu nad 900 m³/r.

Počet bytů vytápěných elektricky

Jako vstupní údaje pro počet elektricky vytápěných domácností bylo použito údajů o počtu odběratelů elektrické energie se sazbami BV, BH a BP (přímotopy a akumulární vytápění). Data byla získána alespoň na úrovni okresů od většiny energetických akciových společností kromě Východočeské a Jihomoravské energetiky. Pro eliminaci odběratelů, kteří využívají přípojky pouze k přitápění, byl na datech z loňského roku na základě pásmové analýzy odběru vyčíslen podíl odběratelů s vytápěním.

5.1.2. Postup výpočtu

Počet bytů s různým způsobem vytápění v obci

Výchozími údaji jsou výsledky SLDB 1991, konkrétně údaje o způsobu vytápění trvale obydlených bytů (tabulka 314 [7]) a o vybavenosti trvale obydlených domů (tabulka 250 [7]). Údaje existují pro obce ve stavu z počátku 90. let, nové změny (zejména osamostatnění řady malých částí obcí) nebylo možno do výpočtu promítnout. Z tabulky o vybavenosti trvale obydlených domů, která je zpracována jen pro větší města, byl odvozen počet bytů vytápěných malými domovními kotelny (B_MDK):

$$B_MDK = \text{počet bytů s } \dot{U}T \cdot \text{podíl DK} \cdot \text{podíl bytů v domech s 2-19 byty}$$

Odečtením této hodnoty od celkového počtu bytů s ústředním topením byl odvozen počet bytů s centrálním zásobováním teplem (včetně blokových kotelen a větších domovních kotelen). Naopak k počtu lokálně vytápěných bytů (kamna a etážové topení) byl připočten počet bytů s malými domovními kotelny.

Pro výpočet roku 1998 (topné sezóny 1997/98) byly v případě bytů lokálně vytápěných plynem a elektřinou použity přímo údaje o počtu bytů (odběratelů) získaných od dodavatelských akciových společností. Obdobně byl použit přímo počet centrálně vytápěných bytů u měst a obcí, pro která byly získány údaje od dodavatelů tepla, v ostatních případech byly použity počty bytů z r. 1997. Počet bytů lokálně vytápěných pevnými palivy byl následně získán odečtením všech těchto přímo získaných údajů od výchozího celkového počtu vytápěných bytů.

Výpočet spotřeby paliv a produkovaného tepla na jednu bytovou jednotku

Průměrná roční spotřeba paliva na bytovou jednotku ($\bar{V}_{\text{pal}}^{\text{byt}}$) byla vypočítána pro tuhá paliva na základě odvozené roční potřeby tepla na byt v dané obci (Q_{rok}), průměrné výhřevnosti paliva (Q_i^f) pro jednotlivé kraje (viz tab. č. 11) a průměrné účinnosti kotle (η_k) (viz tab. č. 12) podle vzorce:

$$\bar{V}_{\text{pal}}^{\text{byt}} = \frac{Q_{\text{rok}}}{Q_i^f \cdot \eta_k} \quad [\text{t/r}]. \quad (3)$$

U zemního plynu byla vzata konkrétní průměrná spotřeba v pásmu spotřeby nad $900 \text{ m}^3_{\text{N}}$, zmenšená o $300 \text{ m}^3_{\text{N}}$ na vaření a ohřev TUV.

Kraj	Hnědé uhlí tříděné			Černé uhlí tříděné			Koks		
	Q _i ^r	A ^r	S ^r	Q _i ^r	A ^r	S ^r	Q _i ^r	A ^r	S ^r
	MJ/kg	% _{hm.}	% _{hm.}	MJ/kg	% _{hm.}	% _{hm.}	MJ/kg	% _{hm.}	% _{hm.}
Praha	17,96	8,63	0,66	23,61	11,14	0,51	27,65	6,53	0,45
Středočeský	18,02	8,37	0,87	23,64	11,12	0,51	27,79	6,31	0,45
Jihočeský	17,96	8,18	0,84	25,56	9,37	0,50	27,66	6,51	0,45
Západočeský	17,52	9,15	0,70	27,81	7,23	0,48	27,67	6,50	0,45
Severočeský	18,00	8,62	0,92	30,49	4,50	0,46	27,66	6,51	0,45
Východočeský	17,85	8,55	0,86	28,25	6,79	0,48	27,66	6,50	0,45
Jihomoravský	17,94	9,20	0,94	28,35	6,81	0,48	27,92	6,09	0,45
Severomoravský	17,76	7,45	0,72	26,62	8,73	0,48	27,92	6,08	0,45
Průměr ČR	17,88	8,52	0,81	26,79	8,21	0,49	27,74	6,38	0,45

TAB. Č. 11 PRŮMĚRNÉ JAKOSTNÍ PARAMETRY PEVNÝCH PALIV PRO JEDNOTLIVÉ KRAJE V ROCE 1998 [34]

Palivo	Účinnost kotle
	%
Hnědé uhlí tříděné	72
Černé uhlí tříděné	76
Koks	80
Zemní plyn	91,5

TAB. Č. 12 PRŮMĚRNÉ ÚČINNOSTI KOTLŮ DLE SPALOVANÝCH PALIV

Podíl jednotlivých druhů pevných paliv

Podíl jednotlivých druhů pevných paliv (hnědé uhlí včetně lignitu, černého uhlí včetně proplásku a koksu) byl odvozen z přehledu o dodávkách a jakosti tuhých paliv na území ČR v roce 1997 [34], který byl vypracován pro účely registru emisních zdrojů. Podíly pevných paliv pro jednotlivé kraje jako podíl jejich produkovaného tepla jsou uvedeny v tab. č. 13. Z uvedených hodnot je zřejmé, že ve většině krajů při vytápění domácností výrazně převládá hnědé uhlí, v Praze a Jihomoravském kraji je významnější podíl koksu a zcela specifický je Severomoravský kraj s převahou koksu a černého uhlí.

Kraj	Hnědé uhlí tříděné	Černé uhlí tříděné	Koks
	%		
Praha	69,9	2,9	27,2
Středočeský	85,8	4,7	9,5
Jihočeský	88,1	6,0	6,0
Západočeský	87,9	1,5	10,6
Severočeský	94,3	0,6	5,1
Východočeský	91,9	2,6	5,5
Jihomoravský	75,0	7,0	18,0
Severomoravský	25,8	33,7	40,5

TAB. Č. 13 PODÍL JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ PEVNÝCH PALIV V JEDNOTLIVÝCH KRAJÍCH ZA TOPNOU SEZÓNU 97/98

Roční spotřeba paliv v obci

Roční spotřeba paliv v obci byla vypočtena jako součin počtu bytů vytápěných daným typem paliva a průměrné roční spotřeby paliva na byt ($\bar{V}_{\text{pal}}^{\text{byt}}$), v případě pevných paliv navíc ještě násobeno podílem daného druhu pevného paliva.

Množství produkovaného tepla pro jednotlivá paliva

Množství produkovaného tepla za rok bylo kalkulováno pro každé palivo na základě jeho vypočítané roční spotřeby, průměrné výhřevnosti a průměrné účinnosti topeniště.

Výpočet emisí ze spalování paliv

Pro každé palivo bylo vypočítáno množství pěti základních znečišťujících látek (TZL, SO₂, NO_x, CO, C_xH_y) na základě emisních faktorů podle vyhlášky [27] pro nejnižší tepelný výkon topenišť a pro pevný rošt v případě pevných paliv a průměrných jakostních parametrů pevných paliv pro jednotlivé kraje (viz tab. č. 11). Navíc byla vypočítána emise CO₂ na základě emisních faktorů dle [25]. Emisní faktory použité pro výpočet jsou zobrazeny v tab. č. 14.

Druh paliva	TZL	SO ₂	NO _x	CO	C _x H _y	CO ₂
	kg/t _{spáleného pevného paliva} nebo kg/(10 ⁶ m ³ _{spáleného plynu})					
Hnědé uhlí tříděné	1*A ^r	19*S ^r	3	45	10	1 450
Černé uhlí tříděné	1*A ^r	19*S ^r	1,5	45	10	2 500
Koks	1*A ^r	19*S ^r	1,5	45	10	3 169
Zemní plyn	20	2,0*S _{plyn} (9,6)	1 600	320	128	1 987 000

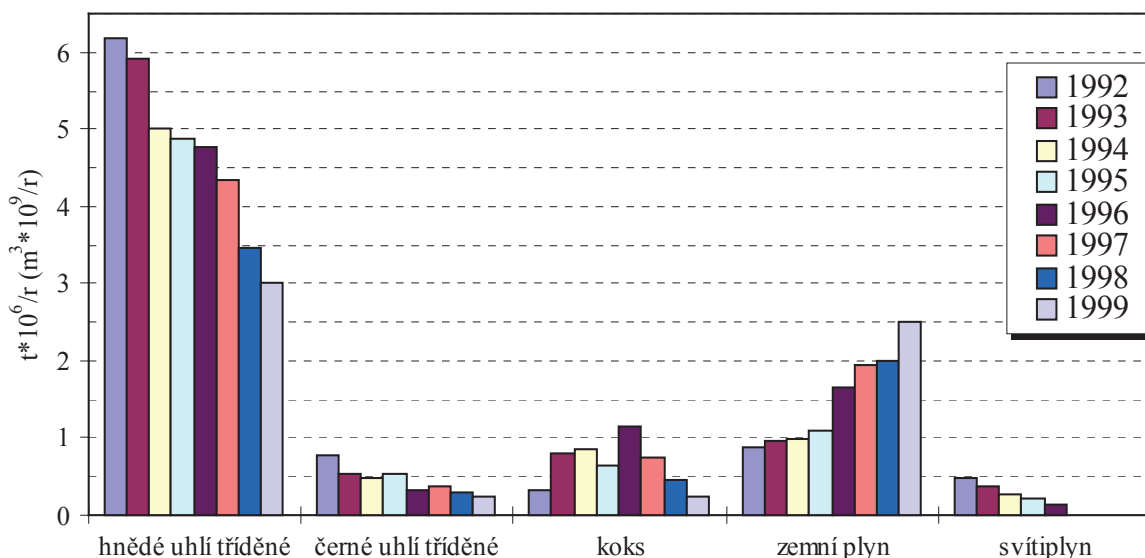
Poznámka: Pokud není znám obsah síry v palivu, použije se číslo v závorkách

TAB. Č. 14 EMISNÍ FAKTORY PRO MALÉ ZDROJE ZNEČIŠTĚNÍ

5.2. Výsledky emisní bilance malých zdrojů znečišťování

5.2.1. Spotřeba paliv pro REZZO3

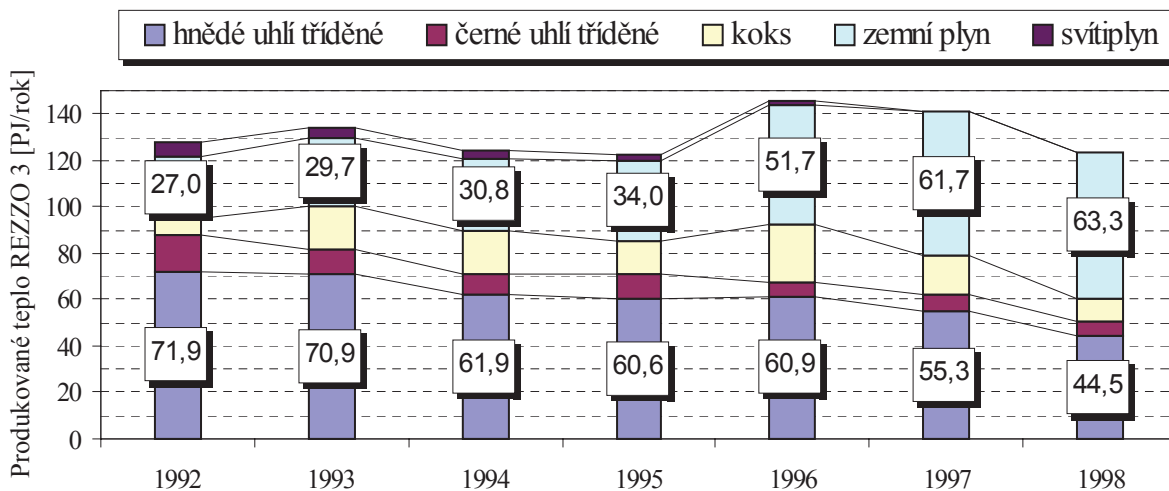
Dle výše uvedeného postupu byly vypočteny spotřeby paliv, které byly spáleny v malých zdrojích znečišťování v topných sezónách 1991/92 až 1998/99 (viz graf č. 3). Z průběhů je zřejmý značný pokles tuhých paliv na úkor zemního plynu. Spotřeba hnědého uhlí klesla cca na polovinu, spotřeba černého uhlí klesla cca na třetinu, spotřeba koksu klesla cca o čtvrtinu a spotřeba zemního plynu vzrostla cca dvakrát. Jednou z hlavních příčin způsobujících změnu skladby paliva po sametové revoluci byla dotační politika Státního fondu životního prostředí.



GRAF Č. 3 SPOTŘEBA JEDNOTLIVÝCH PALIV ZDROJŮ REZZO3 (1992-1999)

5.2.2. Množství produkovaného tepla

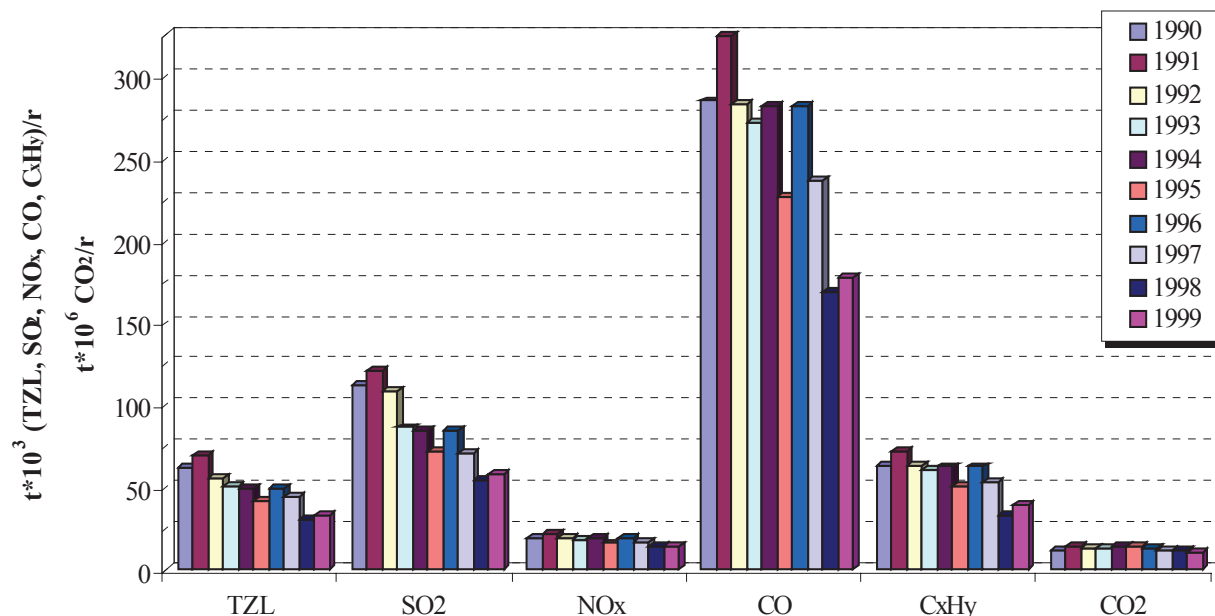
Vývoj produkovaného tepla v kotlích malých výkonů z jednotlivých paliv je uveden jako graf č. 4. Je zde zřejmý jednoznačný posun k zemnímu plynu na úkor tuhých paliv. V roce 1992 byla produkce tepla v malých zdrojích pokryta cca ze tří čtvrtin z tuhých paliv. Naproti tomu v roce 1998 byl podíl tepla z tuhých paliv jen cca polovina.



GRAF Č. 4 MNOŽSTVÍ PRODUKOVANÉHO TEPLA REZZO3 (1992-1998)

5.2.3. Množství emisí

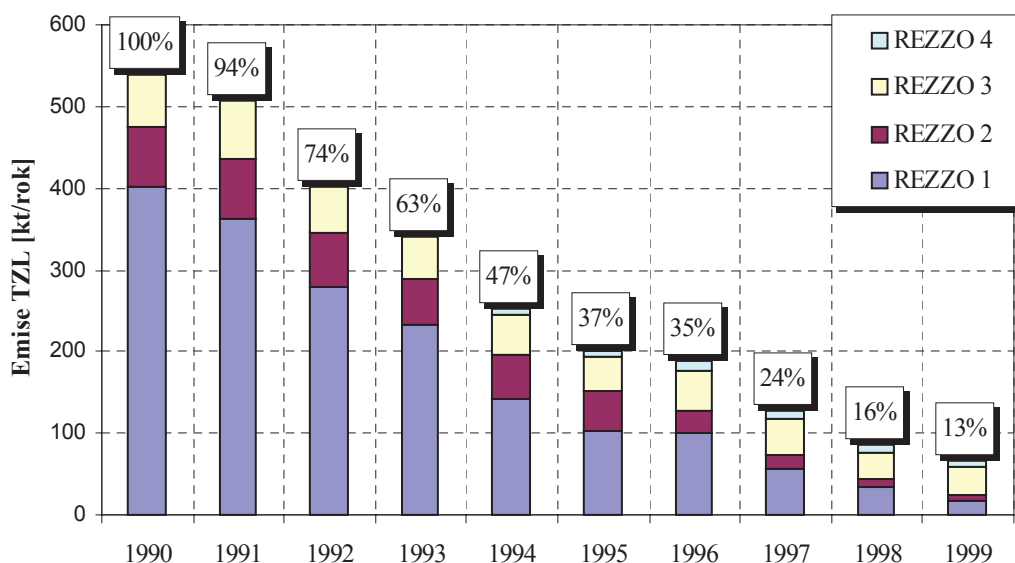
Vývoj vypočtené hodnoty emisí produkovaných spalováním fosilních paliv v malých zdrojích znečišťování od roku 1990 do roku 1999 pro jednotlivé znečišťující látky je uveden jako graf č. 5. Celkové množství emisí TZL a SO₂ kleslo za toto období cca na polovinu. Množství emisí CO a C_xH_y kleslo cca o 40 %. Emise NO_x klesly cca o 20 %. Celkové množství emisí CO₂ kleslo cca o 25 %.



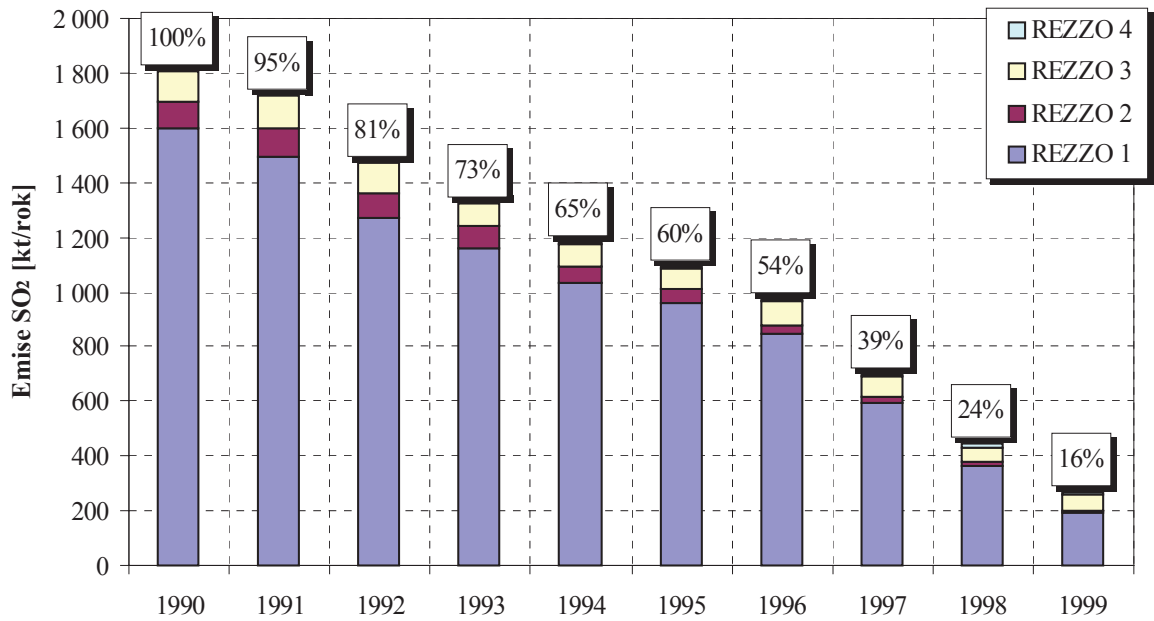
GRAF Č. 5 MNOŽSTVÍ PRODUKOVANÝCH EMISÍ REZZO3 (1990-1999)

5.3. Srovnání emisí všech kategorií REZZO

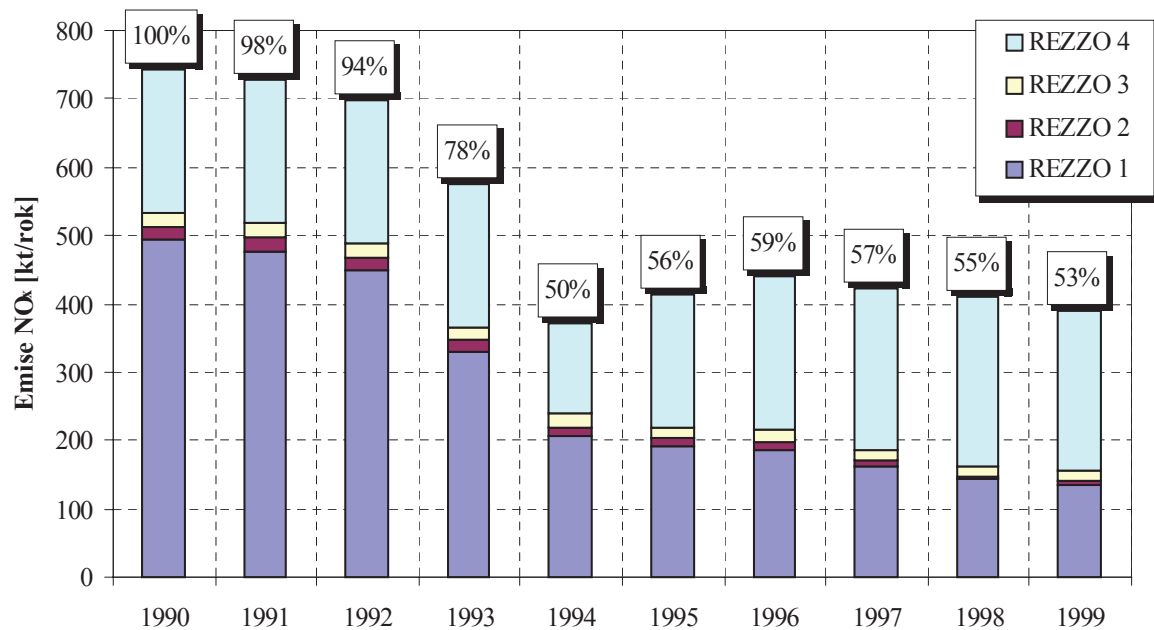
Pro zhodnocení vývoje, ale také závažnosti (z pohledu množství) emisí z malých zdrojů spalování v porovnání s celkovými emisemi vznikajícími při spalování fosilních paliv v ČR jsou níže uvedeny výsledky bilancí emisí pro všechny kategorie REZZO (viz graf č. 6 až graf č. 10). Z grafů je zřejmý jednoznačný trend poklesu celkových emisí vznikajících při spalování paliv. Velký rozdíl hodnot množství emisí za rok 1995 v porovnání s emisemi za rok 1994 je hlavně způsoben změnou metodiky stanovení emisí z mobilních zdrojů (REZZO4). Zpracovatel emisní bilance (Centrum dopravního výzkumu Brno) v roce 1995 zavedl úplnější systém údajů.



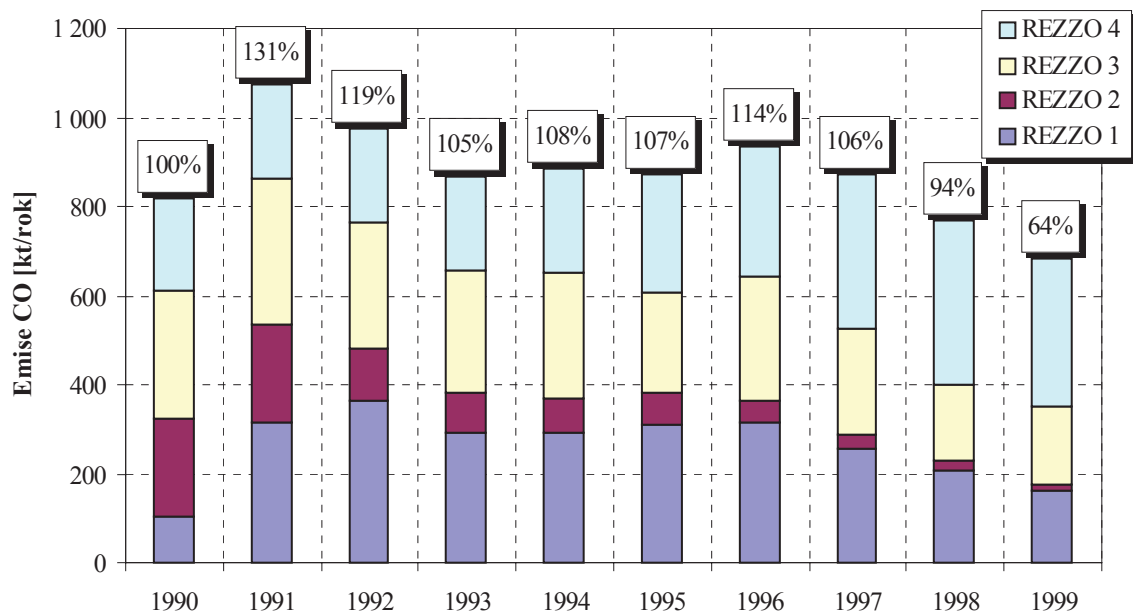
GRAF Č. 6 PODÍL JEDNOTLIVÝCH KATEGORIÍ REZZO NA CELKOVÝCH EMISÍCH TZL V ČR A VÝVOJ EMISÍ V LETECH 1990-1999 V % ROKU 1990



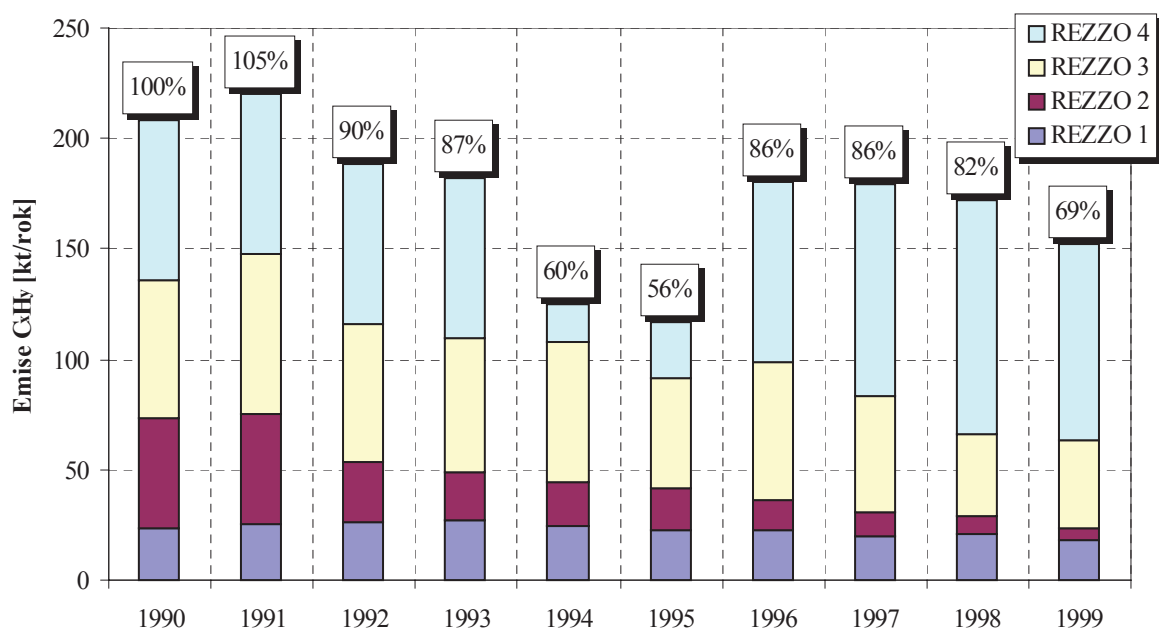
GRAF Č. 7 PODÍL JEDNOTLIVÝCH KATEGORIÍ REZZO NA CELKOVÝCH EMISÍCH SO₂ V ČR A VÝVOJ EMISÍ V LETECH 1990+1999 V % ROKU 1990



GRAF Č. 8 PODÍL JEDNOTLIVÝCH KATEGORIÍ REZZO NA CELKOVÝCH EMISÍCH NO_x V ČR A VÝVOJ EMISÍ V LETECH 1990+1999 V % ROKU 1990



GRAF Č. 9 PODÍL JEDNOTLIVÝCH KATEGORIÍ REZZO NA CELKOVÝCH EMISÍCH CO V ČR A VÝVOJ EMISÍ V LETECH 1990-1999 V % ROKU 1990



GRAF Č. 10 PODÍL JEDNOTLIVÝCH KATEGORIÍ REZZO NA CELKOVÝCH EMISÍCH C_xH_y V ČR A VÝVOJ EMISÍ V LETECH 1990-1998 V % ROKU 1990

		1 991		1 999			
		kt/rok	%	kt/rok	%	kt/rok	%
TZL	REZZO 1	362	71,4	16	24,0	16	27,8
	REZZO 2	75	14,8	9	12,9	9	14,9
	REZZO 3	70	13,8	33	49,4	33	57,3
	REZZO 4			9	13,8		
	suma	506	100	67	100	58	100
SO ₂	REZZO 1	1 496	87,0	193	71,9	193	73,9
	REZZO 2	103	6,0	10	3,8	10	3,9
	REZZO 3	121	7,1	58	21,6	58	22,2
	REZZO 4			7	2,7		
	suma	1 720	100	269	100	261	100
NO _x	REZZO 1	477	65,5	135	34,7	135	87,0
	REZZO 2	19	2,6	5	1,4	5	3,4
	REZZO 3	22	3,0	15	3,8	15	9,6
	REZZO 4	210	28,9	234	60,1		
	suma	728	100	389	100	155	100
CO	REZZO 1	316	29,5	160	23,3	160	45,4
	REZZO 2	220	20,5	15	2,2	15	4,3
	REZZO 3	326	30,4	177	25,9	177	50,3
	REZZO 4	210	19,6	333	48,6		
	suma	1 072	100	685	100	352	100
C _x H _y	REZZO 1	26	11,7	18	11,6	18	28,1
	REZZO 2	49	22,4	6	3,9	6	9,3
	REZZO 3	72	32,9	39	25,9	39	62,6
	REZZO 4	72	32,9	89	58,6		
	suma	220	100	152	100	63	100

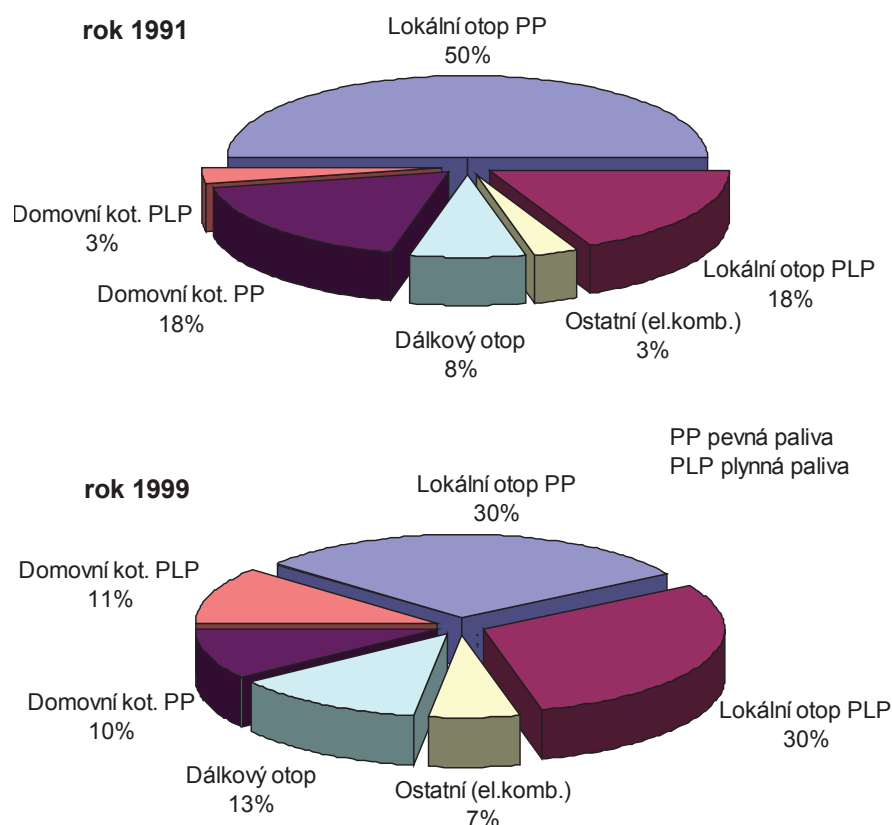
TAB. Č. 15 PODÍL EMISÍ Z MALÝCH ZDROJŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ NA CELKOVÝCH EMISÍCH REZZO A NA EMISÍCH ZE STACIONÁRNÍCH ZDROJŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ

V tab. č. 15 jsou uvedeny hodnoty celkových emisí REZZO pro rok 1991 a 1999. Značný pokles celkových emisí TZL a SO₂ v porovnání let 1991 a 1999 byl způsoben novými legislativními poměry v ČR [41], v důsledku kterých došlo k odprášení a odsíření všech velkých zdrojů znečišťování, nebo k jejich odstavení. Z uvedených hodnot je také zřejmý rostoucí problém emisí z automobilového průmyslu (REZZO4). Přibližně 60 % z celkových emisí NO_x a C_xH_y vzniká právě v mobilních zdrojích znečištění. U emisí CO se mobilní zdroje podílejí cca 49 %. Pro možnost zhodnocení podílu emisí z malých zdrojů znečišťování jsou v tab. č. 15 uvedeny podíly emisí REZZO3 na celkové produkci všech zdrojů (celé REZZO), ale také podíl na produkci pouze stacionárních zdrojů znečišťování, tedy bez mobilních zdrojů (REZZO4). Emise TZL a C_xH_y z malých zdrojů tvoří cca 60 % z celkových emisí ze stacionárních zdrojů znečištění. U emisí CO je to cca 50 %, u SO₂ cca 20 % a nejmenší podíl tvoří emise NO_x cca 10 %. Srovnáním celkových emisí vznikajících ze spalování fosilních paliv ve zdrojích znečištění ovzduší dojdeme k důležitému poznání, že emise z malých zdrojů znečištění tvoří podstatnou část celkových emisí. Z pohledu rozptylu

a charakteristické výšky komínů se výše uvedené konstatování jen umocňuje (v Evropě známo jako „nízké emise“).

5.4. Skladba vytápění bytů v ČR

Ze změny skladby vytápění bytů od roku 1991 do roku 1999 je zřejmý značný nárůst plyných paliv na úkor paliv pevných nejen v lokálním otopu, ale také u domovních kotlen. Dálkový otop stejně jako elektrické vytápění zaznamenal také nárůst, i když není tak výrazný jako plyná paliva. Pevná paliva ztratila své dominantní postavení z roku 1991, kdy představovala 68 procentní pokrytí potřeby malých zdrojů. V roce 1999 došlo k vyrovnání poměru mezi pevnými palivy a plynými palivy, což je z pohledu emisí jistě pozitivní jev. I přes výše řečené i nadále představují pevná paliva významný podíl ve skladbě vytápění bytů (viz graf č. 11).



GRAF Č. 11 ZMĚNA SKLADBY VYTÁPĚNÍ BYTŮ V ROCE 1999 VE SROVNÁNÍ S ROKEM 1991

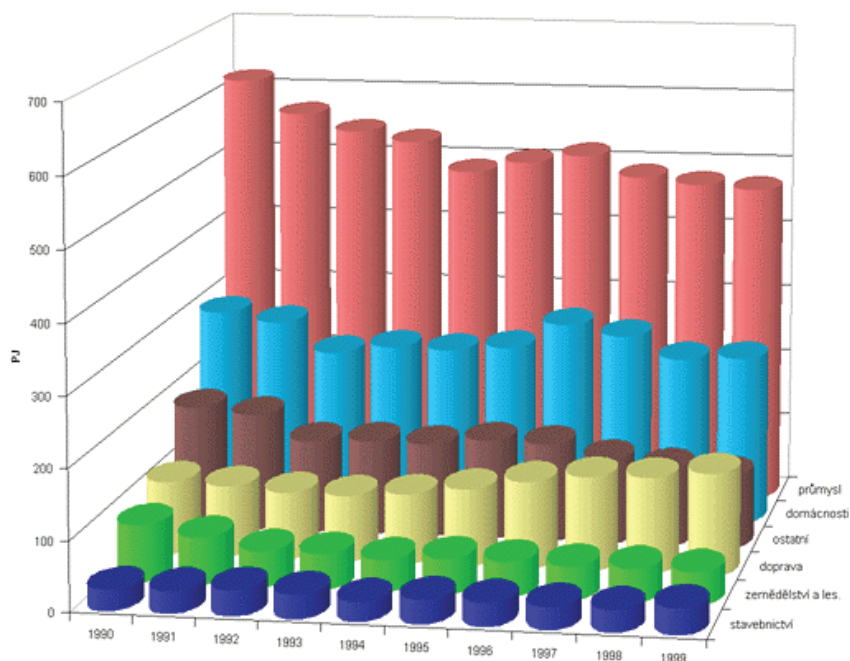
5.5. Statistiky mimo REZZO3

Další statistiky, které by systematicky (stejně jako REZZO3) sledovaly a bilancovaly emise z malých zdrojů znečišťování v ČR, nejsou. Jak je ovšem zřejmé z výše uvedené metodiky, důležitým ukazatelem pro výpočet množství emisí je spotřeba paliv a energie v domácnostech a tyto parametry se statisticky sledují a zjišťují.

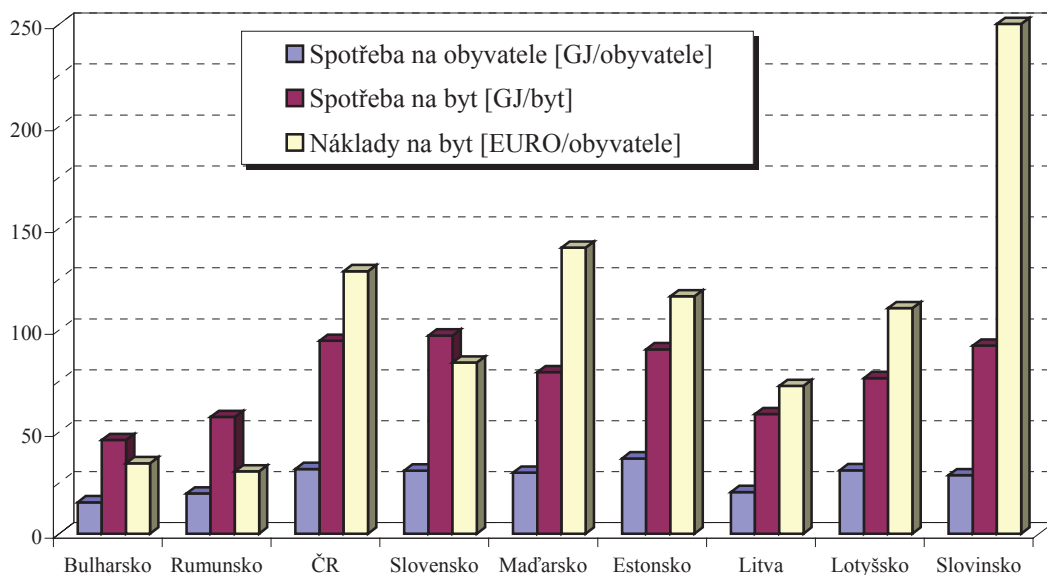
Údaje o rozdělení a konečné spotřebě (včetně spotřeby v domácnostech) jsou uvedeny v publikacích Energetické bilance ČR (viz graf č. 12), kterou vydává Český statistický úřad. Publikace obsahuje výsledky zpracování statistických výkazů (roční výkazy o zásobách paliv a spotřebě paliv a energie) za daný rok. Pro elektrickou energii, zemní plyn a teplo jsou známy údaje dosti přesně. Pro další paliva se vychází především z provázanosti jednotlivých výkazů, např. pro černé uhlí jsou na výkaze uvedeny jednak přímé dodávky producentů a dovozců mj. i pro domácnosti a mimo to množství prodané obchodním organizacím, které zase vyplňují výkaz, kde je opět uvedeno rozdělení mj. i pro domácnosti. Povinnost předkládat výkaz se vztahuje na jednotky s počtem zaměstnanců 20 a více [8].

Český statistický úřad se v roce 1994 připojil k projektu Evropské unie Eurostat/Phare „Harmonizace energetických statistik – fáze 2“, jehož součástí bylo provedení zjišťování spotřeby paliv a energie v domácnostech desíti zemí střední a východní Evropy. Tato etapa byla provedena formou výběrového zjišťování spotřeby paliv a energie 6000 domácností v roce 1997 a to za sledované období roku 1996 [9]. Jedním ze zajímavých výsledků je porovnání celkových ročních měrných spotřeb a nákladů, které je uvedeno jako graf č. 13.

Dle publikace průměrná měrná spotřeba energie na jeden byt pro ČR (93,6 GJ/byt a rok) je vypočtena z měrných spotřeb městských (80,9 GJ/byt a rok) a venkovských lokalit (126,9 GJ/byt a rok).



GRAF Č. 12 PRŮBĚH KONEČNÉ SPOTŘEBY PALIV A ENERGIE PODLE ODVĚTVÍ NÁRODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ (1990-1999)



GRAF Č. 13 SROVNÁNÍ MĚRNÉ SPOTŘEBY ENERGIE A NÁKLADŮ OBYVATELSTVA NA ENERGIÍ V ZEMÍCH BÝVALÉHO VÝCHODNÍHO BLOKU [9]

5.6. Shrnutí bilance emisí z malých zdrojů znečištění

Z porovnání hodnot jednotlivých statistických metod je patrný rozdíl výsledků, který ovšem není řádový a pro účely jejich použití přijatelný. Rozdíly jsou způsobeny nejistotou vstupních údajů a odlišností metodiky získávání údajů a jejich zpracování. Z pohledu vývoje však není tak podstatná správnost absolutní hodnoty, ale jsou důležitější trendy vývoje.

Z výsledných hodnot emisí za rok 1999 vyplývá, že emise TZL, CO a C_xH_y tvoří přibližně čtvrtinu emisí sledovaných v rámci REZZO (stacionární a mobilní). Pokud budeme porovnávat pouze stacionární zdroje znečištění, můžeme říci, že emise TZL a C_xH_y z malých zdrojů tvoří cca 60 % z celkových emisí ze stacionárních zdrojů znečištění. U emisí CO je to cca 50 %, u SO_2 cca 20 % a nejmenší podíl tvoří emise NO_x cca 10 %. Porovnání absolutních hodnot ročních produkcí emisí pro jednotlivé REZZO neposkytuje přesnou informaci o závažnosti postižení životního prostředí. Emise u REZZO3 jsou místem svého vypouštění do okolí zcela odlišné od emisí z větších zdrojů (nízko-úrovňové emise). Výška komínů u malých zdrojů se ve většině případů pohybuje v rozmezí 5÷12 m, zatímco výška komínů u velkých zdrojů je několikanásobně větší.

K posouzení území z hlediska imisní situace je nezbytná nejen bilance škodlivin, ale i podrobná znalost zákonitostí a lokálních podmínek pro přenos škodlivin, což je již nad rámec této práce. Zjednodušeně řečeno hodnocení rozptylu vychází z podmínek statické teorie turbulentní difuze a popisu náhodného pohybu částice ve vzduchu. Nejdůležitější, člověkem měnitelný parametr ovlivňující rozptyl škodlivin je výška zdroje. Obecně platí, že čím je vyšší

zdroj (komín), tím menší budou koncentrace imisí u zemského povrchu (v přízemní vrstvě) na závětrné straně (turbulentní difuze) [19].

Emise ze zdrojů malých výkonů představují v měřítku ČR závažný problém a vzhledem k pozoruhodným zásobám uhlí v ČR je žádoucí se zabývat vývojem moderních kotlů této výkonové úrovně.

6. Palivo

Z obecného pohledu lze za palivo pokládat každou látku, při jejíž oxidaci se uvolňuje teplo a která je dostupná v pozoruhodném množství. Pokud se zjednoduší definice paliva na palivo využitelné v ohništích kotlů, pak jsou paliva nejčastěji dělena dle kritérií uvedených v tab. č. 16.

Dělení paliv dle:	
stáří	fosilní (vzniklá ve vzdálenějších geologických obdobích)
	recentní (vznikající v současné době, např. dřevo)
skupenství	tuhá
	kapalná
	plynná
původu	přírodní (např. paliva fosilní, recentní)
	umělá (jako produkt průmyslové technologie, např. svítiplyn)

TAB. Č. 16 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PALIV

Tuhá fosilní paliva

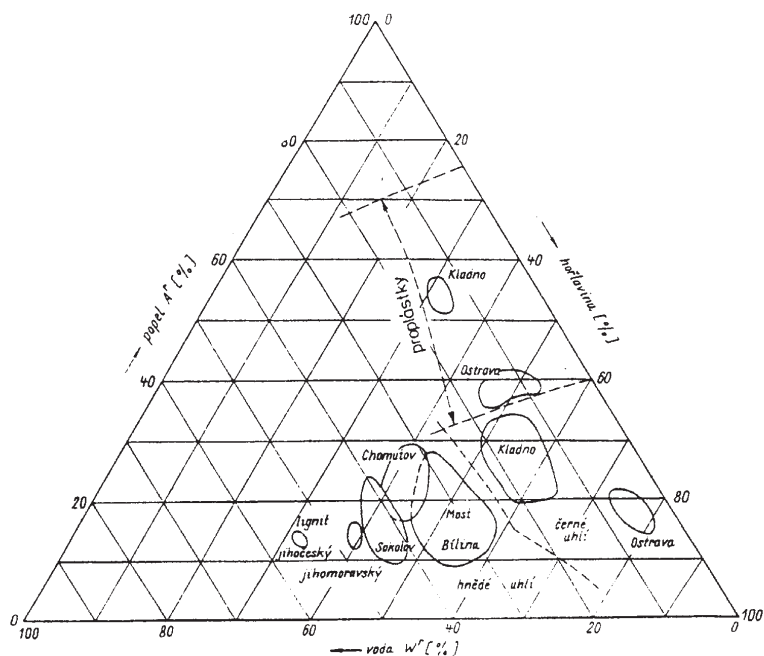
Tuhá fosilní paliva rostlinného původu se souhrnně označují jako uhlí. Jednotlivé typy uhlí však mají značně rozdílné fyzikální i chemické vlastnosti. Existuje řada hypotéz o vzniku uhlí a také i různé klasifikační systémy a způsoby značení, jejichž společným cílem je vnést určitý řád a zákonnost do klasifikace jeho jednotlivých druhů. Klasifikace černých a hnědých uhlí těžených v ČR je uvedena v příslušných normách [12].

Organická složka uhlí sestává z pěti prvků (uhlík, vodík, kyslík, dusík a síra), z nichž rozhodující vliv na spalovací proces mají první tři, zatímco zbývající dva podstatnou měrou určují množství škodlivin (NO_x a SO_2), vznikajících při spalování. Z hlediska energetické hodnoty jsou aktivními (tj. hořlavými) složkami uhlík, vodík a část síry. Jednotlivé druhy uhlí se liší obsahem nejdůležitější aktivní složky – uhlíku. Vedle aktivních složek obsahuje uhlí složky pasivní (nehořlavé), k nimž patří dusík, kyslík, popelovina a voda. Odtud vyplývá dělení uhlí na hořlavinu, popelovinu a vodu, tzv. hrubý rozbor (viz obr. č. 3).

uhlí v původním stavu (surové, těžené)					
přítěž (balast)			hořlavina U (uhelná hmota)		
voda veškerá W_t^r	popelovina M				
voda hrubá W_{ex}	zbylá W_h	sušina			
		popel A^r	ΔV	prchavá hořlavina	tuhý uhlík C_{fix}
				zdánlivá prchavá h. V	
		zdánlivá hořlavina			

OBR. Č. 3 SCHÉMA SLOŽENÍ UHLÍ

Kalorická hodnota uhlí je obsažena v hořlavině a závisí jen na jejím elementárním složení. Zatímco výhřevnost hořlaviny konkrétního druhu paliva v dané lokalitě má obvykle téměř konstantní hodnotu, je výhřevnost surového uhlí proměnná, což je způsobeno rozdílným obsahem pasivních složek (popeloviny a vody). Typické hodnoty obsahu hořlaviny, popela a vody pro jednotlivé druhy uhlí jsou zobrazeny jako graf č. 14.



GRAF Č. 14 HRUBÝ ROZBOR ČERNÝCH A HNĚDÝCH UHLÍ V ČR DLE PÁVNÍ [23]

Pro spalování uhlí v ohništích kotlů jsou důležité informace o jakosti uhlí. Jakost paliva je komplexní pojem, který nelze definovat jednou větou, nebo kvalitativně vyjádřit jedinou hodnotou. Je charakterizován řadou znaků nebo ukazatelů, vyjadřujících různé chemické a fyzikální vlastnosti paliva i jeho důležitých složek, především hořlaviny a popela. Znaky uhlí se vyjadřují buď v absolutních hodnotách, nebo pomocí relativních (porovnávacích) hodnot. Jakost uhlí (přesněji řečeno číselné hodnoty různých významných znaků jakosti uhlí) se během času mění působením různých vlivů, mj. postupem porubní fronty, změnou technologie dobývání, změnou způsobu třídění a úpravy těženého uhlí apod. V současné době se obvykle pokládají za potřebné znaky jakosti, které jsou uvedeny v tab. č. 17.

	Složení	Vlastnosti	
Surové uhlí	I obsah vody W_i^r	termochemické	I spalné teplo Q_s^r nebo výhřevnost Q_i^r
	I obsah popela A^r nebo A^d		III vzněcovací teplota
	II obsah prchavé hořlaviny V^{daf}	mechanické	II výbušnost II melitelnost
Hořlavina	IV obsah prchavé hořlaviny V^r	termochemické	I spalné teplo Q_s^{daf} popř. výhřevnost Q_i^{daf}
	IV neprchavý zbytek NV^{daf}		III spalné teplo Q_{sv} popř. výhřevnost Q_{iv} prchavé hořlaviny
	IV obsah dehtu T^{daf}		II (III) reakčně kinetické charakteristiky aktivační energie E rychlost hoření k
	II (III) petrografický rozbor		
Popeloviny (popel)	II (III) chemický rozbor	termofyzické	II charakteristické teploty $t_{A, B, C}$
	IV (III) mineralogický rozbor	mechanické	IV (III) viskozita III abrazivost
	II popelový faktor	elektrické	III vodivost nebo odpor

Poznámka: Důležitost znaků jakosti:
 I Velmi významné, stanoví se normovaným způsobem ve všech případech
 II Významné až velmi významné, stanovení je příliš nákladné nebo pracné, stanoví se jen v některých případech
 III Významné, stanovení je mimořádně nákladné nebo pracné a nebo pro ně nejsou podmínky (výjimečně)
 IV Méně významné, doplňují nebo potvrzují informace jiného znaku či ukazatele, stanovení není nutné

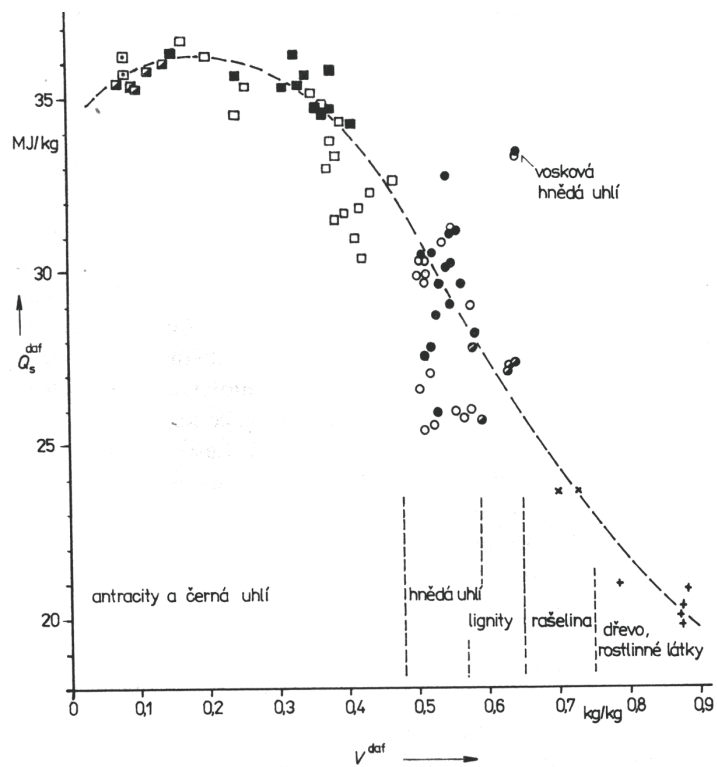
TAB. Č. 17 ZNAKY JAKOSTI TUHÝCH PALIV

Důležitým jakostním parametrem z pohledu konstrukce kotle (objem spalovací komory) je obsah prchavé hořlaviny (stanovení dle [11]). Mezi obsahem prchavé hořlaviny a spalným teplem hořlaviny existuje výrazná korelace (viz graf č. 15). Na rozdíl od černých uhlí, kde V^{daf} dovoluje poměrně jasně rozlišit jednotlivé typy nebo původ uhlí, pro klasifikaci hnědých uhlí je tento znak nevýznamný [22]. Významnější však je tato korelace tím, že poměrně spolehlivě vyznačuje geologické stáří paliva, popřípadě i její reaktivitu a že může celkem uspokojivě sloužit při základních stechiometrických výpočtech, není-li k dispozici prvkové složení hořlaviny. Chemické složení prchavé hořlaviny nelze jednoznačně definovat.

V některých případech nestačí pro posouzení vhodnosti paliva základní charakteristiky a je nutné se zaměřit také na detailnější charakteristiky paliva. Pojem koksovací vlastnosti uhlí rozumíme ty vlastnosti, které mají při karbonizačním koksovacím procesu vliv na vlastnosti koksu. Charakter koksu není zapříčiněn pouze spékavostí výchozího uhlí, je pouze jednou z komponent majících vliv na kvalitu koksu. Nejdůležitější koksovací vlastnosti uhlí jsou:

- spékavost
- plasticita
- puchnutí
- rozpínavost
- smršťování

U kontinuální dopravy paliva, která se používá u moderních kotlů malých výkonů hrají významnou roli první tři z uvedených vlastností černého Zbývající dvě charakteristiky se soustředí na karbonizaci uhlí v uzavřeném prostoru (koksárenskou pec) a nejsou tudíž v ohledu využití uhlí pro otopové účely tak významným parametrem.



GRAF Č. 15 ZÁVISLOST SPALNÉHO TEPLA HOŘLAVINY NA OBSAHU PRCHAVÉ HOŘLAVINY [35]

7. Spalování tuhých paliv

Podstatou spalovacího procesu je hoření paliva. Hoření je fyzikálně chemický děj slučování hořlaviny s oxidantem, přičemž probíhající chemická reakce je doprovázena (za světelného efektu) vývinem tepla (exotermní reakce), chemicky vázaného v palivu. Touto definicí je specifikován proces hoření v obvyklém pojetí, kdy je důkaz kladen na světelný efekt procesu. Tento světelný efekt je důsledkem skutečnosti, že teplota produktů hoření dosáhla oblasti viditelného spektra. Jinak řečeno, spalovací reakce probíhá při každé reálné teplotě, která určuje rychlost této reakce a o hoření se mluví, projeví-li se světelný efekt jako důsledek dostatečně vysoké teploty produktů spalování [30].

Hoření může začít samovolně samovznícením, nebo působením vnějšího tepelného impulsu zápalu. Má charakter řetězového děje, při němž část spalného tepla poslouží jako iniciátor zapálení nové směsi vstupující do reakce. Může trvat až do vyčerpání zásoby hořlavé směsi, nebo jedné její složky, popř. do okamžiku, kdy intenzivním odvodem tepla přerušíme řetězovou reakci tím, že teplota směsi klesne pod zápalnou teplotu.

Hoření je možné pouze mezi elementárními složkami hořlaviny (C,H,S) v atomárním stavu a oxidantem (nejčastěji O_2 ze vzduchu) a to proto, že si atomy hořlaviny snaží doplnit své neúplné vnější elektronové sféry na plný počet elektronů. Tímto atomárně molekulárním (chemickým) pochodem se rozmísťují elektrony energeticky výhodněji, přičemž se některé z nich stávají v nově vzniklé molekule společnými pro oba prvky, které se zúčastní spalování. Např. při reakci hoření mezi atomem uhlíku C (má šest elektronů rozděleno tak, že dva jsou na 1. sféře a čtyři na 2. sféře, takže 2. sféra je neúplná s deficitem čtyř elektronů) a molekulou kyslíku O_2 (má v atomu osm elektronů a to dva na 1. sféře, tj. deficit dva elektrony na 2. sféře) se vytvoří molekula CO_2 , u níž je celkový počet čtyři plus dvakrát šest, tj. šestnáct vnějších elektronů umístěno tak, že všechny atomy O i C v molekule CO_2 mají plný počet elektronů na 2. sféře (tj. osm). Z celkových šestnácti elektronů na vnějších sférách je osm společných. Podobně je tomu u hoření vodíku H na H_2O a síry S na SO_2 .

Snižováním energetické hladiny elektronů při spalování hořlaviny znamená úsporu energie, která se projeví uvolněním tepla. Jeho množství je měřítkem intenzity hoření.

Teorie chemismu spalovacích reakcí se dělí na dvě části:

- statika spalování
- kinetika spalování

7.1. Statika spalování

Statika spalování hodnotí kvantitativní stránku reakce bez ohledu na dobu jejího trvání. Vychází s termochemických rovnic reakcí za slučovacích poměrů, kdy neexistuje přebytek ani nedostatek reagentů z tzv. stechiometrických poměrů. Energetickou bilanci spalovací reakce lze vyjádřit na základě představy, že se spalováním se snižuje energetický potenciál reagentů a jeho úbytek ve formě uvolněné tepelné energie přejímají produkty hoření.

Při spalovacím procesu probíhají složité fyzikální a chemické děje, které na sebe navzájem navazují, kombinují se a vzájemně se ovlivňují. K chemickým dějům patří především oxidační a redukční reakce, fyzikální pochody představují transportní děje (přenosy hybnosti), hmoty a energie. Numerické řešení spalovacích procesů vyžaduje použití termochemických rovnic. Jsou to chemické rovnice, udávající navíc hodnotu uvolněného nebo spotřebovaného tepla (tepelný efekt reakce). V prvním případě se jedná o reakce exotermické, ve druhém o reakce endotermické. Příkladem exotermických reakcí může být spalování C, H₂, příkladem endotermických reakcí disociace (rozklad) CO₂, H₂O při vysokých teplotách. Protože většina spalovacích reakcí probíhá izobaricky, je obvykle tepelný efekt reakce určen rozdílem entalpií.

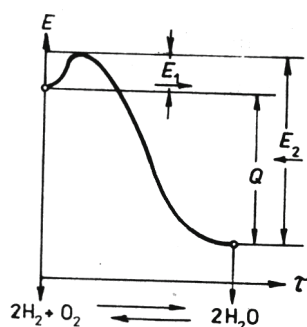
Z tabelových hodnot standardních slučovacích nebo spalných tepel jednotlivých sloučenin je možno vypočítat reakční teplo jakékoliv reakce, které je dáno:

- součtem slučovacích tepel reakčních produktů zmenšeným o součet slučovacích tepel výchozích látek,
- součtem spalných tepel výchozích látek zmenšeným o součet spalných tepel produktů reakce [37].

Spalování tuhých paliv se obvykle interpretuje jako prostá oxidace prvků tvořících hořlavinu a popisuje se jednoduchými chemickými rovnicemi s příslušným tepelným zabarvením (např. soustava 2H₂ + O₂ při exotermické reakci vydává teplo do okolí, tepelné zabarvení je tedy záporné a energetický potenciál po reakci se sníží viz graf č. 16) reakce, např.:



Ve skutečnosti však spalování neprobíhá jako přímá oxidace podle výše uvedených rovnic, nýbrž jako řetězová reakce, po etapách. K zahájení této reakce je potřebná určitá aktivační energie a v některých případech také přítomnost iniciačních (aktivních) molekul.



GRAF Č. 16 ENERGETICKÝ POTENCIÁL PŘI REAKCÍCH VODÍK/KYSLÍK

Pro tepelnou bilanci spalovacího procesu je významný Hessův zákon, který říká, že tepelný efekt reakce nezávisí na cestě (průběh řetězové reakce), kterou reakce probíhá ke konečnému produktu, nýbrž jen na počátečním a konečném stavu soustavy [30].

Základními údaji pro navrhování spalovacího zařízení i výhřevných ploch kotle jsou:

- spotřeba spalovacího vzduchu
- množství vzniklých spalin a jejich teplota

Určují se buď ze stechiometrických spalovacích rovnic hořlavých složek paliva, nebo přibližně z empirických závislostí pomocí výhřevnosti.

7.2. Kinetika spalování

Spalování v průmyslových spalovacích zařízeních (organizované a řízené hoření paliva) se skládá z řady fyzikálních dějů vzájemně se prolínajících nebo na sebe navazujících, tj. probíhajících v čase paralelně nebo v sérii. Jestliže z celkové doby hoření (t_c):

$$t_c = t_f + t_{ch} \quad [s] \quad (9)$$

je doba potřebná k proběhnutí chemických reakcí (t_{ch}) podstatně delší než doba k proběhnutí dějů fyzikálního charakteru (t_f), jde o spalování kinetické. Opačný případ, kdy o rychlosti spalování budou rozhodovat děje fyzikální ($t_f > t_{ch}$), se nazývá spalování difúzní. Podle toho, jsou-li fáze paliva i okysličovadla shodné, hovoří se o spalování homogenním, jsou-li rozdílné o spalování heterogenním.

7.2.1. Kinetika spalovacích reakcí

Intenzita chemických reakcí při spalování je charakterizována rychlostí hoření, což je časová změna koncentrace složek hořlaviny ve výchozích látkách $-\frac{dC}{dt}$, nebo ve výsledných produktech $+\frac{dC}{dt}$. Například pro spalování m_1 molekul paliva A_1 s m_2 molekulami okysličovadla A_2 , při němž vzniká n_1 a n_2 molekul produktů B_1 a B_2 podle rovnice:



je rychlost reakce možno vztáhnout na hořlavinu

$$w_{A_1} = -\frac{dC_{A_1}}{dt} \quad [\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})] \quad (11)$$

nebo na konečný produkt B₁ či B₂,

$$w_{B_1} = +\frac{dC_{B_1}}{dt}, \quad \text{resp.} \quad w_{B_2} = +\frac{dC_{B_2}}{dt} \quad [\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]. \quad (12)$$

Reakční rychlosti definované jednotlivými složkami nejsou obecně stejné, ale jejich vztah lze vyjádřit poměrem počtu molekul v reakci

$$w_{A_1} = \frac{m_1}{m_2} \cdot w_{A_2} = \frac{m_1}{n_1} \cdot w_{B_1} = \frac{m_1}{n_2} \cdot w_{B_2} \quad [\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]. \quad (13)$$

Šipky u rovnice reakce naznačují, že reakce probíhá zleva doprava jako reakce přímá, nebo obráceně jako reakce opačná, zpětná. V této souvislosti se hovoří o reakcích zvratných a nezvratných. Nezvratná reakce probíhá v jednom směru až dokonce, tj. do úplného spotřebování reagentů. Tento průběh reakce je možný pouze tehdy, jsou-li produkty dostatečně rychle odváděny z reakční zóny. Z teoretického hlediska nezvratné reakce neexistují. Přítomnost navzájem reagujících produktů reakce v reakční zóně znamená existenci opačné reakce a otázkou je pouze to, zda je tato opačná reakce dostupnou technikou měřitelná, či nikoli.

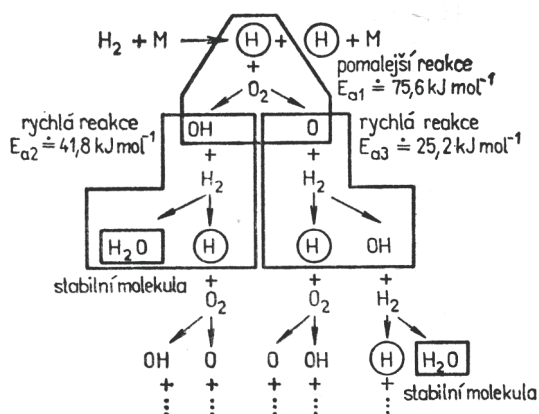
7.2.2. Vliv teploty na rychlost kinetického spalování

Elementární chemické děje při spalování mohou probíhat mezi molekulami paliva a okysličovadla jen tehdy, když přijdou tyto molekuly do vzájemného styku. Sřetenutí molekul je však jen podmínkou nutnou, nikoli postačující. Například podle kinetické teorie plynů činí počet srážek molekul H₂ a O₂ ve směsi při teplotě nula °C a tlaku 0,1 MPa celkem 10²⁹, a přesto při této teplotě exotermická reakce probíhá pomalu. Aby sřetnuvší se molekuly mohly vstoupit do reakce, musí mít podmínky k zrušení molekulové vazby. Minimální energie potřebná k přetvoření molekulárních vazeb paliva a okysličovadla má pro určitý druh reakce zcela určitou hodnotu a nazývá se aktivační energie.

Z Arrheniova zákona, který popisuje závislost reakční rychlosti izotermické reakce na teplotě plyne, že reakční rychlost při spalování prudce vzrůstá s teplotou směsi a klesá s růstem aktivační energie. Proto má pro urychlení a zkvalitnění spalování zejména méněhodnotných paliv velký význam ohřev spalovacího vzduchu.

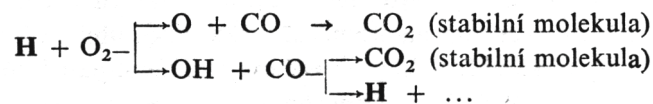
7.2.3. Řetězový mechanismus reakcí při spalování

Oxidace hořlavých složek paliva neprobíhá při spalování podle stechiometrických rovnic přímo, ale přes dílčí reakce, které potřebují k realizaci nižší aktivační energii a jsou pravděpodobnější. Např. při spalování vodíku následují za sebou reakce podle schématu viz obr. č. 4. Aktivními radikály, které jsou iniciátory reakce v celém souhrnu, jsou atomy vodíku **H**. Ty reagují s molekulou kyslíku pomalou reakcí o aktivační energii $E_{a1}=75,6$ kJ/mol na radikál **OH** a atomární kyslík **O**. Hydroxylový aniont **OH** reaguje rychlou reakcí o aktivační energii $E_{a2}=41,8$ kJ/mol s jednou molekulou vodíku a vzniká stabilní molekula vodní páry **H₂O** a další vodíkový aktivní radikál. Atom kyslíku reaguje s molekulou **H₂** jinou rychlou reakcí o aktivační energii $E_{a3}=25,2$ kJ/mol, při níž vzniká další **OH** radikál a aktivní radikál **H**. Tak vzniknou z jednoho radikálu **H** jedna stabilní molekula **H₂O** a dva aktivní radikály **H**, které jsou dalšími iniciátory a umožňují tím chod řetězové reakce spalování. Za teplot nižších než 500, resp. 600 °C má řetězová reakce charakter normálního hoření, avšak při vyšších teplotách přejde rychle v řetězovou reakci výbušného spalování.

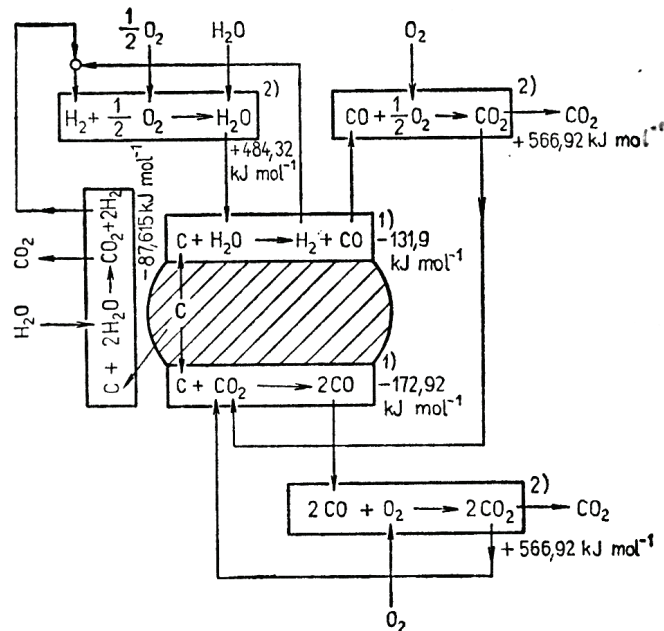


OBR. Č. 4 ŘETĚZOVÁ REAKCE PŘI SPALOVÁNÍ VODÍKU

Mechanismus oxidace atomárního uhlíku **C** v tuhých a kapalných palivech a oxidu uhelnatého **CO** je ještě složitější než u vodíku. Vysušená směs (bez **H₂O**) uhlíku, resp. **CO** s **O₂** nebo se suchým vzduchem do teploty cca 700 °C vůbec chemicky nereaguje a nad touto teplotou probíhá jen pomalá reakce **C** a **CO₂** na **CO** a mezi **CO** a $\frac{1}{2}$ **O₂** na **CO₂**, a to ještě jen u stěn spalovací komory. K rozběhnutí intenzivní reakce je třeba iniciátoru v podobě malého množství **H₂** nebo **H₂O**. Vzniká totiž aktivní radikál atomárního vodíku, který sice dočasně přejde na radikál **OH**, ale po zprostředkování reakce s **CO** se opět objeví, jak je vidět z následujícího schématu spalování **CO**:



Mechanismus dílčích reakcí při spalování atomárního uhlíku za přítomnosti vody je naznačen na obr. č. 5.



OBR. Č. 5 MODEL SPALOVÁNÍ UHLÍKU

7.2.4. Heterogenní spalování uhlovodíků spojené s tvorbou sazí

Stálé plyny, jako např. H_2 , CO a těžké uhlovodíky, zachovávají při zahřívání až do $1500\text{ }^\circ\text{C}$ svoji molekulární strukturu a teprve při vyšších teplotách se začínají rozpadat na atomární vodík, resp. uhlík a kyslík. Nestálé plyny jako např. lehké uhlovodíky se začnou rozkládat již při nízkých teplotách (CH_4 např. již při $300\text{ }^\circ\text{C}$) a to tím více, čím je teplota vyšší (při teplotě $900\text{ }^\circ\text{C}$ přechází CH_4 na C a H z 96,6 %). Tato pyrolýza probíhá všude uvnitř plamene, kde je málo O_2 , takže se v hořlavé směsi i v plameni objevují jemné tuhé částice velikosti 0,3 až $0,4\text{ }\mu\text{m}$, vzniklé shlukováním atomárního C (saze), které se popřípadě dále spojují na větší útvary.

7.2.5. Heterogenní spalování fosilních tuhých paliv

Přírodní tuhá paliva obsahují tuhou hořlavinu (tuhý uhlík), prchavou hořlavinu (nejrůznější druhy uhlovodíků), vodu a popelovinu. Při ohřívání se nejprve uvolňuje voda ve formě páry z povrchu a z pórů zrn a potom prchavá hořlavina v pořadí od lehkých k těžším uhlovodíkům, které se postupně po dosažení zápalné teploty vzněčují mimo povrch zrna v prostoru ohniště. Nakonec se vzněčuje zbylý tuhý uhlík, který se spaluje heterogenním

způsobem od povrchu a v pórech směrem k jádru, přičemž zrno postupně mění svůj rozměr i povrch, až zbude nakonec popelovina prošlá oxidačními, rozkladnými, popř. i tavicími pochody, obsahující popřípadě i zbytky tuhého uhlíku.

Spalování tuhých paliv je tedy velmi složitý proces, při němž probíhají dílčí děje jako sušení, odplyňování, rozklad plynů a popelovin, přenos tepla, vlastní hoření, transport kyslíku a spalin atd. a to jednak časově za sebou, jednak současně. Existence prchavé hořlaviny, vody a popelovin odlišuje zásadním způsobem chování fosilního paliva při spalování od chování čistého uhlíku. Prchavá hořlavina urychluje vzněcování, ale zvětšuje povrch a tloušťku fronty spalování (prostor vyplněný plamenem). Zatímco čistý uhlík, popř. koks začne hořet až při 700, resp. 800 °C, uhlí začne již při 300 až 350 °C.

Voda a popelovina rychlost spalování zpomalují nejen tím, že spotřebují určité teplo na ohřátí, odpaření, popř. rozklad, ale i tím, že brzdí přenos tepla a látkovou výměnu O₂ a spalin. Na intenzitu látkové výměny při spalování mají vliv především zrna pod 200 μm, protože rozhodují o velikosti měrného, a tím akčního povrchu pro odpařování, odplyňování, sdílení tepla i hoření. Menší zrna vytvářejí se vzduchem stálejší a homogennější směs, a proto se lépe zapalují a rychleji a dokonaleji hoří. U velkých zrn (nad 500 μm) začíná vzněcování prchavé hořlaviny později a to jen v blízkosti povrchu, protože intenzita látkové výměny se děje difúzí a tedy s rostoucím rozměrem zrna klesá.

Celková doba spalování tuhého paliva se skládá z doby ohřevu a odpařování z doby odplyňování a hoření prchavé hořlaviny a z doby hoření tuhé hořlaviny, ale nikoli jako prostý součet, protože jednotlivé fáze hoření se překrývají.

Podrobná znalost spalovacího procesu a pochopení jednotlivých závislostí je nutnou vstupní podmínkou k řešení současného stavu (modernizace a vývoj) v oblasti spalovacích zařízení.

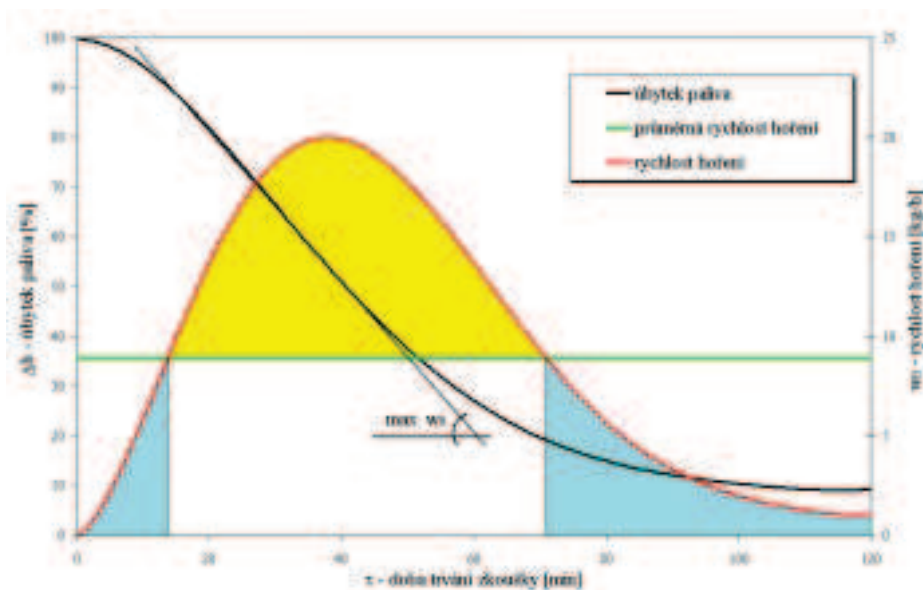
7.2.6. Analýza spalovacího procesu v ohništi s jednorázovým příkládáním

Z odborného hlediska je možné rozdělit užívané způsoby spalování v ohništích malých výkonů do dvou skupin. První z nich představují kotle s prohořivacím ohništěm, které se ručně jednorázově naplní uhlím, jež pak postupně odhořívá.

Celá dávka uhlí se spaluje najednou, byť pomalu a výsledkem je značné kolísání tepelného výkonu, účinnosti spalování i emisních koncentrací škodlivin ve spalinách. Tento spalovací princip je velmi jednoduchý, vyžaduje častou obsluhu a z pohledu 21. století kazí

pověst uhlí jako zdroje energie pro vytápění. Díky nízké ceně, velké univerzálnosti a minimálním nárokům na kvalitu a druh paliva však stále převládá v domácích uhelných kotelnách.

Zobecněné křivky, popisující průběh hoření jsou označeny jako graf č. 17 (odpovídají reálným provozním podmínkám zkoušky, tj. průměrnému výkonu 32 kW, spotřebě paliva, 9 kg/h a průměrnému součiniteli přebytku vzduchu 1,6).



GRAF Č. 17 ČASOVÝ PRŮBĚH SPALOVÁNÍ PŘILOŽENÉ DÁVKY UHLÍ

Klíčovým parametrem charakterizujícím průběh spalovacího procesu je v tomto případě úbytek paliva Δh – vyhoření. Jeho časový průběh lze získat kontinuálním vážením kotle v průběhu zkoušky (uvedená křivka Δh je korigována na obsah popela). Po přiložení paliva do roztopeného kotle začíná proces vzněcování a hoření a jak ukazuje průběh křivky Δh , až do zhruba čtyřicáté minuty rychlost úbytku paliva roste. Zde má křivka inflexní bod, za kterým proces zpomaluje. Prchavá hořlavina a drobnější frakce již vyhořely a dále již dohořívá koksový zbytek. Derivací křivky vyhoření paliva Δh lze snadno získat křivku rychlostí hoření w_H .

Rychlost hoření určuje okamžité množství uvolněného tepla, tedy tepelný výkon. Je zřejmé, že tepelný výkon od počátku cyklu roste, svého maxima dosahuje v oblasti inflexního bodu křivky vyhoření a poté již trvalé klesá. Celý tento proces je uživatelsky charakterizován průměrnou hodnotou tepelného výkonu nebo-li jak je uvedeno v grafu průměrnou rychlostí hoření.

Při běžném provozu je kotel nastaven na průměrné provozní hodnoty. Průměrnému tepelnému výkonu ohniště odpovídá průměrná rychlost hoření paliva, do ohniště je přiváděno tomu odpovídající průměrné množství spalovacího vzduchu stanovené tak, aby byl průměrný součinitel přebytku vzduchu optimální. Všechny tyto průměrné hodnoty jsou určeny z doby trvání jednoho cyklu, tj. jednoho přiložení nového paliva. Dodávka spalovacího vzduchu do ohniště je však konstantní a odpovídá střední rychlosti hoření. Protože je skutečný průběh spalovacího procesu proměnlivý, nalezneme zde vždy dvě oblasti, lišící se relativním množstvím vzduchu, aktuálně přítomným v ohništi. Při zapalování paliva a při dohořívání koksového zbytku, tedy v případě malé rychlosti hoření, je v ohništi nadbytek spalovacího vzduchu (vyznačeno modře), zatímco v oblasti maximální rychlosti hoření (vyznačeno žlutě) je v ohništi méně spalovacího vzduchu, než odpovídá požadovanému průměrnému (optimálnímu) součiniteli přebytku vzduchu.

Právě v oblasti maximální rychlosti hoření spočívá klíčový problém těchto ohnišť. Po zapálení paliva se spalovací proces přirozeně rozvíjí k vyšší rychlosti hoření a přednostně se spalují prchavé složky hořlaviny. To vyžaduje zvýšený přívod spalovacího vzduchu, který však je ze samotného principu spalování nedostačující. Výsledkem je nedokonalé spalování s vysokým obsahem oxidu uhelnatého a dalších nežádoucích produktů nedokonalého spalování ve spalinách. Nastavení přívodu vzduchu na vyšší úroveň jeho přebytku vyřeší problém jen částečně, protože se nemůže podařit úspěšně zvládnout celou oblast vysoké rychlosti hoření a navíc trvale příliš vysoký přebytek vzduchu výrazně sníží účinnost kotle v oblasti malé rychlosti hoření. Praktickým důsledkem by pak bylo zvýšení výkonu kotle, zvýšení spotřeby paliva a nutnost častějšího přikládání. Takže nezbyvá než chodit ručně nastavovat regulaci.

Popsané potíže čekají většinu tuhých paliv, včetně upravených druhů biomasy. Přesto však existuje palivo, pro které může být tento způsob spalování vhodný. Protože je klíčovou potíží nemožnost dokonale spálit velké množství plynných hořlavých složek, uvolňujících se z uhlí bezprostředně po jeho zapálení, je reálné uvažovat o spalování paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny. Paliva tohoto druhu jsou označována jako bezdýmá paliva, je známa řada pokusů o jejich komerční produkci a klasickým bezdýmým palivem je koks.

8. Technologie pro spalování tuhých paliv ve zdrojích o malém výkonu

Hlavním cílem provozu technologií pro spalování tuhých paliv ve zdrojích malých výkonů je zajištění příznivých tepelných poměrů v uzavřených místnostech.

Základní požadavky na konstrukci spalovacího zařízení jsou hlavně podřízeny druhu paliva, tedy jeho složení a vlastnostem. Cílem konstruktérů je navrhnout kotel, který by nebyl na typu paliva závislý a byl by co možná nejvíce univerzální. Technicky to představuje velký problém, který se dá částečně řešit instalací regulačních prvků, což je samozřejmě finančně náročné. Je nutné, aby kotel nejenom splňoval technicko-ekologické požadavky, ale také aby byl finančně dostupný.

Rozlišujeme dva základní způsoby vytápění místnosti spalováním tuhých paliv:

- lokální vytápění
- ústřední vytápění

8.1. Historický vývoj technologií pro spalování tuhých paliv

V polovině čtyřicátých let 20. století, kdy byla enormní poptávka po spalovacích zařízeních malých výkonů, prakticky neexistovaly žádné požadavky na konstrukci a vlastnosti spalovacích zařízení. Výsledek tohoto stavu se projevil v nekontrolovaném rozvoji výroby různých typů spalovacích zařízení o různých parametrech. Změna nastala až po přijetí zákona o státním zkušebnictví [40] z r. 1968, který stanovil povinné hodnocení a schvalování výrobků. V současnosti je problematika požadavků kladených na spalovací zařízení pro tuhá paliva řešena zákonem o technických požadavcích na výrobky [39], [43]. Kotle na tuhá paliva jsou dle příslušného nařízení vlády [29] označeny jako výrobky stanovené. V seznamu výrobků s vyznačením postupu posouzení shody jsou vedeny pod oblastí „Technická zařízení staveb“ ve skupině č.5 (zařízení pro přípravu teplé vody, ústřední vytápění, tepelná čerpadla a zásobníky) a č.6 (domovní spalovací topná zařízení na pevná a kapalná paliva). Nařízení vlády stanovuje povinnost pro výrobce nebo dovozce stanovených výrobků před uvedením výrobků na trh zajistit ověření shody výrobku. K nařízení vlády se vyhlášují technické požadavky, které jsou vyjádřeny harmonizovanými normami [6]. Harmonizované normy jsou uveřejňovány ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví [36].

Z historického pohledu lze vývoj spalovacích zařízení pro tuhá paliva popsat takto:

- roštové kotle s horním odhoříváním paliva (prohořívání)

- roštové kotle se spodním odhoříváním paliva (odhořívání), sekundární spalovací vzduch
- roštové kotle se spodním odhoříváním paliva (odhořívání), regulovaný sekundární spalovací vzduch, teplá spalovací komora (šamotová výstelka)
- roštové kotle se spodním odhoříváním paliva (odhořívání), regulovaný sekundární spalovací vzduch, teplá spalovací komora (šamotová výstelka), terciální spalovací vzduch
- nové konstrukce roštnic
- automatický roštový (válcový rošt) kotel s primárním a sekundárním spalovacím vzduchem
- automatický kotel založen na principu spodního přikládání paliva (kruhový rošt, retorta)
- automatický kotel založen na principu spodního přikládání paliva s teplou spalovací komorou a sekundárním vzduchem (kruhový rošt, retorta).

8.2. Roštové kotle

Nejstarším, pro malé výkony nejpoužívanějším a dosud používaným typem spalovacího zařízení tuhých paliv je roštové ohniště. Roštové ohniště slouží k spalování kusových tuhých paliv v klidné vrstvě tzv. filtračním způsobem. Základní části roštového ohniště jsou: spalovací prostor (vlastní ohniště) vymezený na bocích stěnami a přední a zadní klenbou a na dně roštem, palivová násypka, popelník a zařízení pro přívod a regulaci spalovacího vzduchu.

Funkce roštu:

- vytvářet a udržovat vrstvu paliva požadované tloušťky a prodyšnosti při co nejmenším propadu zrn paliva
- zajišťovat přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých míst plochy roštu tak, aby spalování probíhalo s optimálním součinitelem přebytku vzduchu
- umožňovat postupné vysoušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření zrn paliva
- shromažďovat, popř. zajišťovat odvod

Spalované palivo prochází na roštu postupně sušením, odplyňováním prchavé hořlaviny, zapálením, hořením a dohoříváním. U pevných roštů následují tyto fáze za sebou ve směru výšky vrstvy a u roštů pásových a přesuvných za sebou ve směru délky roštu.

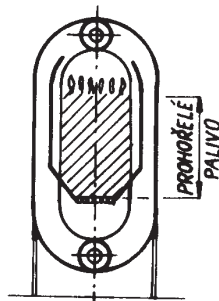
Dle způsobu hoření paliva na roštu se kotle dělí na:

- s horním odhoříváním paliva (prohořívání)
- se spodním odhoříváním paliva (odhořívání)

8.2.1. Kotle s horním odhoříváním paliva

U kotlů s horním odhoříváním paliva (obr. č. 6) procházejí spaliny zdola nahoru celou vrstvou paliva v násypné šachtě, což má za následek, že palivo začne v šachtě prohořívát

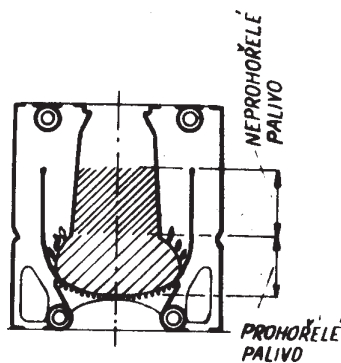
v celé výšce násypné vrstvy. Plameny ožehují horní část násypné šachty a spaliny se k výhřevným plochám kotle odvádějí otvory v klenbě nebo v boku šachty. Výkon se reguluje změnou násypné vrstvy paliva a změnou komínového tahu. Určeno pro paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny (koks).



OBR. Č. 6 SCHÉMA KOTLE S HORNÍM ODHOŘÍVÁNÍM PALIVA

8.2.2. Kotle se spodním odhoříváním paliva

U kotlů se spodním odhoříváním paliva (obr. č. 7) neprocházejí plyny celou vrstvou paliva v násypné šachtě. Bez ohledu na množství paliva v šachtě prohořívá palivo pouze v dolní části násypné vrstvy. Do skupiny kotlů se spodním odhoříváním paliva patří také kotle s násypníkem na jedné straně, u kterých se palivo sesouvá na rošt vlastní tíhou nebo se dopravuje do ohniště mechanickým roštem.



OBR. Č. 7 SCHÉMA KOTLE SE SPODNÍM ODHOŘÍVÁNÍM PALIVA

8.3. Lokální vytápění

Lokální vytápění je způsob vytápění, při kterém je zdroj tepla (topidlo) umístěn přímo ve vytápěné místnosti. Přestože účinnost malých lokálních topidel je obvykle menší než účinnost kotlů pro ústřední vytápění, je výsledná hospodárnost posuzovaná podle celkové spotřeby tepla pro vytápění prostorové jednotky (např. jednoho bytu) při lokálním vytápění obvykle větší než při vytápění ústředním. To je způsobeno tím, že při lokálním vytápění lze velmi pohotově řídit provoz podle skutečné potřeby – vytápí se jen tehdy, když se místnost skutečně používá. Vedle této nesporné přednosti lokálního vytápění není však možno přehlédnout jeho nevýhody – náročnou obsluhu, nehygienický provoz (zejména u topidel na tuhá paliva) a nižší

stupeň komfortu. V sedmdesátých letech v ČR a také ve většině ostatních zemí východní Evropy převažovalo lokální vytápění nad vytápěním ústředním. Například v roce 1972 bylo v ČR lokálně vytápěno přibližně 72 % bytů v roce 1980 ještě asi 60 % [16].

Ohniště lokálních topidel se dělí dle konstrukce ohniště na:

- obyčejná (sporáky),
- šachtová.

8.3.1. Obyčejná ohniště lokálních topidel (sporáky)

Obyčejná ohniště mají pevný rošt, který je instalován těsně za příkládacími dvířky v jedné úrovni s jejich spodním okrajem. Takto uspořádanými ohništi s rovinnými rošty jsou vybaveny sporáky, starší typy kachlových kamen, kotle na vyvážení prádla a koupelnové ohřívací kotle. Tato všeobecně známá nejjednodušší topeniště, kde se přikládá na hořící vrstvu, popř. se hořící vrstva posune dozadu a na uvolněné místo se přiloží nové palivo, mají několik základních nedostatků zaviněných jejich uspořádáním. Tak např. se teplem zdeformovanými dvířky (hořící palivo je bezprostředně za těmito dvířky) přisává nadměrné množství falešného vzduchu, při přikládání a upravování vrstvy paliva hrozí nebezpečí vypadnutí žhavých částic z ohniště na podlahu vytápěné místnosti. Výhodou tohoto topeniště je jeho snadná obsluha (neboť topeniště je snadno přístupné) a možnost využití horní plochy jako plotny kuchyňského spotřebiče.

Sporáky rozdělujeme dle konstrukčního uspořádání na:

- nástavcové (pečicí trouba je umístěna nad úrovní plotny),
- stolové (pečicí trouba je pod úrovní plotny v tělese sporáku),
- kombinované na několik druhů paliv (např. uhlí a plyn).

8.3.2. Šachtová ohniště lokálních topidel

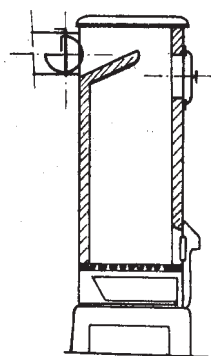
Šachtová ohniště s pevným nebo pohyblivým roštem jsou ohniště, ve kterých je rošt uložen v určité hloubce pod příkládacími dvířky (250 – 500 mm), takže se může palivo spalovat ve vysoké vrstvě. Tato ohniště jsou vhodná pro tříděná zrnitá paliva. Umožňují násypný a stáložárny způsob topení. Kamna na tuhá paliva mají pod pláštěm ze smaltovaného plechu pouze tenkou vrstvu keramické vyzdívky. Tepelná setrvačnost těchto kamen je proto velmi malá a z toho vyplývá krátká doba zátoku a snadná regulace výkonu. Měrný tepelný výkon kamen je 4 000 až 4 500 W/m² a účinnost 70 až 80 % při jmenovitém výkonu a 50 až 70 % při normálním provozu, tj. při proměnlivém výkonu.

Tepelný výkon kamen pro přerušované vytápění musí být určen tak, aby i při nejnižších venkovních teplotách odpovídal potřebě tepla (tj. celkové tepelné ztrátě místnosti) a kromě

toho ještě poskytoval dostatečnou rezervu pro urychlení zátopu. S ohledem na velikost obytných místností se vyráběly kovová kamna na tuhá paliva nejčastěji o jmenovitém výkonu 3 500 až 6 000 W, tj. o otopné ploše 0,8 až 1,5m².

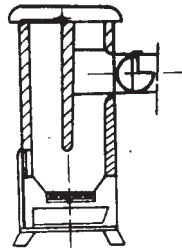
Protože keramická vrstva pod plechovým pláštěm je velmi tenká, je povrchová teplota kamen poměrně vysoká. Při sdílení tepla s povrchu kamen pak převládá konvekce a tím vzniká intenzivní proudění vzduchu v místnosti. Rozložení teploty vzduchu ve vertikálním směru je přitom značně nerovnoměrné a tato nerovnoměrnost je ještě dále zvětšována tím, že se kamna obvykle umísťují u vnitřní stěny. Aby se vyloučilo nebezpečí přímého dotyku s horkým povrchem, mají moderní kamna často dvojitý kovový plášť. Tím se však dále zvětšuje podíl konvekce (dutinou mezi plášti proudí vzduch) a nerovnoměrnost vertikálního teplotního profilu v místnosti.

Pokud je násypná šachta zároveň spalovacím prostorem, mluvíme o kamnech na prohořívání paliva, jejichž typickým představitelem je typ Petr 8 (viz obr. č. 8) a Petr 10, později Zora 8 a Zora 10 a Mora.



OBR. Č. 8 SCHÉMA KAMEN PETR 8

Pokud není šachta současně spalovacím prostorem a uhlí hoří na roštu, přičemž jsou horké spaliny odváděny tahy, jde o kamna na odhořívání paliva např. typy Club, Thermo (viz obr. č. 9), Elit, Žiara, Zenit, Vatra. U tohoto typu kamen je spalovací šachta rozdělena svislou přepážkou do dvou prostorů, z níž přední tvoří zásobník paliva, která se sesouvá na rošt v množství daném světlostí průchodu mezi spodní hranou přepážky a roštěm. Toto uspořádání umožňuje stáložárný provoz i plynatých paliv, což při odhořívacím způsobu hoření nebylo vhodné.



OBR. Č. 9 SCHÉMA KAMEN THERMO 420

8.4. Kotle pro ústřední vytápění

Systém ústředního vytápění se dělí na:

- teplovodní vytápění
- parní vytápění nízkotlaké
- vytápění teplým vzduchem

U malých výkonů kotlů (do 200 kW) je většinou použit systém teplovodního vytápění. Teplo spalin ohřívá vodu v kotli a ta je rozváděna výstupním potrubím do topných těles. Ochladená voda se vrací zpětným potrubím zpět do kotle k novému ohřátí. Ohřívá se zpravidla do teploty 90 °C. U této soustavy jsou kotel (nebo jiný zdroj tepla), potrubí a otopná tělesa zcela naplněny vodou až do expanzní nádrže, která je umístěna výše než nejvyšší otopné těleso (min. o jeden metr). K oběhu vody se využívá fyzikálního principu, že ohřátá voda má menší hustotu než voda studená. Ohřátá voda stoupá potrubím nahoru do topných těles, v nichž se ochladí, tj. zmenší svůj objem, je těžší a klesá dolů do kotle. Stačí-li k překonání všech hydraulických odporů kladených prouděním vody v celém zařízení tlak vzniklý rozdílem hustot ohřáté výstupní vody a chladnější vstupní vody, nazývá se tento druh vytápění teplovodní vytápění se samotížným oběhem. Je-li nutné tomuto proudění pomáhat čerpadlem, jde o teplovodní vytápění s nuceným oběhem.

Dle účelovosti dělíme kotle na:

- jednoúčelové (vytápění)
- kombinované (vytápění a ohřev TUV)

Pro potřeby ústředního vytápění se používají kotle, které lze začlenit do dvou hlavních skupin, podle materiálu:

- litinové článkové kotle
- ocelové kotle

Oba materiály (ocel i litina) mají své přednosti i nevýhody. Litinové článkové kotle a tělesa mají delší životnost. Výrobky z ocelového plechu se dají snáze tvarovat a mají nižší hmotnost. Konstruktivní změna dílu z litiny je dle realizace náročnější než u dílu z oceli.

8.5. Doprava paliva do ohniště

Dle délky periody a způsobu dopravy paliva do ohniště se kotle dělí na:

- s periodickým přikládáním (1-12 h)
- s kontinuálním přísunem paliva (mechanická doprava ze zásobníku)

Prohořivací systém je systém s periodickým přikládáním a protože se palivo přikládá přímo do spalovací komory, jde o periodický přísun paliva do spalovací komory. Odhořivací systém je systém s periodickým přikládáním paliva, ale palivo je přikládáno do násypky, což částečně přibližuje tento systém ke kontinuální dopravě paliva do spalovací komory. Kontinuální doprava paliva je závislá na periodickém odpopelnění roštu. Velký vliv kontinuálního přívodu paliva a odvodu popele na tvorbu emisí je skutečnost, která ovlivnila moderní vývoj kotlů. Pokud nebyl přívod paliva kontinuální, byla s ohledem na různost počátečních podmínek (uspořádání na roštu po odpopelnění) opakovatelnost periody jednoho přiložení velmi malá. Z pohledu kvality spalování je žádoucí, aby opakovatelnost stavu při spalování daného druhu paliva byla co největší, neboť to může zajistit, že základní parametry kotle dosažené výrobcem při spalovacích zkouškách na zkušební trati budou blízké parametrům dosaženým běžným provozovatelem.

V současnosti směřuje vývoj kotlů na tuhá paliva o malém výkonu směrem k automatickému provozu. Je snaha zařízení provozovat s minimálním zásahem obsluhy. Úkol obsluhy je omezován na:

- počáteční nastavení provozních parametrů (hmotnostní tok paliva, přebytek spalovacího vzduchu)
- doplňování zásobníku paliva
- vyprazdňování zásobníku s popelem

V současné době je kontinuální doprava paliva do spalovací komory pro kotle malých výkonů založena na principu:

- otočného válcového roštu
- šnekového dopravníku

Z pohledu využití energie a tvorby emisí neexistuje špatné palivo, ale existuje nevhodný spalovací proces, kterým energii z paliva uvolňujeme (typ spalování, ohniště) a čistíme spaliny. Zohlednění této skutečnosti je pak dáno pouze sblížením ekonomických, environmentálních a technických požadavků.

9. Spalovací zkoušky (experimentální část)

Provedl jsem velké množství spalovacích zkoušek na různých typech spalovacích zařízení reprezentujících starou a novou technologii. Zkoušky byly provedeny pro různá paliva a při různých provozních režimech.

Převážnou většinu spalovacích zkoušek jsem provedl na zkušební kotlů, která je součástí Výzkumného energetického centra Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě. Při vybavování a řešení provedení měřící trati zkušebny jsem musel řešit mnoho specifik, které testování kotlů malých výkonů představuje. Evropské normy pro zkoušení malých kotlů [13], na rozdíl od starých českých [10], dávají značnou volnost ve způsobu technického řešení měření. Nepředepisují způsob měření, ale nejistotu měření, což je jejich předností a umožňují tak reagovat na dynamický vývoj v oblasti měření a metrologie. O specifikacích jednotlivých problémů a jejich řešení se zmiňuji v dalších částech této práce.

Zkoušený kotel byl připojen k měřící smyčce (viz obr. č. 11), která umožňuje nastavení požadovaného teplotního spádu. Dle požadovaných parametrů byl nastaven výkon a přebytek spalovacího vzduchu. V průběhu zkoušky byla většina měřených hodnot automaticky zaznamenávána. Odečet měřených hodnot byl uskutečňován každou sekundu a archivovány byly minutové průměry. Pro přepočty na referenční stavy a pro další korekce byly také měřeny parametry v laboratoři během zkušební režimu (teplota, barometrický tlak a relativní vlhkost). Spalovací zkoušky byly provedeny v souladu s postupem uvedeným v příslušných normách [10], [13].

Provedené práce (realizace spalovacích zkoušek) byly součástí:

- řešení grantu Kvalita spalovacího procesu v kotlech malých výkonů, (GAČR 101/98/0820),
- řešení grantu **Výzkumně-průmyslové centrum pro vývoj zařízení určeného k ekologickému spalování tuhých paliv, zejména biomasy** (MPO ČR, FB-C2/15) v rámci kterého byl vyvíjen nový typ ohniště se spodním kontinuálním přikládáním paliva. Výsledkem tohoto projektu byl vznik moderního kotle, který úspěšně prošel certifikací ve státní zkušebně a našel uplatnění na domácím trhu.
- řešení grantu Influence of Co-combustion of Coal and Biomass on the Emission Pollutants in Domestic Appliances, (INCO-COPERNICUS, IC 15 CT 98 0503),
- výzkumu možnosti odsiřování spalin v ohništích malých výkonů pomocí aditivace paliva (zadavatelé byly výrobcí paliva),
- ověření možnosti spalovat zemědělské odpady v kotlích malých výkonů.

9.1. Sledované parametry

Při spalovacích zkouškách byly sledovány hlavně tyto parametry:

- Tepelný výkon
- Hmotnostní tok paliva
- Parametry paliva
- Přebytek spalovacího vzduchu (koncentrace O₂)
- Teplota spalin za kotlem
- Teplota spalin v ohništi
- Účinnost spalovacího zařízení
- Náklady na vyrobené teplo
- Koncentrace škodlivin CO, SO₂, NO_x, CO₂, C_xH_y a TZL

9.2. Metodiky stanovení sledovaných parametrů

9.2.1. Stanovení výkonu kotle

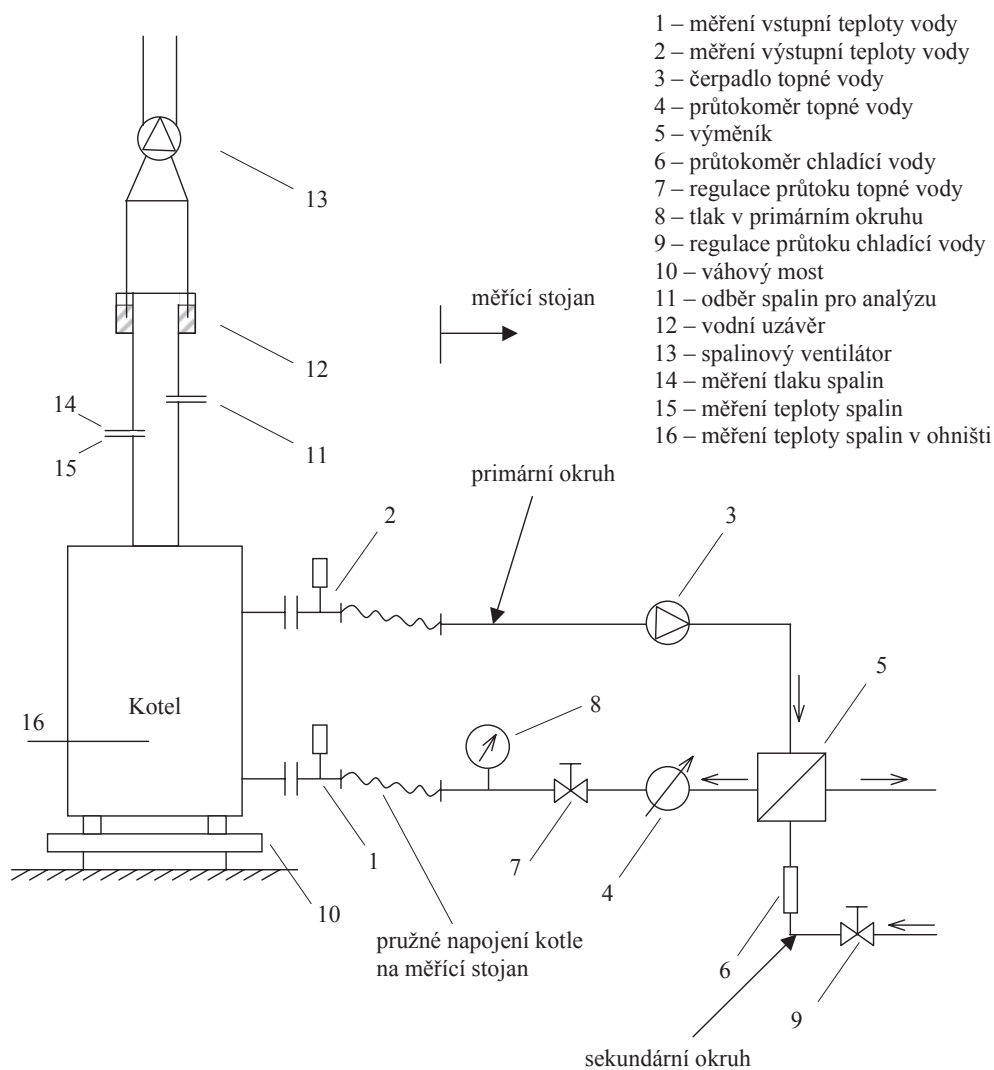
Testované zařízení bylo hydraulicky připojeno k měřicí smyčce pomocí pružných pancéřovaných hadic. Měřicí smyčka je tvořena primárním a sekundárním okruhem (viz obr. č. 11). Primární okruh je tvořen samotným kotlem, průtokoměrem, čerpadlem, jímkami pro teploměry, armaturami a regulačními prvky. Primární okruh slouží pro změření hodnot potřebných pro stanovení výkonu. Při exotermní reakci hořlaviny s kyslíkem, která probíhá v kotli, jsou produkty spalování zahřány na vysokou teplotu a na teplosměnných plochách předávají své teplo topné vodě, která koluje v primárním okruhu. Změnou průtoku v primárním okruhu je možné nastavit požadovaný teplotní spád. Tepelná energie předaná spalinami topné vodě je z primárního okruhu odvedena přes tepelný výměník. Primární a sekundární okruh jsou hydraulicky oddělené celky. Sekundární (chladicí) okruh je tvořen zdrojem chladicí vody (odebírání tepla z primárního okruhu), armaturami, čerpadly a regulačními členy. Jako zdroj chladicí vody je použito vodovodního řádu. V případě nedostatečného či kolísavého tlaku je chladicí voda z mezi-zásobníku dopravována k měřicí smyčce pomocí čerpadel. Za zmínku stojí také skutečnost, že tepelná energie, kterou předá topná voda vodě chladicí, je následně využívána pro topení v objektu zkušebny (hydraulicky nezávislé systémy).

Výkon byl stanoven jako součin objemového toku topné vody (magneticko-indukční průtokoměr Krohne), hustoty topné vody při teplotě v průtokoměru a rozdílu entalpií vstupní a výstupní topné vody. Entalpie byly stanoveny při vstupní a výstupní teplotě topné vody a příslušném tlaku vody. Teplota vstupní a výstupní vody byla měřena párovými odporovými teploměry PT100. Po výsledcích ověření smyčky bylo vyhodnoceno prvotní řešení jímek pro teploměry ve tvaru "T" jako nevhodné. Následně byla výrazně zvětšena délka nových odporových teploměrů a byly umístěny do kolen (protiproudě) s ohledem na

minimalizaci nejistot při měření teplotního spádu (viz obr.č.10). Bylo použito čtyřvodičového provedení párovaných teploměrů. Teploměry jsou umístěny přímo na vstupu a výstupu topné vody (mezi kotlem a pancéřovou hadicí).



OBR. Č. 10 UMÍSTĚNÍ TEPLOTNÍHO ČIDLA PRO MĚŘENÍ TEPLoty KOTLOVÉ VODY



OBR. Č. 11 SCHÉMA ZAPOJENÍ KOTLE NA MĚŘÍCÍ SMYČKU

9.2.2. Stanovení hmotnostního toku paliva

Testované zařízení bylo celé postaveno na vážícím mostu. Vážící most je osazen čtyřmi tenzometrickými senzory (v každé noze) a vyhodnocovací jednotkou. Vážící rozsah je do 1500 kg. Jeden dílek je 12,5 g. Plošina váhy má rozměr cca 1000 x 1400 mm. Pro snadnost manipulace s paletovým vozíkem při umísťování kotle na vážící plošinu je vážící most umístěn na pevných vyvýšených patkách. Na obr. č. 12 je zobrazen vážící most při kalibraci.



OBR. Č. 12 VÁŽÍCÍ MOST BĚHEM KALIBRACE

Pro minimalizaci negativního ovlivnění vážení během zkoušky jsou spalinové cesty napojeny přes vodní uzávěr (viz obr. č. 13). Za kotlem je měřící vertikální cca jeden metr dlouhý úsek spalin (rozměry dle požadavku normy) sloužící pro odběry spalin. Na tomto díle je nasazena spodní část vodního uzávěru (mezikruží naplněné vodou). Po usazení kotle na vážící plošinu se nasune do spodní části vodního uzávěru část horní (kontakt jen s vodou), která hermeticky uzavře tento úsek. Dále jsou spaliny vedeny přes regulační klapu ke kouřovému ventilátoru a následně vycházejí komínem mimo prostor zkušebny. Požadovaný podtlak v měřícím úseku se nastavuje pomocí regulace otáček kouřového ventilátoru a pomocí nastavení regulační klapky.



OBR. Č. 13 VODNÍ UZÁVĚR KOUŘOVODU

Během celé zkoušky se automaticky zaznamenává hodnota na váze. Tato se pak také automaticky koriguje dle výsledků kalibrace při odtěžování. Rozdílem hodnoty váhy na začátku režimu a hodnoty váhy na konci režimu (po dolití odpařené vody z vodního uzávěru) se dostane úbytek hmotnosti zoxidované hořlaviny, vody a popílku v úletu. Pokud se k této hodnotě přičte hmotnost tuhých zbytků po spálení (za daný režim), dostaneme úbytek surového paliva za zkoušku. Tato hodnota podělená dobou trváním zkoušky představuje průměrný hmotnostní tok paliva po dobu zkoušky. Hmotnostní tok paliva je možno také vypočítat bez vážení popele za pomoci výše uvedených hodnot a stanovených hodnot nedopalu v tuhých zbytcích po spalování a obsahu popele v surovém palivu.

9.2.3. Stanovení parametrů paliva

Parametry paliva byly stanovovány v externích laboratořích. U většiny testovaných paliv byl stanoven hrubý rozbor a prvkový rozbor.

Hrubý rozbor byl použit pro stanovení příkonu a hmotnostního toku. Základní označení a příslušné jednotky, které byly použity, jsou:

- | | | |
|---------------------------|------------------|-----------|
| ▪ výhřevnost paliva | MJ/kg | Q_i^r |
| ▪ obsah vody v palivu | % _{hm.} | w_t^r |
| ▪ obsah popele v palivu | % _{hm.} | A^r |
| ▪ obsah prchavé hořlaviny | % _{hm.} | V^{daf} |

Nejistota stanovení množství spalin pomocí určení rychlosti spalin ze změřeného diferenčního tlaku na Prandtlově sondě je s ohledem na malé hodnoty rychlostí velká. Pro

stanovení množství spalin bylo použito stechiometrických spalovacích rovnic a prvkového rozboru spalovaného paliva:

- uhlík $\%_{\text{ohm}}$.
- vodík $\%_{\text{ohm}}$.
- síra $\%_{\text{ohm}}$.
- kyslík (zdánlivá hořlavina) $\%_{\text{ohm}}$.
- dusík $\%_{\text{ohm}}$.

9.2.4. Součinitel přebytku vzduchu

K určení součinitele přebytku vzduchu je možné využít dvou základních úvah:

- při stechiometrickém spalování ($n = 1$) není ve spalinách obsažen kyslík a čím větší pak bude přebytek vzduchu, tím víc bude kyslíku ve spalinách (jde o kyslík z nadbytečného vzduchu, který se spalovacího procesu nezúčastňuje).
- maximálního obsahu CO_2 ve spalinách bude dosaženo v případě stechiometrického spalování a s rostoucím přebytkem vzduchu jeho obsah klesá, protože absolutní množství vzniklého CO_2 se nemění a množství spalin roste.

Při stanovení hodnoty součinitele vzduchu se vždy předpokládají suché spaliny (tento předpoklad není zcela přesný). Součinitel přebytku vzduchu byl označován jako n a byl počítán dle vztahu:

$$n = 1 + \frac{V_{\text{sp,t}}^s}{V_{\text{vz,t}}^s} \cdot \frac{C_{\text{O}_2}}{21 - C_{\text{O}_2}} \cong \frac{21}{21 - C_{\text{O}_2}} \quad [-] \quad (14)$$

kde $V_{\text{sp,t}}^s$ je teoretické množství suchých spalin v m^3/kg
 $V_{\text{vz,t}}^s$ teoretická spotřeba suchého vzduchu v m^3/kg
 C_{O_2} naměřený obsah kyslíku ve spalinách v $\%_{\text{obj}}$.

Zjednodušení uvedené ve vztahu pro výpočet součinitele přebytku vzduchu bylo možné použít z ohledem na skutečnost, že hodnota poměru teoretického množství spalin a vzduchu je pro tuhá paliva blízká jedné.

9.2.5. Stanovení teploty spalin v ohništi a za kotlem

Teplota spalin v ohništi a za kotlem v měřicím úseku spalin byla měřena pomocí termočlánků typu "K" a "T". Termočlánek byl plášťovaný o průměru 3 mm. Do ohniště byl teplý konec termočlánku zasunut přes spalinové cesty. Kompenzačním vedením byl signál přiveden k vyhodnocovací jednotce.

9.2.6. Stanovení účinnosti spalovacího zařízení

Účinnost kotle lze stanovit dvěma základními způsoby:

- přímou metodou
- nepřímou metodou

Princip stanovení účinnosti přímou metodou spočívá ve stanovení podílu výkonu ku příkonu. Stanovení výkonu bylo popsáno v 9.2.1. Příkon byl stanoven jako součin hmotnostního toku paliva (viz 9.2.2) a výhřevnosti (viz 9.2.3).

Princip stanovení účinnosti nepřímou metodou je založen na úvaze, že dokonalé zařízení má účinnost 100 % a skutečné zařízení má účinnost dokonalého zařízení poníženou o jednotlivé ztráty. U teplovodních kotlů na tuhá paliva bereme v úvahu tyto nejdůležitější ztráty:

- ztrátu citelným teplem spalin (komínová),
- ztrátu hořlavinou v tuhých zbytcích,
- ztrátu hořlavinou ve spalinách (CO),
- ztrátu sdílením tepla do okolí.

9.2.7. Stanovení palivových nákladů na vyrobené teplo

Palivové náklady na jednotku vyrobeného tepla byly stanoveny jako zlomek, v jehož čitateli byl součin hmotnostního toku paliva (viz 9.2.2) a ceny paliva (dle výrobce) a ve jmenovateli byla hodnota naměřeného tepelného výkonu.

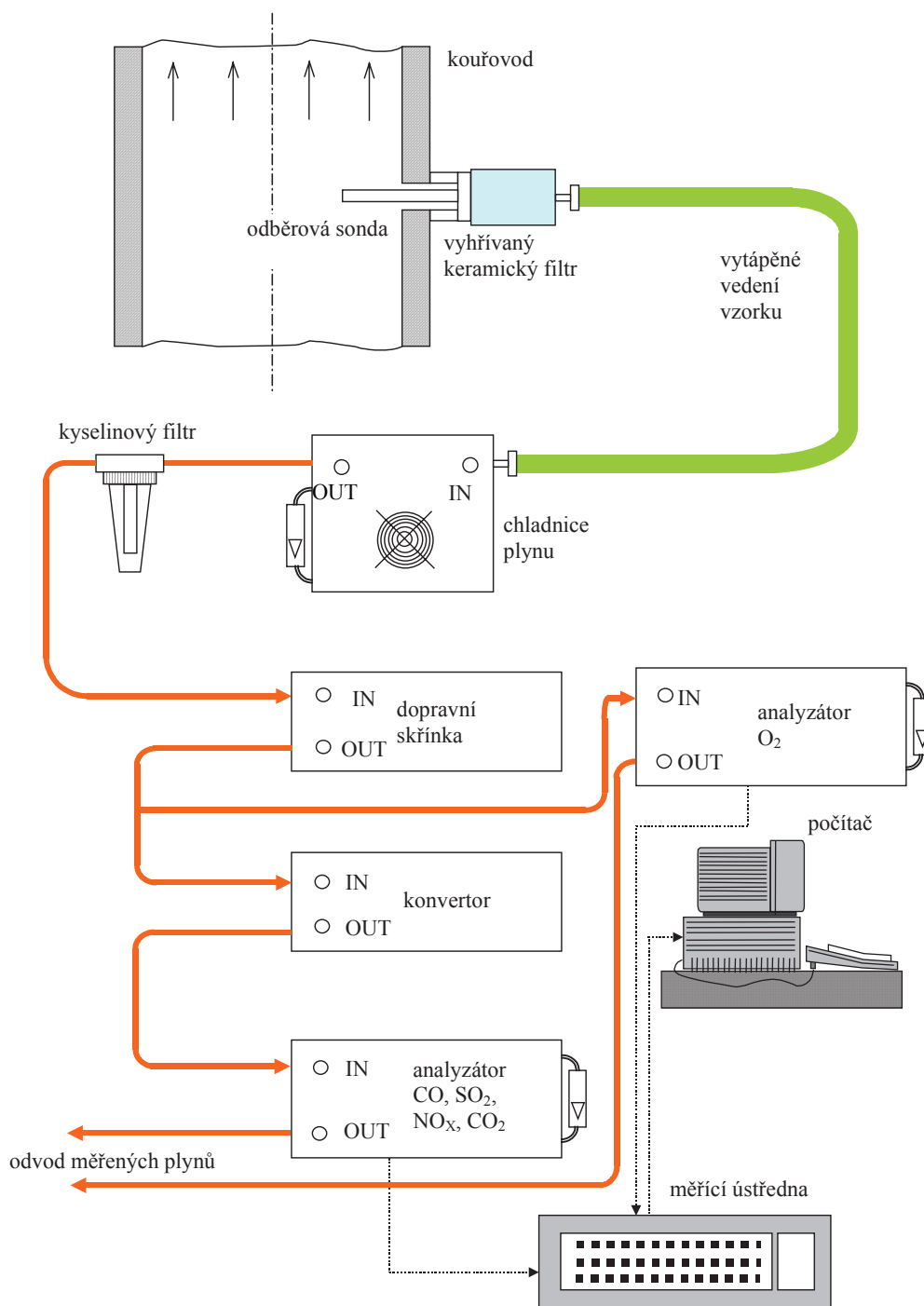
9.2.8. Stanovení koncentrace CO, CO₂, SO₂, NO_x ve spalinách

Koncentrace CO, CO₂, SO₂, NO_x byly měřeny kontinuálním analyzátozem MIR 9000 od firmy Émission s.a. pracujícím na principu absorpce infračerveného záření.

Odběr vzorků spalin byl uskutečňován pomocí sondy s vyhříváním keramickým filtrem pro odloučení tuhých částic, za kterým bylo připojeno vytápěné vedení vzorku (vytápěná hadice) k zabránění kondenzace odebíraného vzorku spalin při jeho dopravě. Na konci vytápěného vedení byla instalována chladnice plynu, v níž byla odloučena vlhkost ze spalin. Takto upravený vzorek byl zaveden do konvertoru a dále pak do analyzátoru, který byl před měřením kalibrován pomocí kalibračních směsí firmy LINDE. Schéma aparatury pro kontinuální analýzu plyných emisí je označeno jako obr. č. 14.

9.2.9. Stanovení koncentrace O₂ ve spalinách

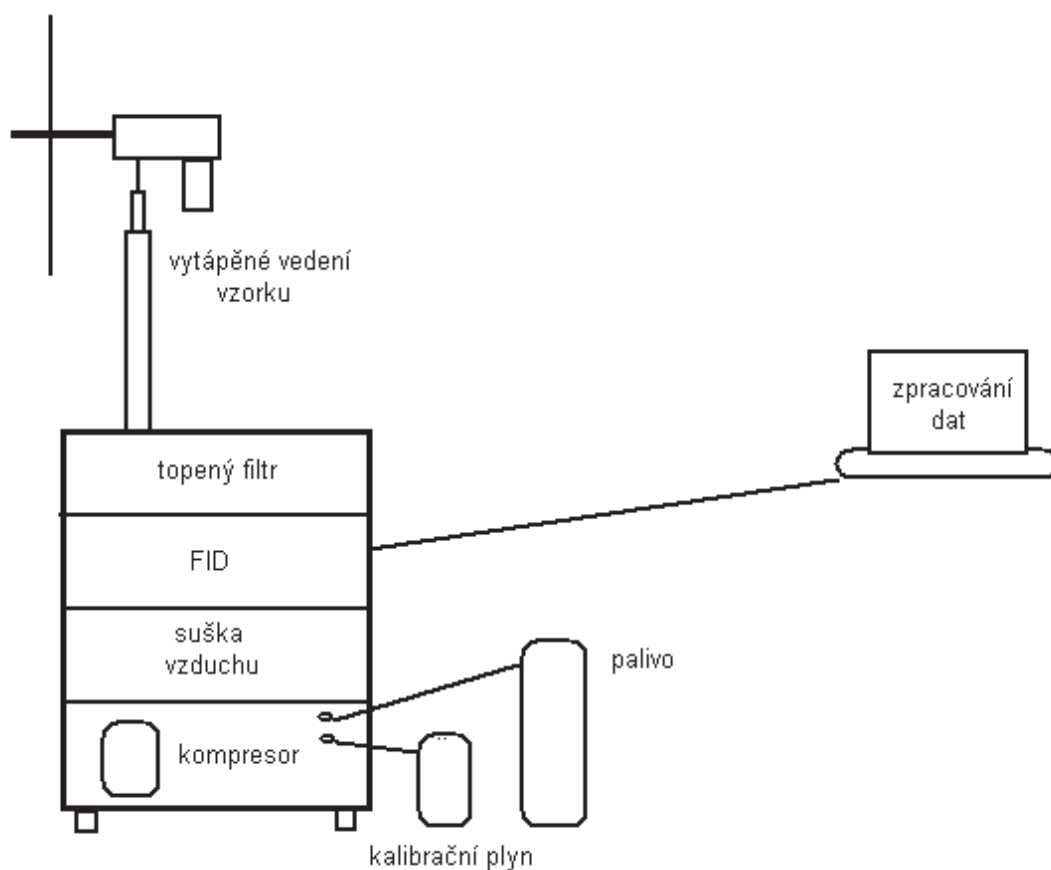
Koncentrace O₂ ve spalinách byla měřena kontinuálním analyzátozem PMA 30 od firmy AFRISO s.r.o., využívajícím paramagnetických vlastností kyslíku. Přístroj byl před měřením kalibrován čistým dusíkem pro kalibraci nuly (0% O₂) a okolním vzduchem (21% O₂) a měřil na rozsahu 0 – 30 %. Naměřené hodnoty jsou vyjádřeny v objemových procentech O₂ ve spalinách a slouží jako vztažné veličiny pro referenční přepočty a výpočet součinitele přebytku vzduchu. Schéma aparatury pro kontinuální analýzu O₂, která je součástí aparatury pro kontinuální analýzu plynných emisí, je označeno jako obr. č. 14.



OBR. Č. 14 SCHÉMA APARATURY PRO KONTINUÁLNÍ ANALÝZU CO, SO₂, NO_x, CO₂, O₂

9.2.10. Stanovení koncentrací uhlovodíků C_xH_y

Ke stanovení koncentrací celkového obsahu uhlovodíků ve spalinách byla použita metoda plamenoionizační detekce. Spaliny byly kontinuálně odebírány vytápěným vedením (vytápěná hlavice s keramickým filtrem a vytápěná hadice), které je připojeno na vstup do dalšího vytápěného filtru, z kterého jsou spaliny vedeny do vlastního analyzátoru Signal 3000M firmy Signal Instrument Co. Ltd., pracujícím na principu FID, tj. detekce pomocí plamenově ionizačního detektoru. Vzorek spalin je veden do vodíkového plamene hořícího mezi dvěma elektrodami. V podmínkách vodíkového plamene dochází k ionizaci molekul uhlovodíků a ke vzniku elektrického náboje, který je úměrný koncentraci uhlovodíků. Náboje iontů umožňují vznik proudu mezi elektrodami FID, který je také úměrný koncentraci celkového organického uhlíku. Koncentrace uhlovodíků je vyjádřena sumárně C_xH_y bez kvalitativního rozlišení. Jako standard ke kalibraci sloužil metan o koncentraci 69,8 ppm v dusíku. Schéma aparatury pro kontinuální analýzu C_xH_y je označeno jako obr. č. 15.

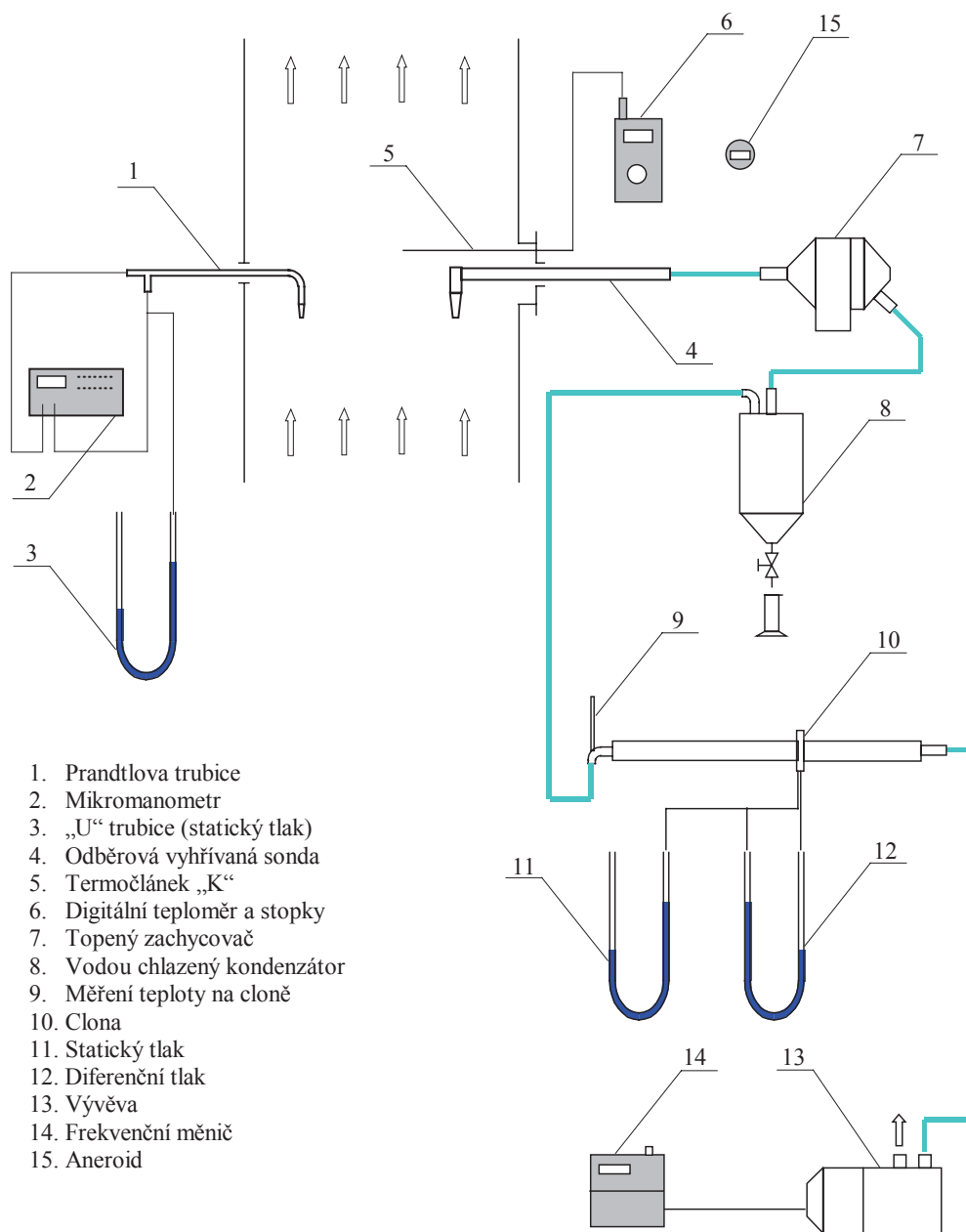


OBR. Č. 15 SCHÉMA APARATURY PRO KONTINUÁLNÍ ANALÝZU C_xH_y

9.2.11. Stanovení koncentrace TZL

Měření bylo provedeno gravimetrickou aparaturou ORGREZ - MU5 podle ČSN 12 4070. Princip měřicí metody je založen na izokinetickém odsátí vzorku spalin z kouřovodu. S ohledem na malé rychlosti spalin v měřicím úseku (velká chyba měření) a na velkou

časovou náročnost byla v několika případech použita metodika měření tmavosti kouře pomocí Bacharachovy stupnice (vizuální hodnocení kruhové barevné skvrny získané prosátím předepsaného množství spalin přes filtrační papír), nebo nebylo množství TZL ve spalinách stanoveno. Schéma aparatury pro jednorázový izokinetický odběr TZL z proudící tekutiny je označeno jako obr. č. 16.



OBR. Č. 16 SCHÉMA APARATURY PRO JEDNORÁZOVÝ IZOKINETICKÝ ODBĚR TZL Z PROUDÍCÍ TEKUTINY

9.2.12. Způsob vyjadřování a přepočtu emisí

Z pohledu celkového množství emisí vzniklých při výrobě tepla je postoj naší legislativy přinejmenším ne příliš šťastný. Důraz na splnění emisních limitů vyjádřených jako koncentrace při smluvených podmínkách opomíjí důraz na efektivní využití paliva.

Nejčastější důvod, proč palivo spalujeme, je získání energie, která je v něm chemicky vázaná pro potřebu člověka. U malých zdrojů tedy hlavně pro potřebu tepla na topení.

Převážná většina emisí byla měřena v koncentracích při efektivních podmínkách a byla vyjádřena v ppm (objemových) nebo v %. Za použití hustoty byly koncentrace vyjádřeny v mg/m^3 . Dále za použití stavových veličin byly koncentrace přepočteny na srovnávací podmínky (normální podmínky a referenční kyslík). Za použití vypočteného či naměřeného toku spalin byly emise vyjádřeny jako hmotový tok (v $\text{mg}_{\text{škodliviny}}/\text{h}$). S ohledem na skutečnost uvedenou v předchozím odstavci byly emise za použití změřeného tepelného toku vyjádřeny jako emisní faktory (např. v $\text{g}_{\text{škodliviny}}/\text{GJ}$, nebo $\text{g}_{\text{škodliviny}}/\text{kWh}$). Vyjádření na jednu vyrobenou GJ je vhodné z hlediska představivosti množství tepelné energie a vyjádření emisního faktoru na kWh bylo použito, protože v těchto jednotkách je stanoven limit pro EŠV. Vyjádření emisí jako emisní faktor je korektnějším vyjádřením emisní náročnosti na výrobu jednotky energie. V emisním faktoru je zahrnuta celková účinnost spalovacího zařízení. Pro možnost porovnání s hodnotami uvedenými ve vyhlášce [27] byl emisní faktor vyjádřen také na jednotku spotřebovaného paliva ($\text{kg}_{\text{škodliviny}}/\text{t}_{\text{paliva}}$). Tato hodnota je negativně zatížena skutečností, že přímo nezohledňuje účinnost zařízení, ale s ohledem na jednoduchost užití i pro laickou veřejnost je vhodná pro přibližné výpočty.

9.3. Testovaná spalovací zařízení

Pro možnost porovnání byly provedeny spalovací zkoušky na kotlích pracujících na různých principech. Jako kotel představující starou konstrukci byl vybrán kotel U22 využívající prohořivací způsob hoření. Moderní automatický kotel na tuhá paliva Varimatik 25 a Varimatik 50 (vyhovuje současným požadavkům) využívá princip otočného válcového roštu. Směr vývoje automatických kotlů směřuje k použití principu spodního přikládání paliva, jako zástupce tohoto směru byl vybrán kotel Ling 25 a Ling 50.

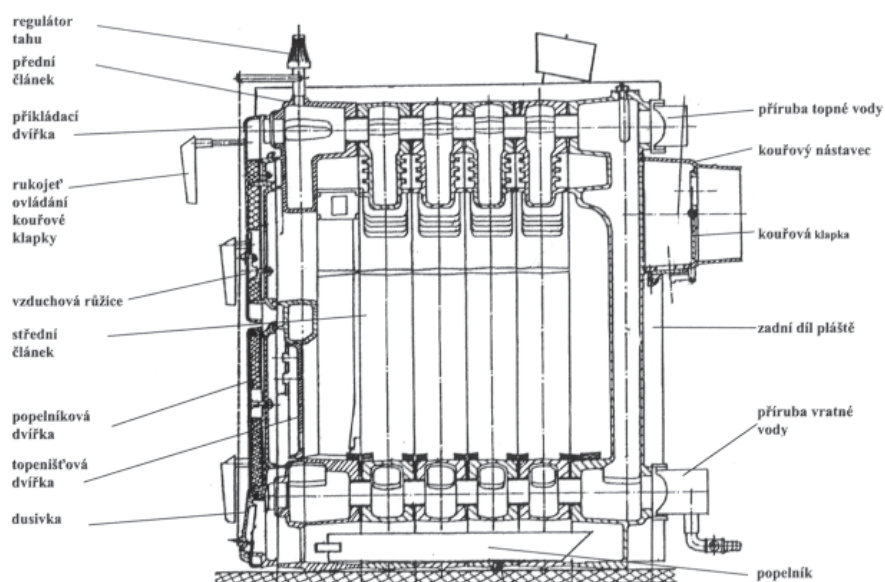
9.3.1. Kotel U22

Univerzální litinový nízkotlaký článkový kotel s nuceným (možno i přirozeným) oběhem topné vody pro pracovní přetlak do 0,4 MPa určený pro spalování pevných paliv (koks, černé uhlí, dřevo). Litinové kotlové těleso je sestaveno z článků pomocí kotlových vsuvek a zajištěno kotevními šrouby. Články vytvářejí spalovací a popelníkový prostor a konvekční část (viz obr. č. 18). Vstup a výstup topné vody je situován v zadní části kotle. K přednímu článku jsou připevněny příkladací, popelníková a topenišťová dvířka. Jedná se o kotel s prohořivacím způsobem hoření. Schéma kotle Viadrus U22 je uvedeno na obr. č. 17.

Parametry udávané výrobcem:

- jmenovitý výkon 29,1 kW
- počet článků 5
- účinnost 83 %
- max. teplota spalin 282 °C

výrobce ŽDB a.s., Závod topenářské techniky Viadrus.



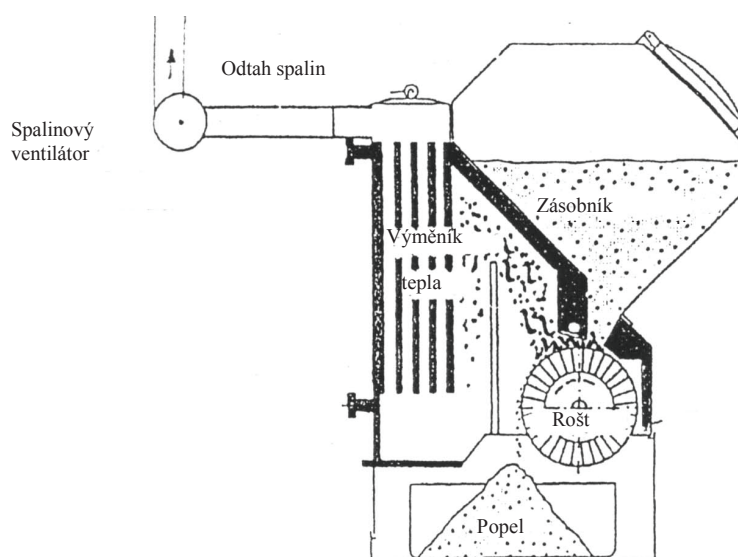
OBR. Č. 17 SCHÉMA KOTLE U22



OBR. Č. 18 KOTEL U22 PO SPALOVACÍ ZKOUŠCE

9.3.2. Kotel Varimatik 25

Kotel Varimatik 25 je automatický kotel na spalování hnědého uhlí. Kotel má válcový otočný rošt s elektrickým pohonem. Na rošt je dopravováno samospádem uhlí, které na válcové ploše roštu odhořívá. Popel padá do popelníku pod roštem. Délkou doby otáčení roštu je plynule regulován výkon kotle. Přívod primárního spalovacího vzduchu (pod roštem) je zajištěn podtlakem ve spalovací komoře, který vyvozuje kouřový ventilátor umístěný za kotlem (ovládán automatikou). Schéma kotle je označeno jako obr. č. 19 a fotografie kotle při spalovací zkoušce je označena jako obr. č. 20.



OBR. Č. 19 SCHÉMA KOTLE VARIMATIK 25



OBR. Č. 20 KOTEL VARIMATIK 25 PŘI SPALOVACÍ ZKOUŠCE

9.3.3. Kotel Varimatik 40

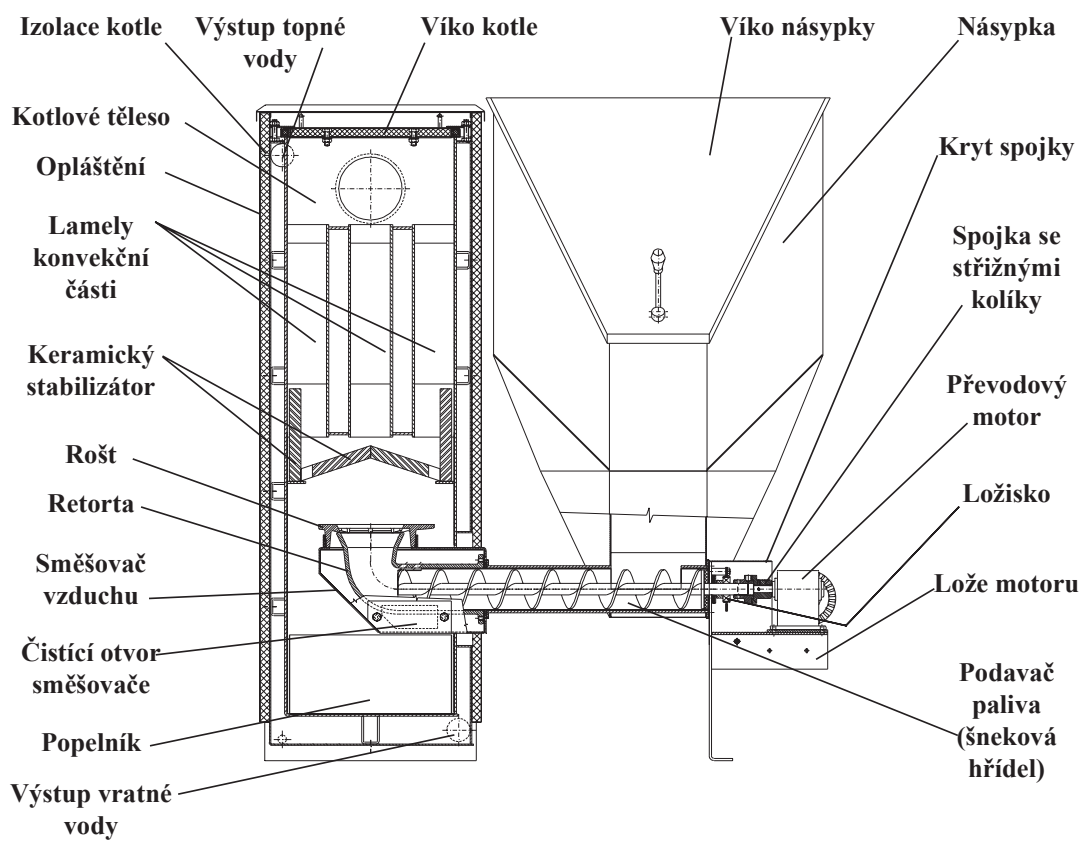
Jedná se o teplovodní kotel, který představuje vyšší výkonovou řadu kotle Varimatik 25. Základní principy jsou shodné s údaji uvedenými v 9.3.2. Hodnota jmenovitého výkonu je dle výrobce 50 kW.

9.3.4. Kotel Ling 25

Hlavní částí teplovodního automatického kotle, vycházejícího z principu spodního příkládání paliva, je kotlové těleso svařované z ocelových kotlových plechů. Kotel umožňuje spalování černého uhlí, hnědého uhlí a biomasy v podobě pelet. Výrobce udává při provozu na uhlí jmenovitý výkon 25 kW a při provozu na dřevěné pelety jmenovitý výkon 22 kW [31]. Pod výměníkem je umístěno spalovací zařízení, které je tvořeno litinovým roštem, keramickým katalyzátorem, retortou, tzn. litinovým kolenem pro přísun paliva a směšovačem vzduchu. Keramický katalyzátor usměrňuje hoření, snižuje úletovou prašnost, odráží teplo zpět do hořáku a napomáhá tak k dokonalejšímu spalování. Litinové koleno pro přísun paliva je opatřeno otvory pro vyrovnávání tlaku spalovacího vzduchu uvnitř retorty, čímž zabraňuje prošlehnutí plamene při procesu hoření. Pod spalovací komorou je popelník. Vedle kotle je umístěna násypka, která ústí do šnekového podávacího zařízení. Ventilátor pro dodávku primárního spalovacího vzduchu je umístěn před násypkou a je připojen na směšovač. Škrťací klapkou na ventilátoru je možno regulovat množství spalovacího vzduchu. Schéma ohniště kotle Ling 25 je uveden na obr. č. 21 a fotografie kotle při spalovací zkoušce je označena jako obr. č. 22.

9.3.5. Kotel Ling 50

Jedná se o teplovodní kotel, který představuje vyšší výkonovou řadu kotle Ling 25. Základní principy jsou shodné s údaji uvedenými v 9.3.4. Hodnota jmenovitého výkonu pro uhlí a dřevěné pelety je dle výrobce 42 kW. Skutečnost, že výrobce uvádí shodný jmenovitý výkon pro uhlí a biomasu, je v rozporu s rozdílným obsahem prchavé hořlaviny jednotlivých paliv. Větší obsah prchavé hořlaviny vyžaduje větší ohniště a nebo nižší jmenovitý výkon.



OBR. Č. 21 SCHÉMA KOTLE LING 25



OBR. Č. 22 KOTEL LING 25 PŘI SPALOVACÍ ZKOUŠCE

10. Výsledky experimentů a jejich diskuse

10.1. Rozsah experimentů a použitá paliva

Dle principů uvedených v 9.1 a 9.2 byly provedeny spalovací zkoušky na kotlích, jejichž konstrukce a parametry byly popsány v 9.3. Při spalovacích zkouškách bylo použito různých typů paliv. Jejich druh a označení je uveden v tab. č. 18. Hrubý rozbor jednotlivých použitých paliv je uveden v tab. č. 19. Přestože je hlavní pozornost této práce věnována spalování uhlí, byly s ohledem na trend v energetice provedeny také spalovací zkoušky s biomasou (převážně v podobě dřevěných pelet) a s odpady potravinářského průmyslu (zemědělci disponují pozoruhodnými zásobami energie v odpadech a neprodejných přebytečných produkce).

Poř.	Označení dle VEC	Charakteristika	Dále používané označení
1	009/01	černé uhlí Kladno, hrášek praný	černé uhlí I
2	065/00	černé uhlí Lazy	černé uhlí II
3	063/00	hnědé uhlí, ořech 2, SD a.s.	hnědé uhlí I
4	102/00	hnědé uhlí SD, méněsirnáté, neaditivované, Sr=0,64%	hnědé uhlí II
5	114/00	hnědé uhlí SD, vicesirnáté, aditivované, Sr=0,87%	hnědé uhlí III
6	123/00	hnědé uhlí SD, vicesirnáté, neaditivované, Sr=0,84%	hnědé uhlí IV
7	124/00	hnědé uhlí SD, méněsirnáté, aditivované, Sr=0,59%	hnědé uhlí V
8	348/00	hnědé uhlí, ořech 2, Bílina	hnědé uhlí VI
9	029/00	dřevěné pelety 12 mm, Červený Kostelec	pelety I
10	031/00	dřevěné pelety 14 mm, ZD Fryšták	pelety II
11	194/00	dřevěné pelety 20 mm, Červený Kostelec	pelety III
12	397/00	dřevěné pelety 14 mm, Červený Kostelec	pelety IV
13		hnědé uhlí z uhelných skladů (bez specifikace)	hnědé uhlí VII
14		obilí (ječmen, pšenice), hořčičné semínko, hrách, kukuřice, pelety ze směsi slámy a kalů z ČOV	

TAB. Č. 18 SEZNAM PALIV, KTERÁ BYLA POUŽITA PŘI SPALOVACÍCH ZKOUŠKÁCH

Při spalovacích zkouškách byly nastavovány různé provozní stavy (režimy). Jednotlivé režimy se lišily hlavně v nastavení:

- výkonu (změna nastavení příkonu - množství dodávky paliva)
- teploty vstupní a výstupní topné vody (teplotní spád)
- celkového množství spalovacího vzduchu a jeho rozdělení (primární, sekundární)
- polohy kouřové klapky a tlakových poměrů v kouřovodu
- umístění keramických stabilizátorů v ohništi

Při vyhodnocování jednotlivých režimů byl z průběhu spalovací zkoušky vybrán úsek, kdy při určitém nastavení došlo dle možností spalovacího zařízení k ustálení režimu (z pohledu výkonu a tvorby emisí). Minimální doba trvání jednoho režimu byla nejméně jedna hodina (dle kolísání parametrů). Přehled o množství režimů, které byly vyhodnoceny, je uveden v tab. č. 20 včetně typu použitého kotle a paliva.

označení vzorku	W_t^r	A^r	A^d	S^r	V^{daf}	Q_i^r
	% _{hm}					MJ/kg
černé uhlí I	13,83	9,68	11,20	0,32	35,90	23,25
černé uhlí II	2,54	9,40	9,60	-	30,8	29,79
hnědé uhlí I	17,17	7,98	9,60	1,14	49,20	21,11
hnědé uhlí II	28,01	3,91	5,40	0,64	51,70	18,75
hnědé uhlí III	30,66	5,43	7,80	0,87	52,00	18,15
hnědé uhlí IV	27,86	5,03	7,00	0,84	51,30	18,81
hnědé uhlí V	26,44	6,30	8,60	0,59	53,80	19,09
hnědé uhlí VI	22,13	12,09	15,50	0,79	50,80	18,51
pelety I	10,36	1,41	1,60	-	84,70	16,23
pelety II	9,57	2,63	2,90	-	83,20	15,77
pelety III	5,87	0,68	0,72	-	-	17,42

TAB. Č. 19 HRUBÝ ROZBOR PALIV POUŽITÝCH PŘI SPALOVACÍCH ZKOUŠKÁCH

Použitý kotel	Použité palivo pro daný režim	Počet změřených režimů	Suma
Ling 25	černé uhlí I	29	140
	černé uhlí II	22	
	hnědé uhlí I	4	
	hnědé uhlí II	12	
	hnědé uhlí III	13	
	hnědé uhlí IV	11	
	hnědé uhlí V	12	
	hnědé uhlí VI	3	
	pelety I	6	
	pelety II	13	
	pelety III	15	
Ling 50	černé uhlí I	3	7
	hnědé uhlí VI	1	
	pelety IV	3	
U22	hnědé uhlí II	1	4
	hnědé uhlí III	1	
	hnědé uhlí IV	1	
	hnědé uhlí V	1	
Varimatik 25	hnědé uhlí II	2	11
	hnědé uhlí III	2	
	hnědé uhlí IV	2	
	hnědé uhlí V	2	
	hnědé uhlí VII	3	
Varimatik 40	hnědé uhlí VII	3	3
			165

TAB. Č. 20 SEZNAM PROVEDENÝCH SPALOVACÍCH ZKOUŠEK A POČET VYHODNOCENÝCH REŽIMŮ KOTLŮ

Jak je zřejmé z uvedeného rozsahu spalovacích zkoušek, není možné a ani vhodné uvádět v této publikaci výsledky všech (165) režimů. Dále budou uvedeny zajímavé dílčí výsledky včetně komentáře jednotlivých trendů a snahy o zobecnění jednotlivých závislostí.

Pro informaci o rozsahu vyhodnocení pro jednotlivé režimy je v tab. č. 21 uvedeno vyhodnocení jednoho režimu spalovací zkoušky provedené na kotli Ling 50.

10.2. Předepsané a skutečné emisní faktory

Popis možného vyjadřování emisní náročnosti výroby energie byl uveden v 9.2.12. (zde jsou uvedeny jednotlivé možnosti vyjadřování emisních faktorů). Pevné hodnoty (ve smyslu zakotvení ve vyhlášce) emisních faktorů, které jsou součástí legislativy, jsou stanoveny vyhláškou [27]. Zde jsou uvedeny hodnoty emisních faktorů pro stanovení množství emisí výpočtem. Jednotlivé emisní faktory jsou vyjádřeny jako množství dané znečišťující látky, které vznikne spálením jedné tuny (pro tuhá paliva) paliva. Emisní faktory jsou stanoveny pro:

- druh paliva
- druh topeniště
- tepelný výkon kotle

Emisní faktory použité pro bilanci emisí zdrojů REZZO3 (viz 5.2.3) byly převzaty z vyhlášky pro kategorie pevný rošt. S ohledem na skladbu používaných kotlů v ČR to byla volba vhodná. Většina spalovacích zkoušek (mimo kotel U22) byly provedeny na moderních kotlích s automatickou "kontinuální" dopravou paliva, proto bylo pro srovnání výsledných hodnot emisních faktorů použito hodnot emisních faktorů, které vyhláška předepisuje pro pásové rošty a výkon kotle do 3 MW. Výkonová úroveň 3 MW je ve velkém nepoměru ve srovnání s výkonem kotlů použitých při spalovacích zkouškách (25 až 50 kW) a předepsaná hodnota emisního faktoru je velice přísná, ale i přesto byla použita, protože neexistuje jiná. Jedná se o zjednodušení problému a o pominutí mnoha skutečností, ale pro naši potřebu je to krok možný. Dle možností bylo palivo spalováno v kotlích Ling 25, Ling 50, Varimatik 25 a Varimatik 50. Hodnoty uvedené ve sloupcových grafech představují průměrné hodnoty ze všech spalovacích zkoušek provedených pro dané podmínky (viz tab. č. 20). Porovnání nebylo provedeno pro SO₂, protože tato hodnota je jen přímo úměrná obsahu síry v palivu (s výjimkou aditivního odsiřování).

Označení kotle		Ling 50	
Datum měření		26.7.2000	
Číslo režimu		1	
Atmosférický tlak		mbar	976,9
Teplota vzduchu		°C	26,9
Vlhkost vzduchu		%	49,7
Stav provizorní klapky primárního vzduchu		bez klapky	
Doba chodu podavače		s	45
Doba klidu podavače		s	30
Čas počátku		h:min	11:20
a konce měření		h:min	12:30
Druh paliva		-	hnědé uhlí II
Spotřeba paliva (orientační)		kg/h	11,64
Výhřevnost paliva		MJ/kg	18,51
Měřený výkon kotle		kW	44,1
Vyrobené teplo		MJ/h	158,8
Tepelný příkon kotle		MJ/h	215,5
Účinnost kotle orientačně (přímá metoda)		%	73,7
Teplota spalin za kotlem		°C	297
Teplota spalin v ohništi nad retortou		°C	984
Teplota spalin v trysce prav. přední		°C	795
Teplota spalin v trysce levá přední		°C	831
Teplota spalin v trysce prav. zadní		°C	769
Teplota spalin v trysce levá zadní		°C	839
Výstupní teplota topné vody		°C	89,9
Vstupní teplota topné vody		°C	69,3
Obsah popele v surovém palivu		% _{hm.}	9,1
Obsah S v surovém palivu		% _{hm.}	0,64
Označení vzorku popele		-	VZ 381
Obsah hořlaviny v popeli (sušina)		% _{hm.}	58,53
Stupeň Bacharacha		-	2,5
Přebytek vzduchu		-	1,49
Množství suchých spalin skutečné		m ³ _N /kg	5,6
		m ³ _N /h	65,5
Obsah O ₂ v suchých spalinách		% _{obj.}	6,9
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách	CO	ppm	873
	NO _x	ppm	249
	SO ₂	ppm	735
	CO ₂	% _{obj.}	12,5
	CO ₂ + O ₂	% _{obj.}	19,5
	CO	mg/m ³ _N	1 099
	NO _x	mg/m ³ _N	510
	SO ₂	mg/m ³ _N	2 153
Koncentrace emisí v suchých spalinách při referenčním obsahu O ₂ = 6 %	CO ₂	g/m ³ _N	248
	CO	mg/m ³ _N	1 167
	NO _x	mg/m ³ _N	541
	SO ₂	mg/m ³ _N	2 285
Emisní tok	CO ₂	g/m ³ _N	264
	CO	g/h	72,0
	NO _x	g/h	33,4
	SO ₂	g/h	141,0
Měrné emise	CO ₂	kg/h	16,3
	CO	g/GJ _v	453
	NO _x	g/GJ _v	210
	SO ₂	g/GJ _v	888
	CO ₂	kg/GJ _v	102
	CO	mg/kWh	1 632
	NO _x	mg/kWh	757
Teoretický emisní tok SO ₂ ve spalinách	SO ₂	mg/kWh	3 197
	CO ₂	g/kWh	369
	Teoretická účinnost odsířování	g/h	148,8
	Hmotnostní podíl uhlíku v pevných zbytcích spalování	%	5
	Tepelný příkon kotle	%	12,86
	Hmotový tok paliva	W	59 849
	Redukovaný hm. podíl uhlíku v palivu	kg/s	0,0032
	Poměrná ztráta mechanickým nedopalem	%	37,83
	Množství spalin suchých skutečných V _{ks}	%	22,7
	Množství vodní páry V _w	m ³ ·kg ⁻¹	5,63
Poměrná ztráta citelným teplem spalin	m ³ ·kg ⁻¹	0,73	
Ztráta plynným nedopalem	%	12,9	
Účinnost nepřímou metodou	%	0,33	
Poměr účinností přímé a nepřímé	%	64,0	
Cena paliva u prodejce paliva	1	1,15	
Náklady na výrobu jednoho GJ	Kč/t	1 380	
	Kč/GJ	101	

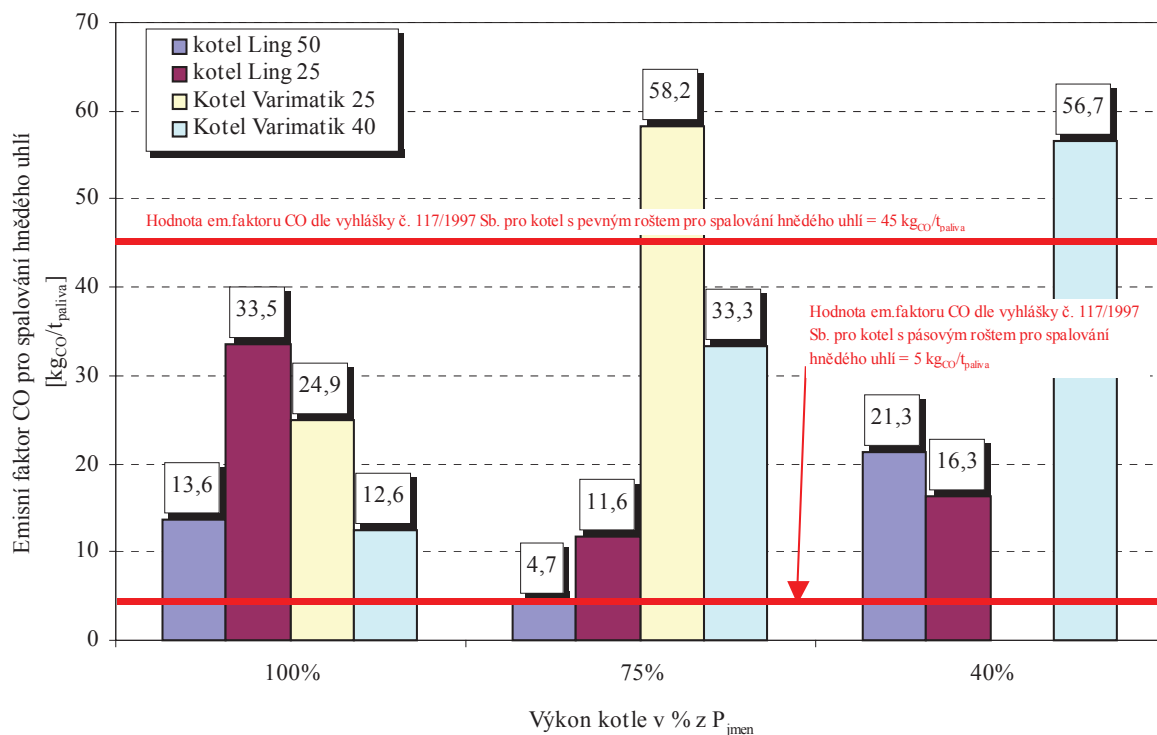
TAB. Č. 21 PŘÍKLAD KOMPLETNÍHO VYHODNOCENÍ JEDNOHO REŽIMU NA KOTLI LING 50

10.2.1. Emisní faktory CO

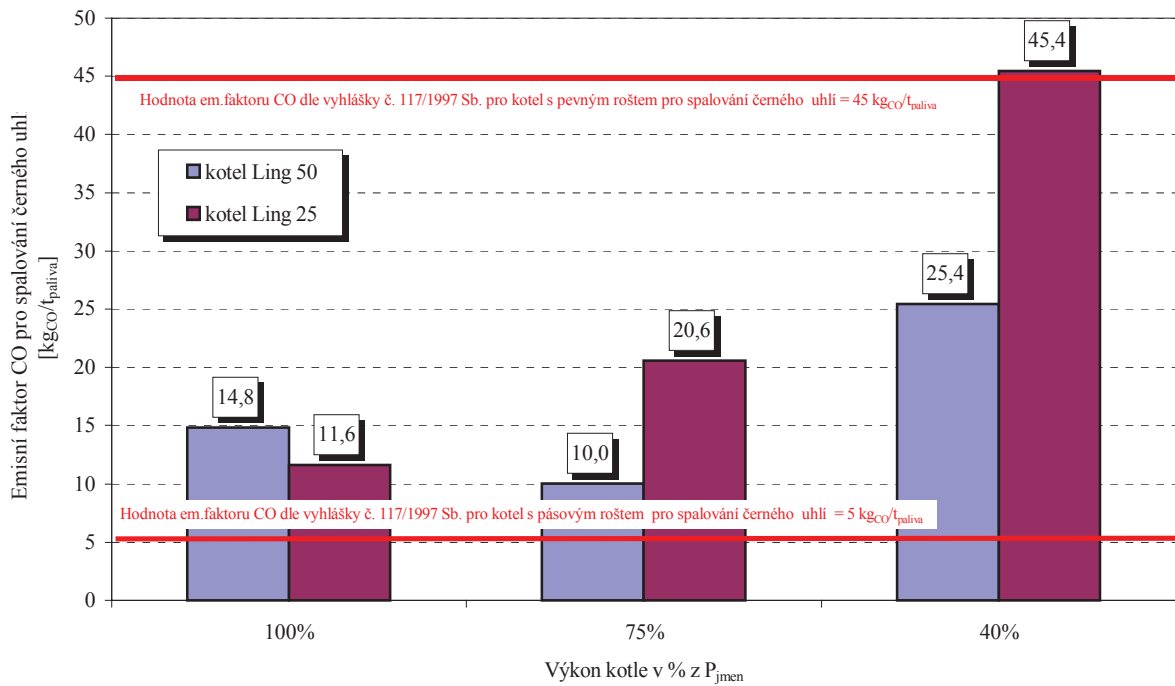
Koncentrace CO ve spalinách za kotlem nejlépe ukazuje na kvalitu spalovacího procesu. Nedohořelý CO představuje také nevyhořelou hořlavinu a pokud se zabýváme emisemi CO, zajímáme se také o účinnost spalovacího zařízení. Hodnoty předepsaných emisních faktorů jsou uvedeny přímo v příslušných grafech.

Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů pro CO při spalování hnědého uhlí, černého uhlí a biomasy je zobrazeno jako graf č. 18 až graf č. 20. Obsah CO nejlépe vyjadřuje dokonalost spalování. Z uvedených hodnot je zřejmé, že:

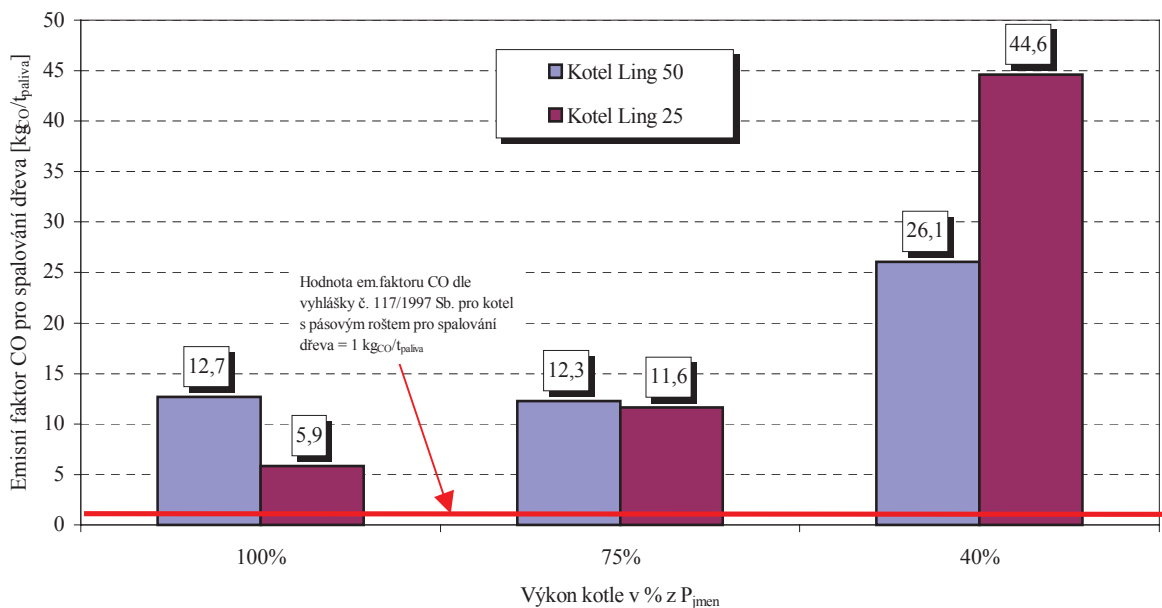
- při spalování hnědého uhlí v moderních kotlích (graf č. 18) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca $26 \text{ kg}_{\text{CO}}/\text{t}_{\text{paliva}}$, což je cca čtyřnásobné překročení předepsané hodnoty. Dokonce byly v některých případech také překročeny hodnoty emisních faktorů stanovených pro kotle s pevným roštem.
- při spalování černého uhlí v moderních kotlích (graf č. 19) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca $21 \text{ kg}_{\text{CO}}/\text{t}_{\text{paliva}}$, což je cca trojnásobně překročení předepsané hodnoty.
- při spalování biomasy v moderních kotlích (graf č. 20) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca $19 \text{ kg}_{\text{CO}}/\text{t}_{\text{paliva}}$, což je cca osmnáctinásobné překročení předepsané hodnoty.
- předepsaný emisní faktor pro spalování biomasy je přísnější než u uhlí, ale po porovnání výsledných hodnot lze konstatovat, že nižších hodnot nebylo dosaženo.



GRAF Č. 18 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A PŘEDEPSANÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ CO PRO SPALOVÁNÍ HNĚDÉHO UHLÍ



GRAF Č. 19 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A PŘEDEPSANÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ CO PRO SPALOVÁNÍ ČERNÉHO UHLÍ



GRAF Č. 20 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A PŘEDEPSANÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ CO PRO SPALOVÁNÍ BIOMASY

S ohledem na vysokou hodnotu emisního faktoru CO, kterého bylo dosaženo u kotle U22 (pro hnědé uhlí), nebylo možné tyto hodnoty zobrazit (s ohledem na přehlednost) ve výsledných grafech. Průměrné hodnoty jednotlivých emisních faktorů pro všechny kotle pro spalování hnědého uhlí jsou uvedeny v tab. č. 22.

Typ kotle		U 22	Ling 25	Ling 50	Varimatik 25	Varimatik 40	Emisní faktor dle vyhlášky
Průměrný výkon kotle	kW	27,4	17,8	30,9	19,4	28,0	
CO	mg/kWh	484 023	3 479	3 376	14 104	6 476	
	kg/t _{paliva}	1 450,1	20,5	13,2	41,5	34,2	45,0
NO _x	mg/kWh	7 685	1 180	997	881	380	
	kg/t _{paliva}	4,6	4,2	3,6	3,8	2,0	3,0
SO ₂	mg/kWh	7 108	3 842	2 547	3 581	1 935	
CO ₂	g/kWh	3 008	469	427	495		
	kg/t _{paliva}	1 742	1 747	1 673	1 739		1450

TAB. Č. 22 PRŮMĚRNÉ EMISNÍ FAKTORY PRO JEDNOTLIVÉ KOTLE ZE VŠECH ZKOUŠEK PRO SPALOVÁNÍ HNĚDĚHO UHLÍ

Srovnáním hodnot uvedených v tab. č. 22 je zřejmý zásadní rozdíl v tvorbě emisí CO při užití staré (jednorázové přiřkládání paliva, prohořivací princip pro palivo s velkým obsahem prchavé hořlaviny) a nové technologie spalování (kontinuální doprava paliva). Emise CO u kotle s prohoříváním byly cca stonásobně větší než emise CO u kotlů s kontinuální dopravou paliva. Nutno poznamenat, že velká část používaných kotlů v ČR je založena právě na prohořivacím principu hoření. Pro spalování hnědého uhlí není vhodné používat kotel s prohořivacím způsobem hoření a také v souladu s tím tento kotel (U22) je vyroben pro spalování paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny. S ohledem na vyšší cenu paliv s nízkým obsahem prchavé hořlaviny (koks, černé uhlí) se běžně v kotlích s prohořivacím principem spaluje hnědé uhlí. Jaké to má následky na navýšení množství vznikajících škodlivin ukazují výsledné hodnoty emisních faktorů.

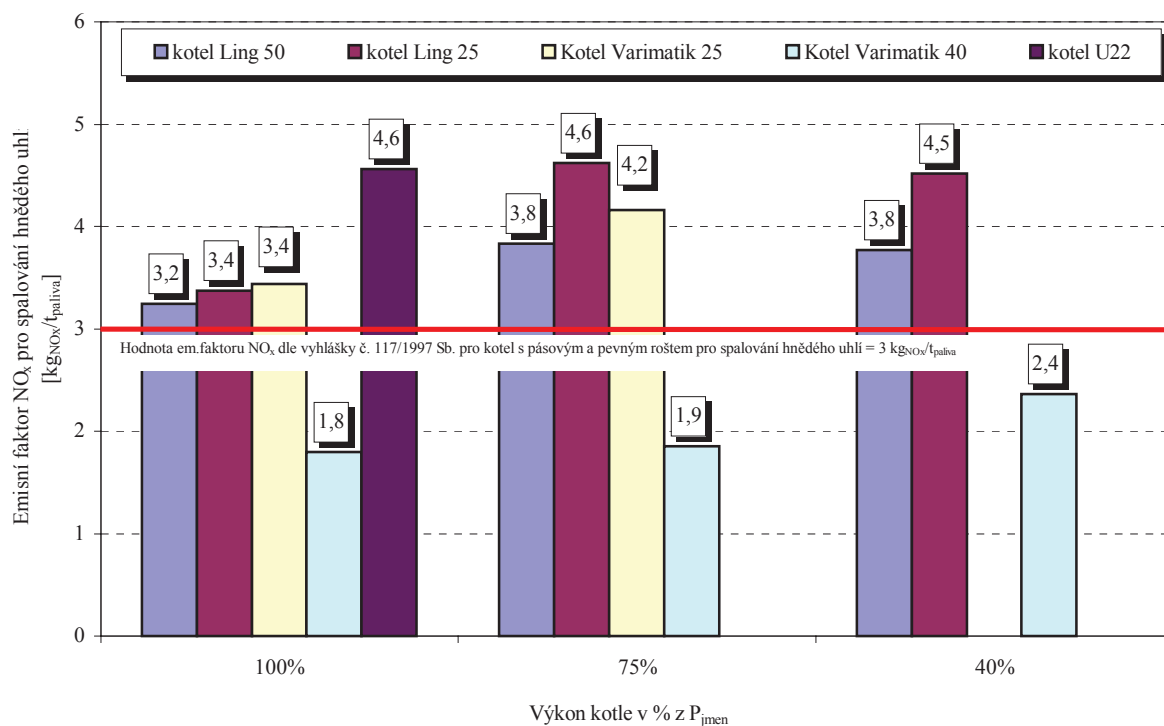
10.2.2. Emisní faktory NO_x

Porovnání skutečných a předepsaných hodnot emisních faktorů pro NO_x při spalování hnědého uhlí, černého uhlí a biomasy je zobrazeno jako graf č. 21 až graf č. 23. Z uvedených hodnot je zřejmé, že:

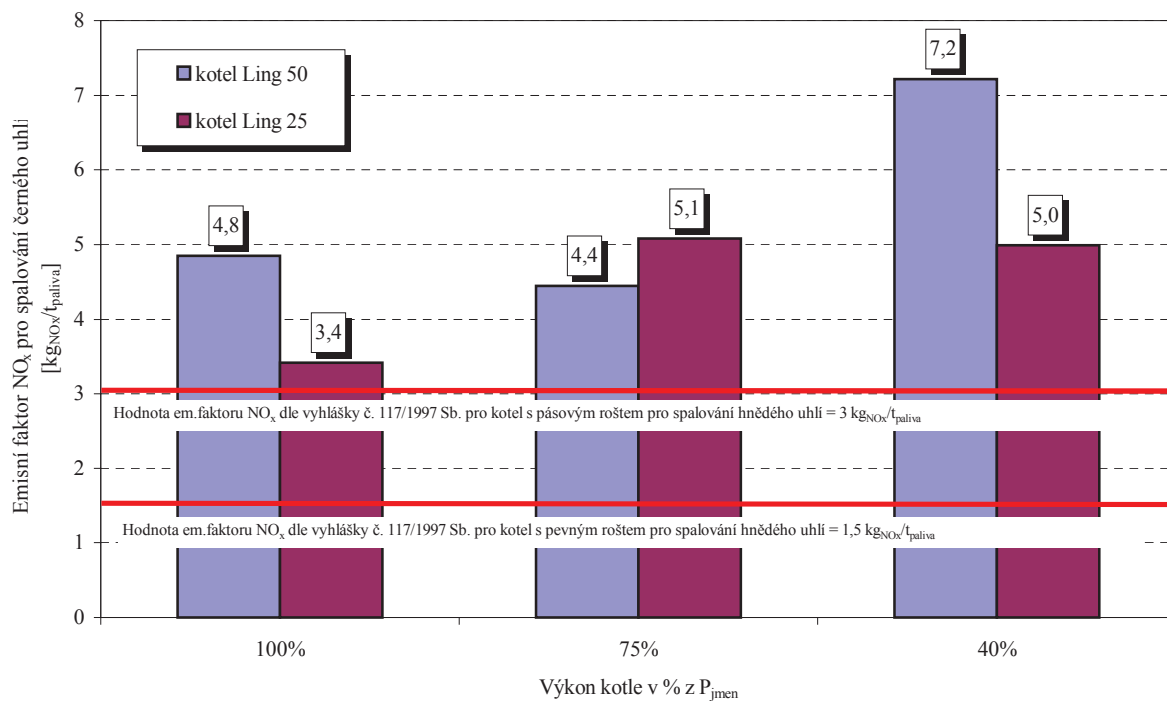
- při spalování hnědého uhlí (graf č. 21) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca 3,4 kg_{NO_x}/t_{paliva}, což představuje minimální překročení předepsané hodnoty.
- při spalování černého uhlí (graf č. 22) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca 5,0 kg_{NO_x}/t_{paliva}, což je cca dvojnásobné překročení předepsané hodnoty.
- při spalování biomasy (graf č. 23) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca 2,1 kg_{NO_x}/t_{paliva}, což je cca 70% z předepsané hodnoty.
- největší hodnoty emisních faktorů bylo dosaženo při spalování černého uhlí, což je způsobeno vyšší teplotou ve spalovací komoře a tím také větším množstvím termických NO_x.

Emise NO_x jsou nejvíce ovlivněny obsahem dusíku v palivu a teplotou ve spalovací komoře. Vysoká teplota (nad 1 000 °C) způsobuje vznik tzv. termických NO_x. Teplota v ohništích malých výkonů ve většině případů je menší než kritická hodnota, takže termické NO_x netvoří hlavní díl výsledných emisí NO_x. Hlavní podíl na tvorbě emisí NO_x má obsah dusíku v palivu. Tato skutečnost byla také potvrzena výsledky měření. Nejmenší hodnoty

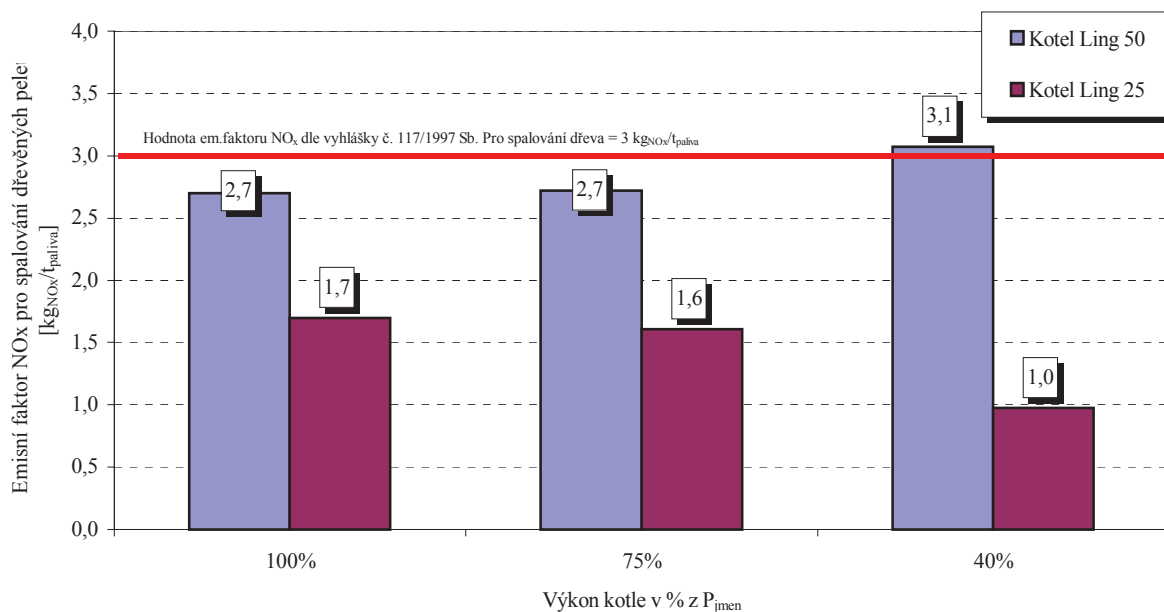
emisních faktorů bylo dosaženo při spalování pelet, což je způsobeno menším obsahem dusíku v palivu (v porovnání s uhlím).



GRAF Č. 21 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A PŘEDEPSANÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ NO_x PRO SPALOVÁNÍ HNĚDÉHO UHLÍ



GRAF Č. 22 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A PŘEDEPSANÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ NO_x PRO SPALOVÁNÍ ČERNÉHO UHLÍ



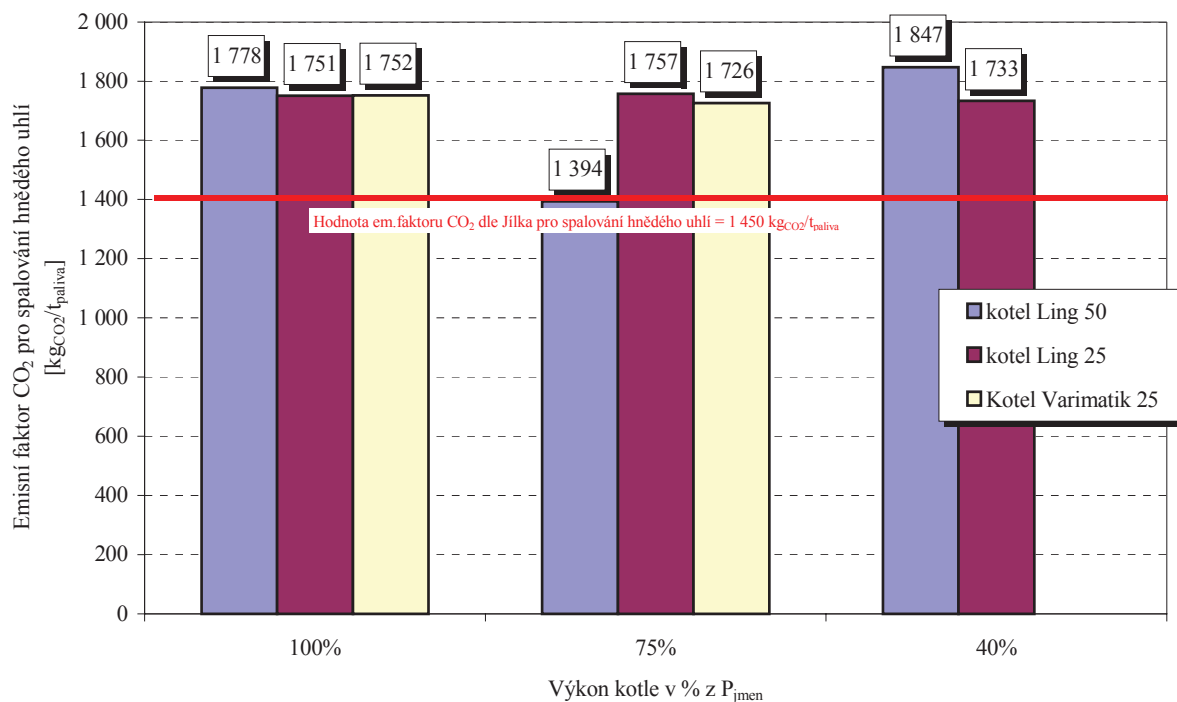
GRAF Č. 23 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A PŘEDEPSANÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ NO_x PRO SPALOVÁNÍ BIOMASY

10.2.3. Emisní faktory CO₂

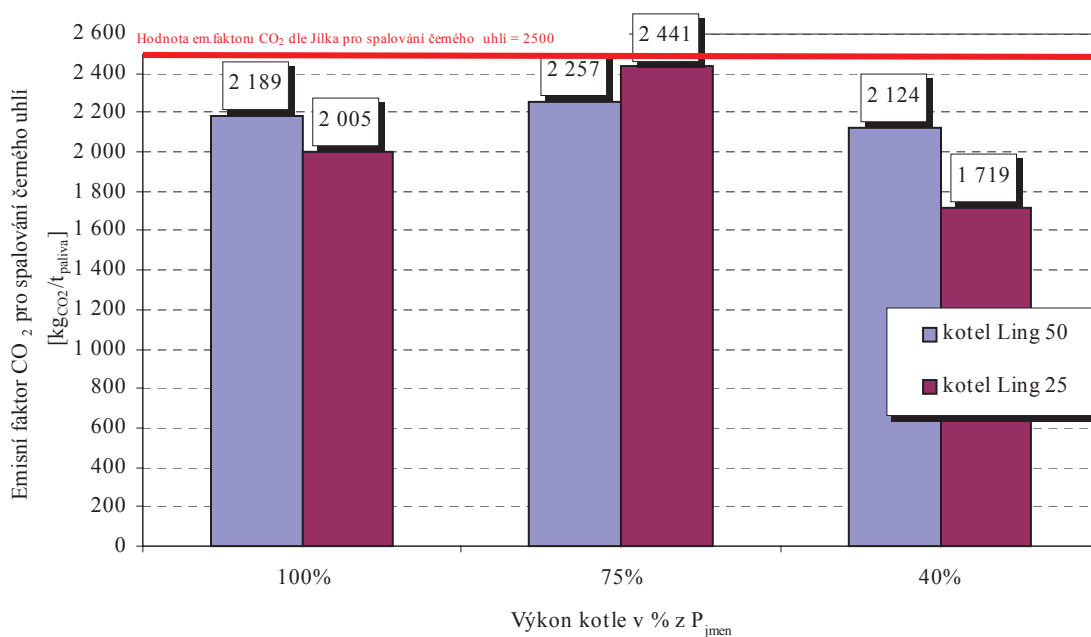
Přestože se současná legislativa nezabývá emisemi CO₂, byly pro zajímavost hodnoty skutečných emisních faktorů dosažených při spalovacích zkouškách pro CO₂ srovnány s hodnotami uváděnými v literatuře [25], které se používají při bilanci emisí z malých zdrojů znečištění ovzduší (viz tab. č. 14).

Porovnání bylo s ohledem na tok uhlíku při spalování biomasy provedeno pouze pro spalování černého a hnědého uhlí (viz graf č. 24 a graf č. 25). Z uvedených hodnot je zřejmé, že:

- při spalování hnědého uhlí (graf č. 24) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca 1 717 kg_{CO2}/t_{paliva}, což představuje překročení hodnoty uváděné v literatuře cca o 20%.
- při spalování černého uhlí v moderních kotlích (graf č. 25) byla průměrná hodnota emisních faktorů cca 2123 kg_{CO2}/t_{paliva}, což je cca o 15% méně než je hodnota uváděná v literatuře.



GRAF Č. 24 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A DOPORUČENÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ CO₂ PRO SPALOVÁNÍ HNĚDÉHO UHLÍ



GRAF Č. 25 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH A DOPORUČENÝCH HODNOT EMISNÍCH FAKTORŮ CO₂ PRO SPALOVÁNÍ ČERNÉHO UHLÍ

10.3. Závislost tvorby emisí na změně výkonu kotle

Je zřejmé, že s měnícím se výkonem kotle se značně mění většina parametrů, které přímo ovlivňují tvorbu znečišťujících látek a účinnost zařízení. Hlavně dochází ke změně:

- přebytku spalovacího vzduchu
- teploty spalin v ohništi
- tlakových poměrů v ohništi

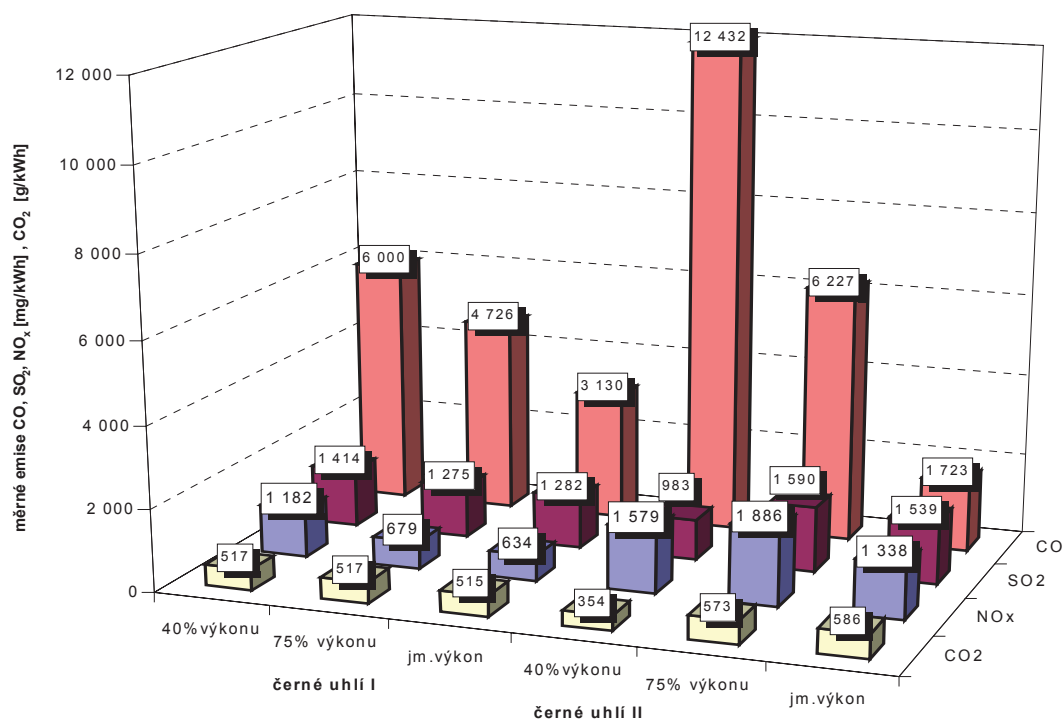
- množství spalin
- tvaru ohniště (množství a tvar spečence popeloviny v ohništi)
- množství nedopalu v tuhých zbytcích po spalování

Vývoj tvorby emisí při změně výkonu kotle Ling 25 při spalování dvou typů černých uhlí je zobrazen jako graf č. 26. V grafu je vidět jednoznačná závislost tvorby CO na výkonu kotle. Se snižujícím se výkonem kotle dochází k značnému nárůstu množství emisí CO ve spalinách. U černého uhlí I byl nárůst CO dvojnásobný a u černého uhlí II byl nárůst až sedminásobný. Tento nárůst je způsoben hlavně zvyšujícím se přebytkem vzduchu, což způsobuje snížení teploty spalin ve spalovací komoře a plynný CO má horší podmínky pro reakci s kyslíkem.

Emise SO₂ jsou na výkonu nezávislé a jsou dány pouze obsahem spalitelné síry v palivu popřípadě také obsahem látek alkalických vlastností (v popelovině).

Emise NO_x se více měnily s typem uhlí než se změnou výkonu. Pro černé uhlí II byly naměřeny vyšší emise NO_x ve srovnání s emisemi vzniklými při spalování černého uhlí I. Tato skutečnost je hlavně způsobena vyšší teplotou ve spalovací komoře, která byla naměřena při spalování černého uhlí II a tím samozřejmě došlo k nárůstu termických NO_x.

Hodnoty měrných emisí CO₂ byly v podstatě na stejné úrovni pro jednotlivé druhy černých uhlí a neměnily svou hodnotu v závislosti na změně výkonu kotle.

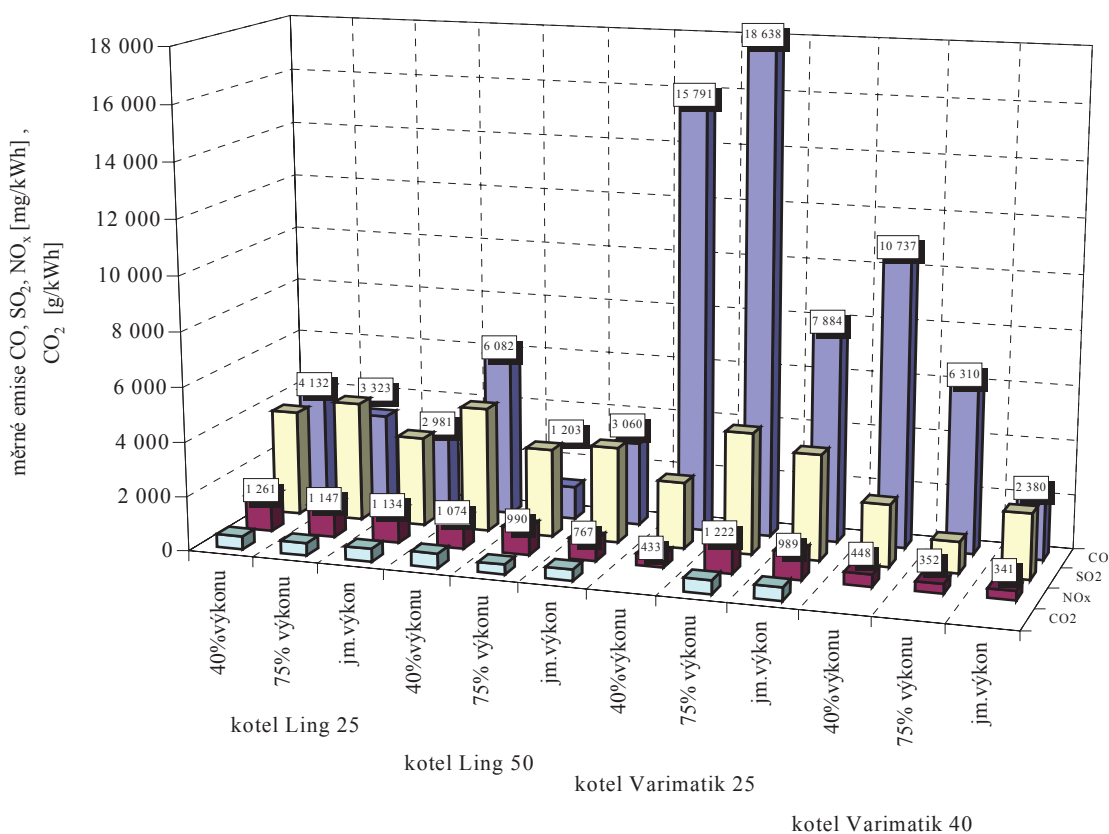


GRAF Č. 26 ZÁVISLOST MĚRNÝCH EMISÍ NA VÝKONU KOTLE LING 25 PŘI SPALOVÁNÍ DVOU DRUHŮ ČERNÉHO UHLÍ

Vývoj tvorby emisí při změně výkonu kotlů Ling 25, Ling 50, Varimatik 25 a Varimatik 40 při spalování hnědých uhlí je zobrazen jako graf č. 27. V grafu je vidět závislost tvorby CO na výkonu kotle. Se snižujícím se výkonem kotle dochází k značnému nárůstu množství emisí CO ve spalinách. Tento nárůst (včetně absolutní hodnoty) má různou hodnotu v závislosti na typu použitého spalovacího zařízení. Největší nárůst tvorby CO byl zaznamenán u kotle Varimatik 40, jeho hodnota byla cca 3,5.

Emise SO₂ jsou na výkonu nezávislé a jsou dány pouze obsahem spalitelné síry v palivu, popřípadě také obsahem látek alkalických vlastností (v popelovině). Kolísání výsledných hodnot koncentrací je dán nehomogenním složením uhlí.

Hodnoty měrných emisí CO₂ byly v podstatě na stejné úrovni pro jednotlivé druhy kotlů a neměnily svou hodnotu v závislosti na změně výkonu kotle.



GRAF Č. 27 ZÁVISLOST MĚRNÝCH EMISÍ NA VÝKONU KOTLE LING 25, LING 50, VARIMATIK 25 A VARIMATIK 40 PŘI SPALOVÁNÍ HNĚDĚHO UHLÍ

Z výše uvedených skutečností vyplývá jednoznačná závislost zvýšené tvorby emisí CO na snižujícím se výkonu kotle. Tato závislost byla potvrzena také při spalování biomasy. Pro ostatní základní znečišťující látky nebyla závislost na změně výkonu kotle potvrzena. Z pohledu množství tvorby škodlivin je tedy jednoznačným přínosem provozovat kotel po maximálně možné dobu pouze při jmenovitém výkonu, kdy jsou environmentální požadavky na provoz kotle plněny v maximální míře. Toto je ve velké většině případů reálného provozu

pouhá fikce a nesplnitelný požadavek. Kotle v běžném provozu pracují při jmenovitém výkonu jen v době velké potřeby tepla (teplota okolí menší než -5°C).

V ostatních ročních obdobích, kdy není tak velká potřeba tepla mohou nastat dva případy:

- kotel je nastaven (z pohledu příkonu) na jmenovitý výkon

V takovémto případě nastane stav, kdy kotel s ohledem na velké nastavení dodávky paliva do ohniště a sníženou potřebu poptávky tepla bude v krátkých časových úsecích zapínán a vypínán (přerušovaný provoz). Doba, kdy kotel najíždí z útlumového stavu (nastane po překročení požadované teploty vzduchu v místnosti, nebo po překročení maximální teploty výstupní topné vody z kotle) na výkon, je provázena nadměrnou tvorbou škodlivin, protože se jedná o přechodový stav, kdy dochází k postupnému zahřívání spalovací komory a zvyšování výkonu. Tento přechodový stav trvá cca 15 minut. Je zřejmé, že pokud bude docházet k častému přechodu kotle do útlumového stavu, bude výhoda (z pohledu nižší tvorby emisí CO) jmenovitého výkonu negována zvýšenou tvorbou CO při přechodových stavech.

- kotel má nastaveno podávání paliva na snížený výkon

Kotel bude provozován při sníženém výkonu, což bude provázeno zvýšenou tvorbou emisí CO dle výše uvedených závislostí. S ohledem na menší požadavek výroby tepla bude kotel provozován v delších časových úsecích bez přerušení provozu a tím tedy budou omezeny negativní přechodové stavy.

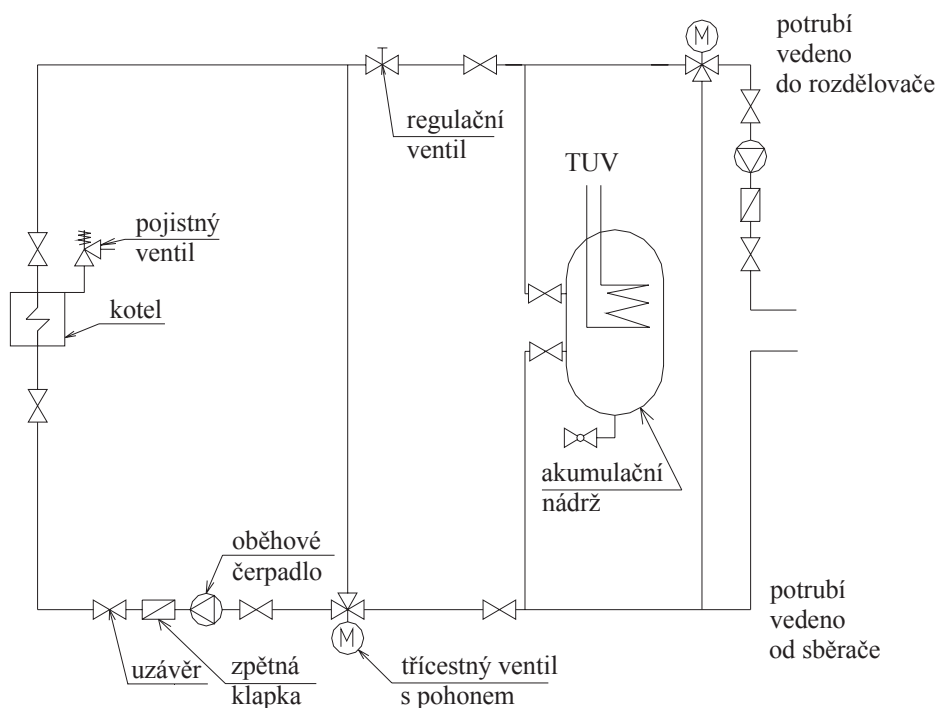
Spojení uvedených poznatků o zvýšené tvorbě CO je technicky řešitelné pomocí provozování kotle v systému společně s akumulací nádobou. To zajistí po maximálně možnou dobu bez přerušení chodu kotle jeho provozování při jmenovitém výkonu. Jednoduchý příklad zapojení akumulací nádoby do topného systému je na obr. č. 23. Základní logika provozování je:

- v případě požadavku na teplo pro topení v obytných prostorách, je kotel přepnut z útlumového stavu do stavu pracovního při nastavení podávání paliva pro jmenovitý výkon kotle. Topná voda je vedena přímo do rozdělovačů a dále k topným tělesům, kde předá své teplo na ohřátí vzduchu v místnostech.
- po dosažení teploty vzduchu v místnosti s termostatem není již topná voda vedena k topným tělesům, ale je pomocí regulačních členů vedena do akumulací nádoby, kde dochází s ohledem na její objem k na-akumulování tepla.
- po "nabití" akumulací nádoby teplem (zvýšení teploty vratné vody) dojde k přepnutí kotle do útlumového stavu.
- požadavek na topení (termostat v místnosti) je nadřazen "nabíjení" nádrže. Pokud se v době "nabíjení" tento požadavek vyskytne je "nabíjení" přerušeno a vyrobené teplo obsažené v topné vodě, jde do rozdělovače a dále k topným tělesům.

- pokud je kotel v útlumovém stavu a vyskytne se požadavek na teplo je nejdříve teplo bráno z akumulární nádoby a až po určitém "vybití" nádoby je kotel přepnut do stavu pracovního.

Uvedený systém tedy umožní (dle navrženého objemu akumulární nádoby) provozovat kotel při jmenovitém výkonu bez přerušení provozu i v případě menšího požadavku na výrobu tepla. Příklad takového provozu může být, že v průběhu jednoho dne topné sezóny bude kotel provozován cca 10 h. Za tuto dobu dojde k "nabití" akumulární nádoby a po zbytek dne bude kotel v útlumovém stavu.

Systém s akumulární nádobou může mít také přínosné využití při provozování kotlů staré konstrukce. Tyto kotle byly často navrženy jako značně předimenzované, což také vede k zvýšené tvorbě emisí a k problematickému a nepohodlnému provozování. Kotel po dosažení jmenovitého výkonu relativně v krátkém čase uspokojí potřebu tepla, ale regulace (snížení) výkonu je velice problematické (při jednorázovém přikládání je palivo po přiložení v kotli a není tedy možné dále jeho přívod do doby vyhoření regulovat). Částečně se dá výkon regulovat snížením přebytku vzduchu (uzavření klapky primárního vzduchu a kouřové klapky), což je, ale doprovázeno velkým nárůstem emisí CO. Zapojení takového kotle umožní provozování předimenzovaného kotle při optimálním stavu (topí do systému a přebytek požadovaného tepla se "ukládá" do akumulární nádoby). Umožní také snížení periody přikládání a optimální využití vyrobeného tepla (nedochází k přetopení místností, do otopných těles jde jen teplo, které je požadováno).



OBR. Č. 23 PŘÍKLAD ZAPOJENÍ AKUMULAČNÍ NÁDOBY DO SYSTÉMU

Samozřejmě jsou uvedené výhody pro používání akumulční nádoby doprovázeny negativními skutečnostmi, které brání jejich většímu využití. Hlavní negace je samozřejmě pořizovací cena. Jako další skutečnosti, které ukazují proti užití akumulčních nádob jsou potřeba místa pro jejich instalaci, nutnost manipulačního prostoru pro dopravu nádrží, značná hmotnost napuštěných nádrží, ztráta tepla do okolí z nádrží.

Současný postoj legislativy nijak nezohledňuje zvýšenou tvorbu emisí CO se sníženým výkonem. Limity, dle kterých jsou kotle zařazeny do jednotlivých kategorií při posuzování shody jsou stanoveny pro jmenovitý výkon kotle, ale naproti tomu norma [13] vyslovuje požadavek, že kotel musí být schopen provozování při třiceti procentech jmenovitého výkonu. Tento požadavek je ve světle výše uvedených skutečností přinejmenším neadekvátní. Také skutečnost, že výrobci uvádějí možnost regulovat výkon kotle ve velkém rozsahu jako značnou výhodu, je z pohledu tvorby emisí nevýhodou.

10.4. Závislost tvorby emisí na typu spalovacího zařízení

Spalovací zkoušky byly provedeny na pěti kotlích představujících spalovací zařízení používajících tři rozdílné principy technologie spalování (viz 9.3). Jedná se o:

- prohořívající princip (kotel U22)
- princip otočného válcového roštu (kotel Varimatik 25 a Varimatik 40)
- princip spodního přívodu paliva do retorty (kotel Ling 25 a Ling 50)

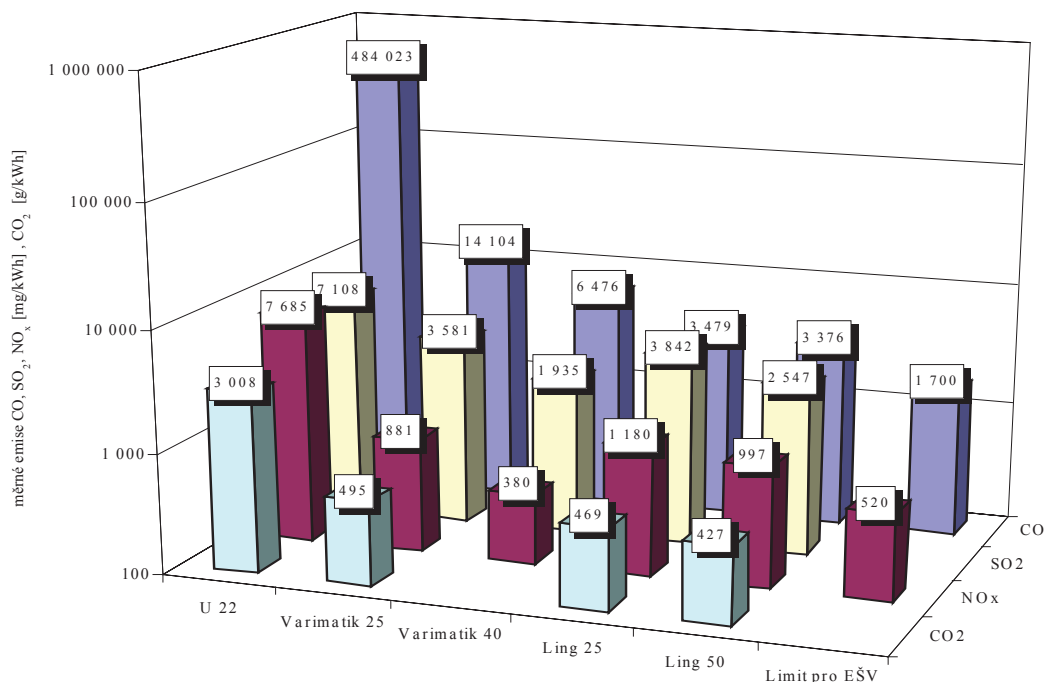
Výsledky jednotlivých spalovacích zkoušek pro spalování hnědého uhlí jsou zobrazeny jako graf č. 28. Pro možnost porovnání jsou v grafu uvedeny také hodnoty limitů, které byly stanoveny jako požadavky pro propůjčení ochranné známky ekologicky šetrný výrobek pro kotle a lokální spotřebiče na tuhá paliva (v současné době jsou předepsány limity pouze pro spalování biomasy, pro spalování uhlí a koksů bylo propůjčování ochranné známky zrušeno).

Z uvedených hodnot je zřejmé, že hodnoty limitů pro udělení ochranné známky byly postaveny velice přísně a výrobek, který jim vyhověl, představoval vyspělý stupeň technologie.

Dále je zřejmé, že moderní technologie (kontinuální přívod paliva) produkují cca sto násobně méně emisí CO než staré technologie (jednorázový způsob přívodu paliva). Dle výsledků je možno konstatovat, že u kotlů využívající spodní přívod paliva do ohniště bylo dosaženo menší tvorby emisí CO než u kotlů využívající princip otočného válcového roštu.

Jistě by bylo zajímavé porovnat produkci emisí ještě s kotlem používajícím odhořívací princip. To již s ohledem na rozsah prací nebylo provedeno, ale dá se předpokládat, že by se

hodnoty emisí pohybovaly mezi hodnotami dosaženými u kotlů používajících prohořivací princip a u kotlů používajících princip otočného válcového roštu.



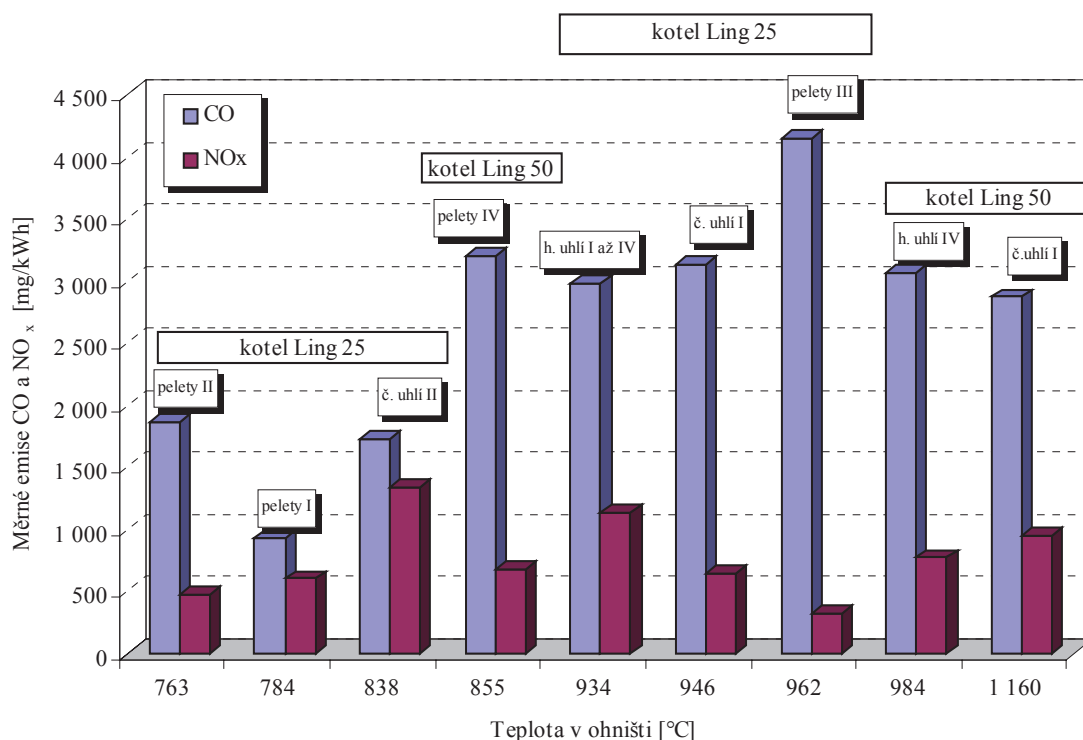
GRAF Č. 28 MĚRNÉ EMISE PŘI SPALOVÁNÍ HNĚDĚHO UHLÍ V KOTLÍCH U22, VARIMATIK 25, VARIMATIK 40, LING 25 A LING 50

10.5. Teplota v ohništi a tvorba emisí

Teplota plamene ve spalovací komoře byla měřena pouze v kotlích Ling 25 a Ling50. Termočlánek byl do ohniště přiveden přes výměník a cca 150 mm od konce zafixován keramickým stabilizátorem o stěnu kotle. Instalace termočláneků v ohništi kotlů Varimatik nebyla provedena s ohledem na nemožnost upevnění termočláneku v ohništi.

Hodnoty měrných emisí CO a NO_x v závislosti na teplotě ve spalovací komoře pro spalování jednotlivých druhů paliv v kotlích Ling 25 a Ling 50 jsou zobrazeny jako graf č. 29. Teplota v ohništi se pohybovala v rozmezí cca 750 až 1150 °C. Největších teplot bylo dosaženo při spalování černého uhlí v kotli Ling 50. Z uvedených hodnot měrných emisí NO_x není patrná přímá závislost teploty v malých ohništích na tvorbě emisí NO_x. Domnívám se, že větší závislost tvorby NO_x je patrná na typu paliva (nižší NO_x u biomasy). S ohledem na sledované trendy a hodnoty teploty ve spalovací komoře lze předpokládat, že naměřené NO_x jsou převážně palivové a podíl termických NO_x je malý. Výše uvedené závěry o tvorbě NO_x jsou spíše úvahy a nelze je zcela jednoznačně potvrdit dosaženými výsledky při experimentech.

Z pohledu emisí CO je teplota v ohništi dostatečná pro dooxidování této složky a její hodnota je ovlivněna spíše jinými faktory (doba setrvání v pásmu vysokých teplot).



GRAF Č. 29 ZÁVISLOST MĚRNÝCH EMISÍ CO A NO_x NA TEPLOTĚ VE SPALOVACÍ KOMOŘE KOTLŮ LING 25 A LING 50

10.6. Odsiřování v roštových kotlích malých výkonů

Emise oxidu siřičitého ze zařízení spalujících uhlí jsou jedním z nejdéle známých environmentálních problémů a jejich důsledky jako smog londýnského typu nebo kyselá dešť jsou dobře známé. Snaha o omezení těchto negativních vlivů vede k rostoucím požadavkům na odsiřování a to nejen u velkých, ale také u středních a malých zdrojů. Různé typy odsiřování velkých energetických zařízení jsou poměrně dobře zvládnuté technologie a během minulých 10-ti let se podařilo dosáhnout významného snížení emisí z těchto zdrojů. Tím vystoupily do popředí také malé a střední zdroje, které jsou významným zdrojem znečištění hlavně na lokální úrovni a kterým je proto věnována zvyšující se pozornost.

V České republice i v dalších zemích střední Evropy je stále provozován velký počet roštových kotlů malého a středního výkonu, a proto zde existuje snaha po snížení emisí z těchto zdrojů. S ohledem na skutečnost, že nejjednodušší a rekonstrukci nevyžadující technika odsiřování je u těchto zařízení použití upraveného paliva, roste také zájem o použití aditiv, která by zachytila oxid siřičitý v popelu či škváře a tak zabránila jeho úniku do ovzduší. Cílem tohoto příspěvku je upozornit na některé rozdíly roštových kotlů proti

práškovým či fluidním a provést rozbor problémů, s nimiž se setkáme při snahách o odsíření spalin z roštových kotlů aditivací paliva.

10.6.1. Mechanismus odsíření a specifika roštových kotlů

Vynecháme-li odsiřovací techniky využívající snižování obsahu síry v palivu, všechny odsiřovací metody jsou založeny na stejném principu: plynný oxid siřičitý vzniklý oxidací síry z paliva je zachycen na tuhé či kapalně fázi, tím oddělen od proudu spalin a sorbující médium se zachycenými oxidy síry separováno a popřípadě dále zpracováno. Ve většině případů je k zachycení využito kyselých vlastností oxidů síry a sorbentem je alkalický materiál nejčastěji na bázi vápníku. K úspěšnému odsíření je nutné dodržet základní podmínky:

- dostatečnou afinitu sorbentu k SO_2 v konkurenci ostatních reakcí,
- dostatečně velkou reakční plochu (malou velikost částic či kapiček, popř. poréznost),
- dostatečně dlouhou dobu styku mezi spalinami a sorbujícím médiem,
- vhodnou teplotu.

Z těchto důvodů jsou nejúčinnější techniky používající jemně mletý materiál nebo drobné kapičky sorbentu v geometrickém uspořádání umožňujícím delší dobu styku se spalinami.

Při odsiřování spalin je využívána reakce mezi oxidem siřičitým a alkalickým sorbentem a podle typu odsíření je sorbent dávkován do horní části spalovací komory, do sekundárního vzduchu a nebo přidáván k palivu. Hoření uhlí na roštu lze rozdělit do tří fází (sušení a předehřev paliva zde nejsou uvažovány, protože nezahrnují procesy chemických přeměn):

- **Uvolnění prchavé hořlaviny z uhlí.** Při pyrolýze se z uhlí uvolňují organické sloučeniny, vodík, voda a oxid uhelnatý. Organicky vázané sloučeniny síry přecházejí do plynné fáze a to jako sulfan (sirovodík), organické sulfidy a síru obsahující heterocyklické organické látky. Jak ve vrstvě paliva, tak v plynné fázi nad ní jsou redukční podmínky, emise tudíž obsahují velké množství CO.
- **Vyhořívání uhlíku** (polokoksu, koksu) po odplynění uhlí. V této fázi jsou ve vrstvě paliva na roštu stále redukční podmínky, tvořené v plynné fázi oxidem uhelnatým a v tuhé fázi uhlíkem, v ohništi nad roštem se pak redukční podmínky postupně mění z redukčních na oxidační.
- **Dohořívání paliva** – v této poslední fázi dochází k dohoření zbylého uhlíku.

Tyto fáze po sobě následují na pohyblivém roštu podle polohy, na pevném roštu s periodickým přikládáním (např. klasická kamna) v čase.

Dosud užívané odsiřovací technologie používají záchyt SO_2 pomocí alkalického sorbentu, přičemž problém redukčních oblastí plamene nehraje významnější roli. Při aditivním odsiřování u roštových kotlů je však situace odlišná, a proto pro posouzení fyzikálně-chemických podmínek pro použití této techniky byl proveden rozbor termodynamických

podmínek v ohništi. Pozornost byla zaměřena na možné reakce síry vedoucí k jejímu zachycení nebo naopak uvolnění do spalin.

10.6.2. Termodynamický rozbor možných reakcí

Pro posouzení možnosti průběhu chemických reakcí jsou používány termodynamické výpočty vycházející z fyzikálně-chemických vlastností látek. Jednou z možností, které termodynamika poskytuje, je výpočet samovolnosti děje a v případě více vzájemně konkurenčních dějů také výpočet toho, který z dějů bude za daných podmínek (teplota, složení směsi...) probíhat s největší pravděpodobností, tj. jaký bude konečný výsledek reakce.

Termodynamika chemických reakcí [15]

Měřítkem samovolnosti chemické reakce je její afinita A_p :

$$A_p = f(p, T, a) = -\Delta G^\ominus \quad (15)$$

kde p je tlak soustavy
 T teplota soustavy
 a_i aktivita i -té složky
 ΔG^\ominus změna Gibbsovy energie chemické reakce, pro kterou platí:

$$\Delta G^\ominus = \Delta G_{(\text{prod})}^\ominus - \Delta G_{(\text{v. látek})}^\ominus \quad (16)$$

kde $\Delta G_{(\text{prod})}^\ominus$ je Gibbsova energie produktů chemické reakce
 $\Delta G_{(\text{v. látek})}^\ominus$ Gibbsova energie výchozí látky chemické reakce

$$\Delta G^\ominus = \sum \mu_i \cdot dn_i \quad (17)$$

kde μ_i je chemický potenciál i -té složky,
 n_i počet molů i -té složky, i se sčítá přes všechny složky soustavy

Je-li $\Delta G^\ominus = 0$ znamená to, že daná reakční směs za podmínky konstantní teploty a tlaku je v rovnovážném stavu, chemická reakce neprobíhá. Je-li $\Delta G > 0$, pak za daných podmínek reakci nelze uskutečnit, pokud není soustavě zvnějšku dodaná kladná neobjemová práce. Reakce probíhá samovolně v případě, kdy $\Delta G < 0$. Čím je ΔG vzdálenější od nuly, tím dále má reakce do rovnováhy. Úbytek Gibbsovy energie se často nazývá hnací silou chemické reakce. Její hodnota závisí na koncentracích výchozích látek i produktů, na jejich chemické konstrukci a konečně teplotě a tlaku, neboť tyto veličiny rozhodují o parciálních molárních energiích výchozích látek i produktů.

Chemická afinita je podmínkou nutnou k tomu, aby chemická reakce mohla proběhnout. Na druhé straně však sama skutečnost, že hnací síla chemické reakce je velká neznámá, že reakce musí probíhat za jakýchkoliv podmínek. O tom zda reakce proběhne v reálném čase

současně s chemickou afinitou rozhoduje rychlost chemické reakce, se kterou se soustava blíží k rovnovážnému stavu.

Hnací sílu chemické reakce lze vypočítat z hodnot standardních slučovacích Gibbsových energií látek, které jsou pro standardní podmínky (tj. teplotu $T = 273 \text{ K}$ a $p = 101,325 \text{ kPa}$) tabelovány, pomocí vztahu:

$$\Delta G^\ominus - \Delta H^\ominus = T \cdot \left(\frac{\partial \Delta G^\ominus}{\partial T} \right)_p \quad (18)$$

kde ΔH^\ominus je reakční teplo, které je funkcí tlaku a teploty.

Pro chemickou reakci v i -složkovém systému platí:

$$\Delta H^\ominus = \sum n_i \cdot H_i^\ominus \quad (19)$$

kde H_i^\ominus je standardní slučovací entalpie i -té složky systému

Pro teplotní závislost tepelného efektu chemické reakce platí Kirchhoffova rovnice, z které po úpravě vyplývá následující vztah:

$$\Delta H^\ominus = \sum n \int C_p^\ominus \cdot dT \quad (20)$$

kde C_p^\ominus je molární tepelná kapacita při konstantním tlaku.

Rovnici integrujeme od teploty T_1 do T_2 , teplota T_1 je shodná s teplotou standardní (273 K).

Závislost C_p^\ominus na teplotě lze určit pro určitý obor teplot a lze ji vystihnout rovnicí:

$$C_p^\ominus = A + B \cdot 10^{-3} \cdot T + C \cdot 10^5 \cdot T^{-2} + D \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (21)$$

kde A, B, C a D jsou konstanty, které lze nalézt v termodynamických tabulkách

Pro změnu molární tepelné kapacity platí:

$$\Delta C_p^\ominus = \Delta A + \Delta B \cdot 10^{-3} \cdot T + \Delta C \cdot 10^5 \cdot T^{-2} + \Delta D \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (22)$$

Výsledný vztah, který umožňuje vypočítat změnu standardní Gibbsovy energie chemické reakce pro teplotu T , je:

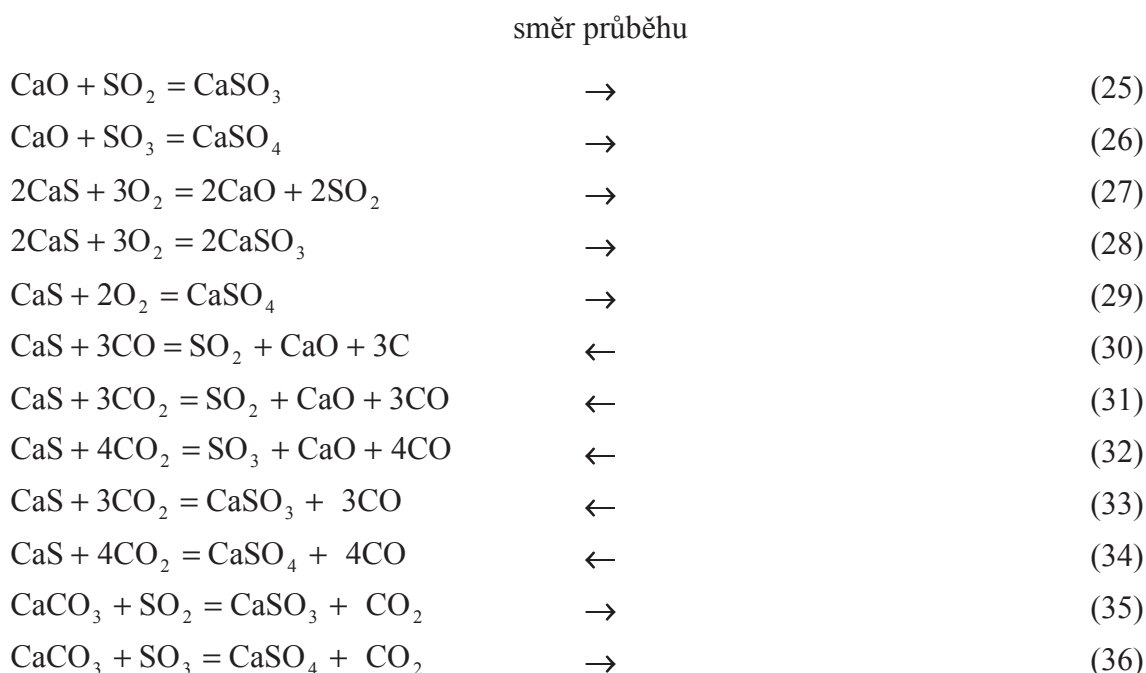
$$\Delta G_T^\ominus = \Delta H_{298}^\ominus - T \Delta S_{298}^\ominus - T \cdot \int_{298}^T \Delta C_p^\ominus \cdot T^{-1} \cdot dT + \int_{298}^T \Delta C_p^\ominus \cdot dT \quad (23)$$

$$\Delta G_T^\ominus = \Delta H_{298}^\ominus - T\Delta S_{298}^\ominus - T \cdot \int_{298}^T (\Delta A \cdot T^{-1} + \Delta B \cdot 10^{-3} + \Delta C \cdot 10^5 \cdot T^{-3} + \Delta D \cdot 10^{-6} \cdot T) \cdot dT + \\ + \int_{298}^T (\Delta A + \Delta B \cdot 10^{-3} \cdot T + \Delta C \cdot 10^5 \cdot T^{-2} + \Delta D \cdot 10^{-6} \cdot T^2) \cdot dT \quad (24)$$

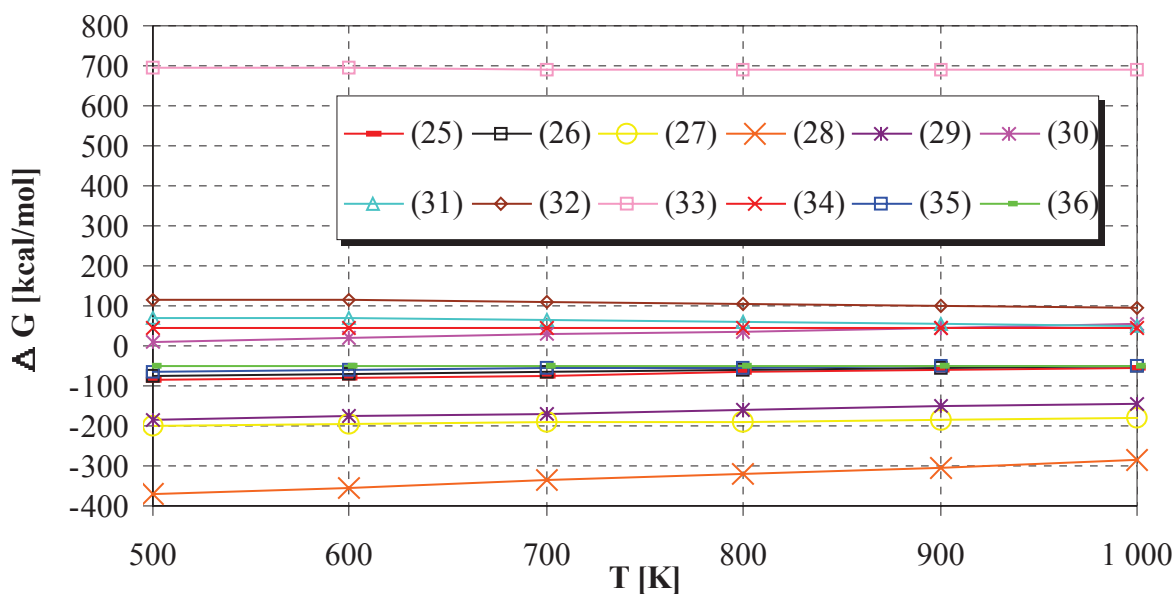
Reakce sloučenin síry při hoření uhlí a odsiřování

V energetice nejčastěji používané sorbenty jsou látky na bázi sloučenin vápníku (oxid, hydroxid, uhličitan...), a proto byl termodynamický rozbor proveden právě pro vápenaté sloučeniny. Výpočty Gibbsovy energie byly provedeny pro teplotní rozmezí 500-1000 K, vyšší teploty nebylo možno vzít do výpočtu kvůli nedostupnosti TDM dat. Byl studován průběh reakcí (25) až (36).

Reakce vápenatých sloučenin, pro něž byly provedeny výpočty Gibbsovy energie:



Protože v uvedeném rozsahu teplot nedochází ke změně znaménka ΔG u žádné z uvedených reakcí (25) až (36), je u chemických rovnic uveden směr, kterým bude příslušná reakce samovolně probíhat. Celkový přehled o průběhu ΔG reakcí a o jejich velikosti je označen jako graf č. 30.



GRAF Č. 30 ZMĚNA GIBBSOVY ENERGIE REAKCÍ (25) AŽ (36)

Diskuse výsledků termodynamického rozboru chemických reakcí

Z grafu zobrazující změnu Gibbsovy energie (viz graf č. 30) lze vyčíst, zda může některá z reakcí (25) až (36) probíhat, respektive v jakém směru bude její samovolný průběh. Reakce (25) až (29), (35) a (36), u nichž je ΔG záporné, budou probíhat ve směru zleva doprava a to tím snadněji, čím více je ΔG záporné. Naproti tomu reakce (30) až (34) mohou samovolně probíhat pouze zprava doleva, tj. v opačném směru, než je proveden zápis. Znamená to, že v redukční oblasti spalování dochází k redukci jak oxidu siřičitého, tak i síranu a siřičitanu vápenatého na sulfid. Z hlediska reakcí ovlivňujících zachycování nebo uvolňování síry v jednotlivých stádiích hoření v roštovém kotli lze vyvodit tyto závěry:

V prvním stádiu, tj. při odplynění uhlí, nemůže docházet k zachycení SO_2 . Organické sloučeniny síry přecházejí do plynné fáze v redukované formě (H_2S , organické sulfidy, heterocyklické sloučeniny). Sorbent v uhlí navíc nepřichází do styku s oxidem siřičitým, ale jen s redukovanými formami síry. Pokud dojde k procesům umožňujícím odsíření, tak jen ke vzniku CaS . V této fázi by patrně ani přídavek sorbentu do spalin nebyl dostatečně účinný.

Ve druhém stádiu odhořívání uhlíku v odplyněném uhlí jsou podmínky ve spalinách již oxidační, avšak pravděpodobnost, že dojde k odsíření ve spalinách, je minimální, neboť záchyt vyžaduje přítomnost sorbentu v pevné fázi, ten však zůstává ve vrstvě uhlí na roštu. Zde je stále silně redukční prostředí a tak sulfidy (ať už původně obsažené v uhlí nebo vzniklý CaS) zůstávají nezoxidovány. Dojde-li k zachycení síry na sorbent v uhlí v této fázi, je to ve formě sulfidu vápenatého podle rovnic (30) a (31). V této fázi by již bylo účinné odsíření rozptylem sorbentu do spalin a odsířování podle rovnic (25), (26), (35) a (36).

Ve třetím, dohořivacím stádiu dochází k oxidaci sulfidů v popelu a uvolňuje se oxid siřičitý. O odsíření v plynné fázi nad vrstvou na roštu platí totéž, co v předchozím případě, v popelu na roštu pak je klíčový způsob, kterým se oxidují sulfidy. U CaS dochází ke konkurenci mezi reakcemi (27) a (28), přičemž reakce (28) je z hlediska odsíření žádoucí a naopak reakce (27) nežádoucí (uvolňuje oxid siřičitý). Je obtížné se vyjádřit k výsledku oxidace ostatních sulfidů, původně obsažených v uhlí, protože o zachycení SO₂ rozhodují kinetické parametry, tj. doba kontaktu se sorbentem a jeho povrchové vlastnosti.

Z rozboru vyplývá, že podmínky odsiřování spalin z roštových kotlů aditivací paliva jsou velice specifické a klíčovou roli hrají oxidačně-redukční podmínky ve vrstvě paliva a spalinách, stejně tak jako kinetické parametry.

10.6.3. Experimentální výsledky odsíření v kotlích malých výkonů

Odsiřování v kotli U22

Měření bylo provedeno na roštovém kotli U22. Vzhledem ke konstrukci kotle, tj. pevnému roštu, probíhalo měření tak, že po přiložení 10 kg paliva byl sledován časový vývoj emisí SO₂, CO, CO₂, NO_x a O₂.

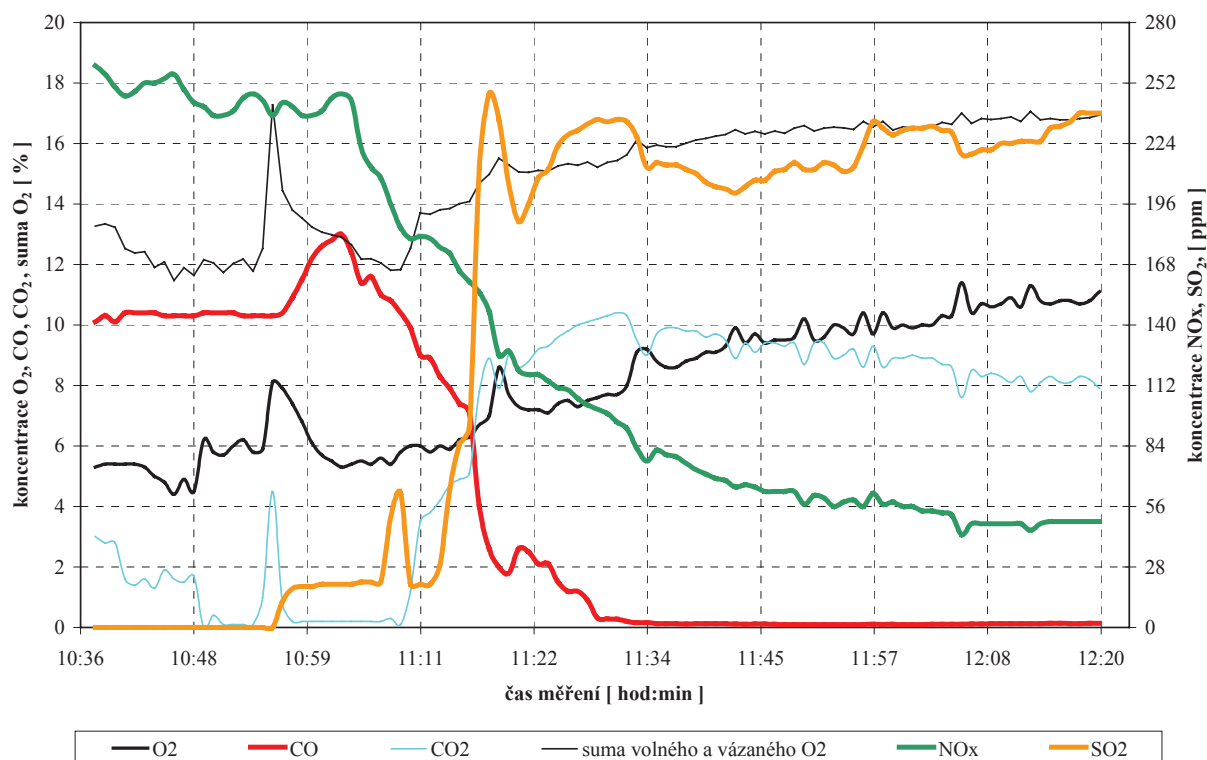
Typická ukázka průběhu koncentrací je zobrazena jako graf č. 31. Ukazuje se, že v počátečním stádiu, tj. při uvolňování prchavé hořlaviny není oxid siřičitý ve spalinách detekován. Jak klesá obsah CO a tedy i redukční atmosféra prostředí, objevuje se i oxid siřičitý. Znamená to tedy, že v této fázi hoření nelze očekávat, že bude klasické odsiřování úplné. Přes výše uvedené je zřejmé, že se síra z uhlí uvolňuje a odchází v emisích ve formě sirovodíku (H₂S), který použitý kontinuální analyzátor nedetekuje. Pro ověření této úvahy bylo provedeno orientační měření sirovodíku pomocí detekčních trubiček. V době trvání spalovací zkoušky byly provedeny tři odběry pro stanovení H₂S. Výsledky stanovení jsou zachyceny v tab. č. 23 a potvrzují výše uvedenou úvahu o chování síry v ohništi roštových kotlů (fáze 1 až 3 představují fázi hoření v průběhu spalovací zkoušky).

U kotlů s pevným roštem se uvedené průběhy dějí v čase, na rozdíl od kotlů s pohyblivými rošty, kde se tento průběh děje v prostoru (po délce roštu).

Kotel		-	Viadrus U22			
Označení zkoušky		-	Fáze 1	Fáze 2	Fáze 3	Průměr
Barometrický tlak		Pa	94 500	94 500	94 500	94 500
Teplota spalin (průměr)		°C	52	113	212	126
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách		obj. %	12,9	6,6	15,2	11,6
Koncentrace plyných emisí v suchých spalinách	CO	obj. %	10,1	10,1	0,2	6,8
	CO ₂	obj. %	0,0	0,0	4,1	1,4
	SO ₂	ppm	0	0	154	51
Koncentrace plyných emisí v suchých spalinách při 6% O ₂	CO	obj. %	18,7	10,5	0,5	9,9
	CO ₂	obj. %	0,0	0,0	10,6	3,5
	SO ₂	ppm	0	0	398	133
Teplota plynoměru		°C	18	18	18	18
Odebrané množství suchých spalin		dm ³	0,10	0,07	1,15	0,44
		dm ³ _N	0,09	0,06	1,01	0,39
Kocentrace H ₂ S v suchých spalinách		ppm	70	100	0	57
		mg(H ₂ S)/m ³ _N	107,7	153,9	0,0	87,2
Kocentrace H ₂ S v suchých spalinách při 6% O ₂		ppm	130	104	0	78
		mg(H ₂ S)/m ³ _N	199,4	160,3	0,0	119,9

TAB. Č. 23 NAMĚŘENÉ HODNOTY H₂S V PRŮBĚHU SPALOVACÍ ZKOUŠKY NA KOTLI U22, ČERNÉ UHLÍ

Na grafu je zachycen také průběh emisí oxidů dusíku v různých stádiích hoření a ukazuje se, že převážná část NO_x je emitována v počátečních stádiích, tedy při odplyňování uhlí. Tento jev kontrastuje s redukčními podmínkami v této fázi a zřejmě souvisí s tím, že hlavní podíl oxidů dusíku vzniká z palivového dusíku. Doba setrvání a teplota zřejmě nejsou dostatečné pro termický vznik NO_x v pozdějších stádiích.



GRAF Č. 31 TYPICKÝ PRŮBĚH KONCENTRACÍ PLYNNÝCH EMISÍ PRO ROŠTOVÝ KOTEL S NEPOHYBLIVÝM ROŠTEM (KOTEL U22, ČERNÉ UHLÍ)

Na základě výše uvedeného je možné konstatovat, že:

- Uspořádání roštových kotlů je natolik specifické, že při vývoji odsiřování aditivací paliva nelze jednoduše převzít zkušenosti z ostatních technologií.
- Možnost sorpce SO₂ v plynné fázi je omezena tím, že sorbent zůstává na roštu a tudíž jeho styk s SO₂ je časově velmi omezený, nebo nenastane vůbec.
- Ve značné části kotle jsou redukční podmínky a síra není zoxidována, takže sorpce založená na kyselých vlastnostech SO₂ nebude efektivní. Při redukčních podmínkách síra tvoří H₂S a pokud nemá podmínky pro dooxidování, odchází ve spalinách nedetekována (analyzátor na SO₂ sirovodík nedetekuje).

Odsiřování v kotli Ling 25 a Varimatik 25

Byly provedeny spalovací zkoušky s cílem ověření účinnosti odsíření pomocí aditivace paliva. Zkoušky byly provedeny s více a méně sirnatým hnědým uhlím. Každé z těchto uhlí bylo aditivováno (obohaceno uhlí vápníkem). Účinnost (stupeň) odsíření byla stanovena z koncentrací SO₂ ve spalinách (normální podmínky při 6% O₂). Při spalování aditivovaného paliva byl sledován pokles SO₂ ve spalinách v porovnání se stavem, kdy se spalovalo neaditivované palivo. Dosažené účinnosti odsíření spalin jsou uvedeny v tab. č. 24.

Označení použitého paliva	Kotel Viadrus Ling 25		Kotel Varimatik 25	
	Koncentrace SO ₂ ve spalinách při 6% O ₂	Účinnost odsíření	Koncentrace SO ₂ ve spalinách při 6% O ₂	Účinnost odsíření
	mg/m ³ _N	%	mg/m ³ _N	%
hnědé uhlí II	2264	29	1821	16
hnědé uhlí V	1596		1529	
hnědé uhlí IV	2891	48	2094	16
hnědé uhlí III	1491		1750	

TAB. Č. 24 VÝSLEDKY ÚČINNOSTI ODSÍŘENÍ SPALIN POMOCÍ ADITIVACE HNĚDÉHO UHLÍ PŘI SPALOVÁNÍ NA KOTLI LING 25 A VARIMATIK 25

Jak je zřejmé z výsledných naměřených a vypočtených hodnot, při spalování aditivovaného paliva došlo k redukci emisí SO₂ ve spalinách.

Podmínky pro odsíření spalin aditivací uhlí v kotli Ling 25 jsou příznivější oproti kotli Varimatik 25. Účinnost odsíření dosažená u kotle Varimatik 25 (16 %) je v souladu s obecnými předpoklady a poznatky. Účinnost odsíření dosažená u kotle Ling 25 (29 a 48 %) je znatelně vyšší. Tato skutečnost je zřejmě způsobena jinou konstrukcí ohniště. V průběhu spalování v kotli Ling 25 je popel z ohniště vytlačován dalším palivem směrem nahoru. Popel tvoří nad retortou porézní spečence a doba jeho setrvání v ohništi je znatelně delší než u kotle Varimatik 25. Také vrstva popele, kterým musí spaliny procházet, je (dle spékavosti) větší než u kotle Varimatik 25 (cca 100 mm). Vrstva popele vytváří filtr (obsahuje aditivum), kterým musí spaliny obsahující SO₂ projít.

Dosažené výsledky ukazují, že pokud i nadále bude obyvatelstvo používat zařízení pro výrobu tepla, u kterých bude jako zdroj energie používáno uhlí, vede jedna z cest ke snížení emisí SO₂ směrem k používání aditivovaných paliv.

Je ovšem také nutné zmínit, že v současné době v ČR neexistuje nástroj, který by přinutil výrobce paliva dodávat obyvatelstvu aditivované palivo a povědomí obyvatel o používání takového paliva je minimální. Značné množství zdrojů tepla o malém výkonu, které je v současné době provozováno, je zastaralé konstrukce a využití odsíření spalin aditivovací paliva by mělo svá další specifika.

10.7. Střední měrné tepelné zatížení ohniště a vznik CO

Tvar ohniště, jeho velikost a stupeň vychlazení stěn závisí na mnoha činitelích, z nichž nejdůležitější jsou druh paliva, způsob spalování, typ a výkon kotle. Aby bylo možno jednotlivé typy a provedení spalovacích zařízení navzájem porovnávat po stránce funkční a ekonomické a aby se vytvořily předpoklady pro jejich navrhování, byla zavedena určitá porovnávací kritéria ohnišť. Jedním z nejstarších kritérií používaných u roštových ohnišť byl nejprve hmotnostní a později měrný tepelný výkon roštové plochy. Měrný roštový výkon byl dán množstvím paliva M_{pv} [kg/s], které lze spálit na 1 m² roštové plochy S_r za jednotku času. Nebyl vhodný, protože výhřevnost paliva Q_i^r [MJ/kg] se může v širokých mezích měnit. Lépe vyhovuje měrný tepelný výkon roštu \bar{q}_r :

$$\bar{q}_r = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{S_r \cdot 1000} \quad [\text{kW/m}^2] \quad (37)$$

což je množství tepla, které lze v daném roštovém ohništi uvolnit za jednotku času na 1 m² plochy roštu. Obvykle bývá u velkých ohnišť 700 až 1400 kW/m². Na intenzitu uvolněného tepla v ohništi o objemu V_o lze usuzovat ze středního měrného tepelného zatížení ohniště \bar{q}_v :

$$\bar{q}_v = \frac{M_{pv} \cdot Q_i^r}{V_o \cdot 1000} \quad [\text{kW/m}^3] \quad (38)$$

jehož hodnoty pro různé typy ohnišť jsou uvedeny v grafu označeném jako graf č. 32. Zde jsou pro srovnání uvedena měrná tepelná zatížení spalovacích motorů, komor plynových turbín, raket a také malého ohniště kotle Ling 25.

Výpočet měrného tepelného zatížení představuje u malých tepelných zařízeních velice složitý problém. Hodnota tepelného výkonu je jasně daná veličina, což se ale nedá říci o objemu ohniště. Je otázka, zda definovat ohniště jako přesně vymezený prostor v kotli, ohraničený přesně určenými hranicemi nebo jej definovat jako prostor, kde dochází k hoření a ohraničení je dáno polohou teplotního pole spalin (např. nad 700 °C). U malých se velikost teplotních polí značně mění s výkonem. U velkých kotlů je tento problém zanedbatelný, protože absolutní hodnoty objemů ohnišť jsou řádově rozdílné a polohy teplotních polí jsou

především dány regulací kotle. Výše popsaný problém je zřejmý na příkladu definice objemu ohniště u kotle Varimatik, kde oblast vysokých teplot je s ohledem na přítomnost studených teplosměnných ploch v ohništi velice malá. U kotle Ling 25 byl prostor ohniště definován jako prostor mezi keramickým stabilizátorem a horní hranou retorty. Zde se také vyskytuje problém, protože při provozu na černé uhlí byl tento prostor ze 2/3 zaplněn směsí popela a hořícího paliva. Naproti tomu při spalování dřevěných pelet byla retorta prázdná až k otvorům kde vstupuje primární spalovací vzduch do prostoru spalovací komory.

Vypočtené hodnoty měrného tepelného zatížení pro kotle Ling 25 a Ling 50 pro jmenovitý a snížený výkon jsou uvedeny v tab. č. 25. Vypočtené měrné tepelné zatížení kotle Ling 50 je pro uhlí a pelety stejné, protože bylo vycházeno s hodnot jmenovitých výkonů, které výrobce stanovil pro obě paliva na 42 kW. Jako graf č. 32 je označen graf zobrazující hodnoty měrných tepelných zatížení ohnišť a tepelných motorů. Jak je z uvedených hodnot zřejmé, technologie využívající se pro kotle velkých výkonů mají několikanásobně nižší měrné tepelné zatížení ohnišť než kotle menších výkonů (se snižujícím se instalovaným výkonem kotle roste měrné tepelné zatížení ohniště). Požadavek životnosti snižuje \bar{q}_v a požadavek na snížení rozměrů a hmoty zařízení naopak \bar{q}_v zvyšuje. Místní měrné tepelné zatížení není v celém objemu ohniště konstantní. Nejvyšší hodnoty dosahuje v místě ohniska hoření a klesá jak k výsypce tak i směrem k výstupu spalin z ohniště. Maximální hodnota místního měrného tepelného zatížení bývá obvykle asi dvojnásobek až čtyřnásobek středního měrného tepelného zatížení [2].

Kotel		Ling25		Ling50
		uhlí	pelety	uhlí a pelety
palivo				
100% jmenovitého výkonu	kW	25	22	42
30% jmenovitého výkonu	kW	7,5	6,6	12,6
Objem ohniště	l	14,7	14,7	28,8
Měrné tepelné zatížení (100% Pjmen)	kW/m ³	1 701	1 497	1 458
Měrné tepelné zatížení (30% Pjmen)	kW/m ³	510	449	438

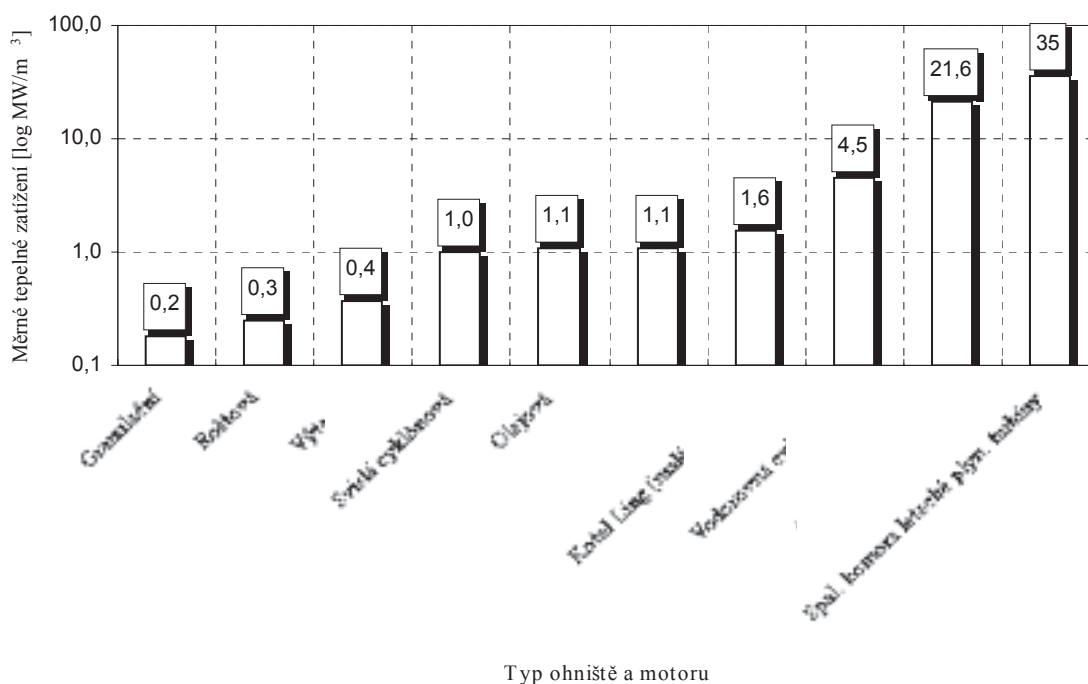
TAB. Č. 25 MĚRNÉ TEPELNÉ ZATÍŽENÍ OHNIŠTĚ KOTLE LING 25 A LING 50

Určitý výkon se při dané účinnosti zařízení docílí pomocí spálení určitého množství paliva. Tím vznikne určitého množství spalin. Je zřejmé, že se snižujícím se objemem ohniště a tím tedy se zvyšujícím se měrným tepelným zatížením ohniště dochází ke zkrácení času setrvání plynné hořlaviny v ohništi.

Pokud jsou splněny podmínky (teplota, okysličovadlo) pro uskutečnění jednotlivých uvedených částí spalování, je omezujícím faktorem jednotlivých fází čas. Součet jednotlivých časových úseků představuje celkovou dobu hoření potřebnou pro dokonalé spalování, která

má mezní minimální hodnotu a pokud jí nedosáhneme, poslední fáze hoření plynného CO nemůže proběhnout úplně. Plynné CO se dostane do oblastí teplosměnných ploch, kde již vzhledem k nízké teplotě nemůže dojít k oxidaci CO. Celková doba hoření z pohledu ohniště je dána jeho rozměry a pro daný typ ohniště, přebytek vzduchu a výkon kotle je konstantní.

Při předčasném ochlazení spalin se z rozštěpených, avšak nespálených uhlovodíků tvoří na chladných plochách (v porovnání s teplotou spalin) saze.



GRAF Č. 32 STŘEDNÍ MĚRNÁ TEPELNÁ ZATÍŽENÍ OHNIŠŤ A TEPELNÝCH MOTORŮ

S rostoucím tepelným zatížením ohniště roste tvorba emisí CO. Je to způsobeno malou dobou setrvání oxidující hořlaviny v ohništi (v pásmu vysokých teplot). Doba setrvání plynné hořlaviny v oblasti ohniště kotle Ling 25 při spalování hnědého uhlí je cca 0,2 s, což je v porovnání s velkými kotli několikanásobně menší hodnota (viz tab. č. 26). Snižování měrného tepelného zatížení u kotlů malých výkonů je dáno kompromisem mezi rozměry a cenou zařízení.

Označení kotle	-	Ling 25				
Typ paliva	-	Hnědé uhlí		Černé uhlí		Dřevěné pelety
Spotřeba paliva	kg/h	5,0	4,8	4,8	4,6	6,7
Množství vzniklých spalin	m^3_N/kg_{paliva}	13	9,5	14,5	8,5	9
	m^3_N/h	65	46	70	39	60
	dm^3_N/s	18,1	12,8	19,4	10,8	16,7
Objem ohniště	l	15	15	15	15	15
Doba setrvání plynné hořlaviny v ohništi při průměrné teplotě spalin:	s					
700 °C		0,23	0,33	0,22	0,39	0,25
900 °C		0,19	0,27	0,18	0,32	0,21
1100 °C		0,17	0,23	0,15	0,28	0,18

TAB. Č. 26 VÝPOČET DOBY SETRVÁNÍ PLYNNÉ HOŘLAVINY V OBLASTI OHNIŠTĚ KOTLE LING 25

Doba setrvání plynné hořlaviny v oblasti vysokých teplot souvisí také s obsahem prchavé hořlaviny v palivu. Pokud je ohniště uzpůsobeno jako univerzální, bude za podmínky stejné doby setrvání potřebovat pro spalování biomasy větší spalovací komoru než při spalování uhlí, přibližně v poměru obsahu prchavé hořlaviny biomasy a uhlí. Protože je předepsaný jmenovitý výkon pro daný typ ohniště pro biomasu většinou nižší, lze používat stejné ohniště jako pro uhlí, ale nese to sebou mnoho specifik a problémů.

Přestože se výrobci kotlů stále snaží o vývoj univerzálního ohniště, je možné říci, že takové ohniště neexistuje, a že směr by měl spíše směřovat k vývoji ohnišť pro konkrétní typ paliva.

10.8. Součinitel přebytku spalovacího vzduchu

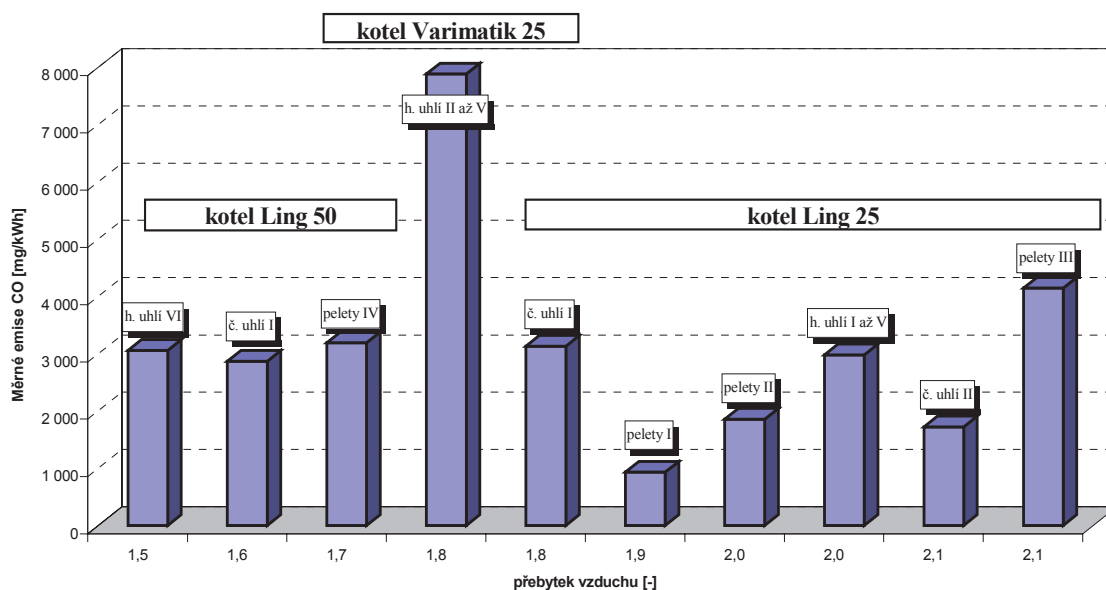
Spalovací zařízení využívají rozdílné principy spalování. Každý typ ohniště vyžaduje dle svého provedení rozdílné podmínky pro optimální provoz. Jednou z hodnot, které můžeme snadno ovlivnit a které sledujeme, je součinitel přebytku spalovacího vzduchu, jeho optimální hodnoty jsou uvedeny v tab. č. 27.

Ohniště	n	Ohniště	n
roštová	1,3 až 1,5	cyklónová horizontální	1,05 až 1,10
granulační	1,2	cyklónová vertikální	1,10 až 1,15
mlýnicová ohniště	1,24	olejová	1,01 až 1,15
výtavná	1,15	plynová	1,01 až 1,10

TAB. Č. 27 OPTIMÁLNÍ HODNOTY SOUČINITELŮ PŘEBYTKŮ SPALOVACÍHO VZDUCHU PRO ZÁKLADNÍ TYPY OHNIŠŤ KOTLŮ VÝŠÍCH VÝKONŮ

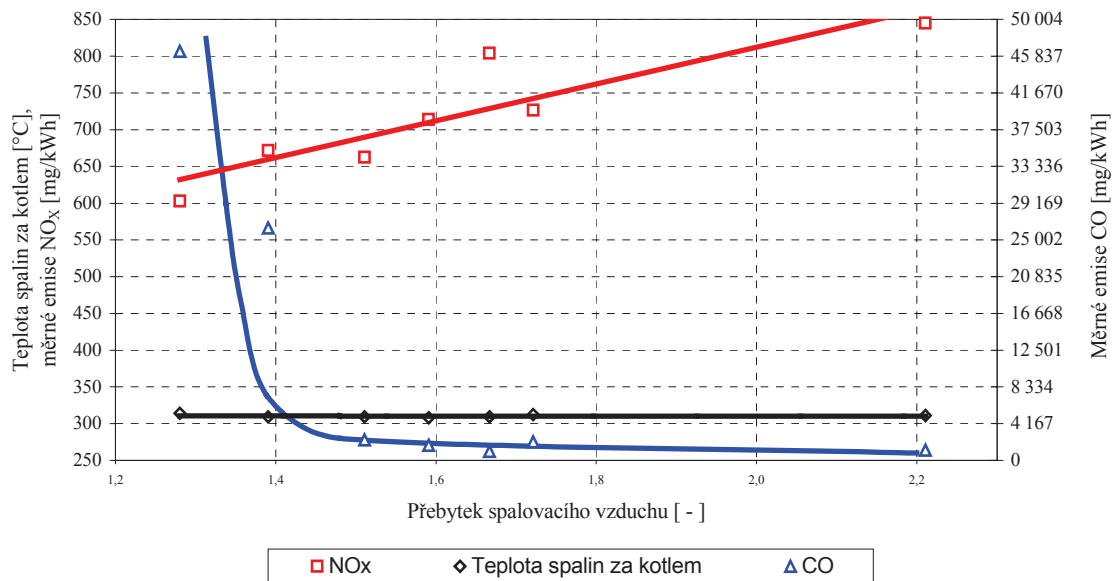
Hodnoty součinitelů přebytku spalovacího vzduchu, při kterých byly prováděny spalovací zkoušky, včetně typu spalovacího zařízení, druhu paliva a naměřených hodnot emisí CO jsou zobrazeny jako graf č. 33. Porovnáním výše uvedených optimálních hodnot součinitele přebytku spalovacího vzduchu s hodnotami naměřenými je možno konstatovat, že se

snižujícím jmenovitým výkonem kotle roste hodnota součinitele přebytku spalovacího vzduchu.



GRAF Č. 33 ZÁVISLOST MĚRNÝCH EMISÍ CO NA PŘEBYTKU VZDUCHU PŘI SPALOVÁNÍ RŮZNÝCH DRUHŮ PALIV V RŮZNÝCH KOTLÍCH PŘI JMENOVITÉHO VÝKONU

Závislost měrných emisí CO a NO_x na součiniteli přebytku vzduchu je zobrazena jako graf č. 34. Z průběhu je zřejmé, že minimalizace tvorby obou složek škodlivin vyžaduje poměrně úzce vymezenou hodnotu součinitele přebytku vzduchu. Snaha o minimalizaci pouze jedné složky má vždy za následek nárůst tvorby druhé složky. Běžný provozovatel však nemá možnost zjistit skutečný přebytek vzduchu, a proto nastavení regulačních orgánů (nastavení poměru množství paliva spalovacího vzduchu) pro optimální provoz kotle pro dané palivo musí zajistit kotlová automatika, což vede ke značnému zvýšení ceny kotle. Ekonomicky přijatelné aplikace lze předpokládat u zdrojů řádu několika set kW.



GRAF Č. 34 ZÁVISLOST MĚRNÝCH EMISÍ CO, NO_x A TEPLoty SPALIN NA SOUČINITELI PŘEBYTKU SPALOVACÍHO VZDUCHU PŘI SPALOVÁNÍ ČERNÉHO UHLÍ

S ohledem na tvorbu emisí a průběh spalování je nutno zmínit skutečnost, že výsledný součinitel přebytku spalovacího vzduchu je počítán až z výsledného obsahu kyslíku ve spalinách za kotlem a nic neříká o místě vstupu vzduchu do ohniště a jeho vlastnostech. U všech testovaných kotlů (vyjma U22) byl spalovací vzduch přiváděn do ohniště pouze jako primární. Z ohledem na výsledky měření je možno říci, že toto konstrukční řešení je nevhodné a bylo by vhodnější přívod spalovacího vzduchu rozdělit minimálně do dvou. Toto konstatování nabývá na vážnosti s rostoucím obsahem prchavé hořlaviny spalovaného paliva. Nutné je, aby sekundární vzduch měl dostatečnou teplotu, nebo aspoň dostatečnou hybnost, což by umožnilo smíšení se spalinami. Trend by měl směřovat k tomu, že primární spalovací vzduch umožní částečné zplynění paliva a v místě přívodu sekundárního spalovacího vzduchu dojde k dohoření plynné hořlaviny. Na základě uvedeného vyhodnocení byla navržena změna konstrukčního provedení a připravuje se výroba prototypu upravené verze kotle Ling 25, kde je řešen přívod předehřátého sekundárního vzduchu.

10.9. Opakovatelnost spalovacích zkoušek

Opakovatelnost spalovacích zkoušek u kotlů velkých výkonů nepředstavuje velkou komplikaci. Množství regulačních prvků umožňuje opakovaně uvést kotel do podobných stavů, kterých bylo dosaženo u předchozích zkoušek. Samozřejmě tato možnost je značně snižena u kotlů menších výkonů s jednorázovým přikládáním. V takovýchto případech existuje velké množství parametrů, které ovlivňují spalovací proces, které můžeme prakticky jen minimálně ovlivnit (tah komínu, granulometrie paliva, tlaková ztráta vrstvy paliva, teplota spalovací komory).

Při spalovacích zkouškách na kotli U22 se jednotlivé režimy značně lišily. Hlavní komplikací představovala skutečnost, že kotel pracoval v cyklech a ne v ustáleném stavu. Dle průběhu jednotlivých cyklů bylo také dosaženo různé délky trvání jednotlivých režimů (různá rychlost rozhoření).

U kotlů s mechanickou dopravou paliva byla situace snazší, protože při vlastní spalovací zkoušce byl provozní stav po dobu dostatku paliva v zásobníku relativně stabilní (z pohledu výkonu a v porovnání s kotlem U22). Porovnání výsledných hodnot měrných emisí při spalovacích zkouškách černého uhlí I a pelet III je uvedeno jako tab. č. 28. V tabulce jsou uvedeny výsledky spalovacích zkoušek provedených se stejnými druhy paliv opakovaně v různé dny. Na základě uvedených výsledků je možné konstatovat, že odlišnost výsledků z jednotlivých spalovacích zkoušek je spíše způsobena změnou hodnot během režimu (neustálenost) než problémem s opakovatelností, který se projevil jen u kotle U22.

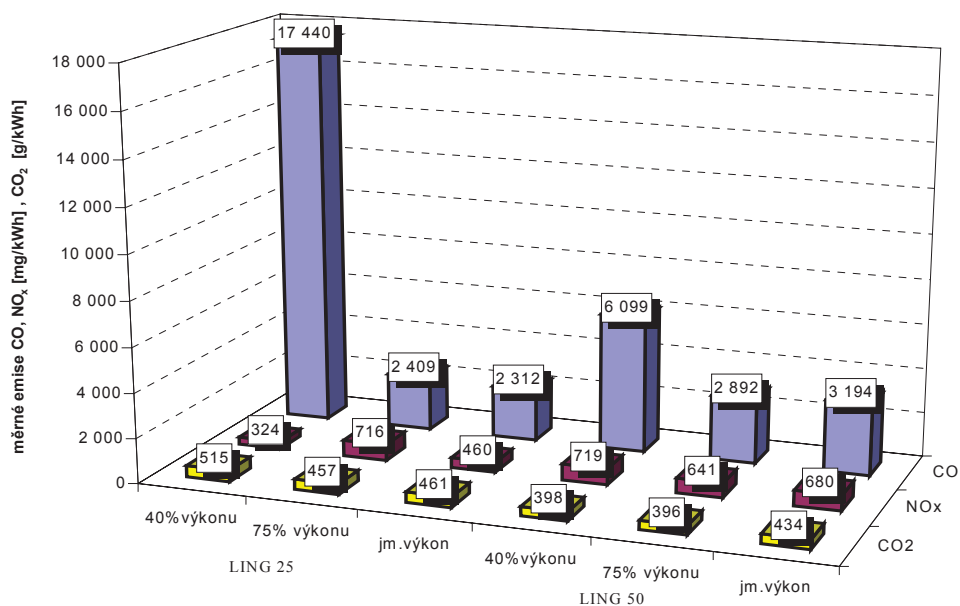
palivo	datum měření	měrné emise a výkon kotle Ling 25						
		Měřený výkon kotle	kW	23,4	23,4	8,1	8,2	
černé uhlí I	21.2.2001	CO	mg/kWh	4 353	5 457	8 500	11 470	
		NO _x	mg/kWh	-	-	-	-	
		CO ₂	g/kWh	573	574	550	545	
		Měřený výkon kotle	kW	27,5	23,9	17,4	16,4	17,9
	7.2.2001	CO	mg/kWh	2 378	3 740	5 215	11 500	5 441
		NO _x	mg/kWh	668	505	524	425	484
		CO ₂	g/kWh	621	486	555	591	542
		Měřený výkon kotle	kW	19,7	20,1	8,4	8,4	
pelety III	20.2.2001	CO	mg/kWh	6 071	6 135	27 458	17 772	
		NO _x	mg/kWh	-	-	-	-	
		CO ₂	g/kWh	549	527	528	528	
		Měřený výkon kotle	kW	22,7	22,6	21,9	8,3	8,3
	9.2.2001	CO	mg/kWh	3 214	2 460	5 133	17 195	11 497
		NO _x	mg/kWh	334	310	281	373	372
		CO ₂	g/kWh	476	467	484	530	530

TAB. Č. 28 OPAKOVATELNOST SPALOVACÍCH ZKOUŠEK NA KOTLI LING 25

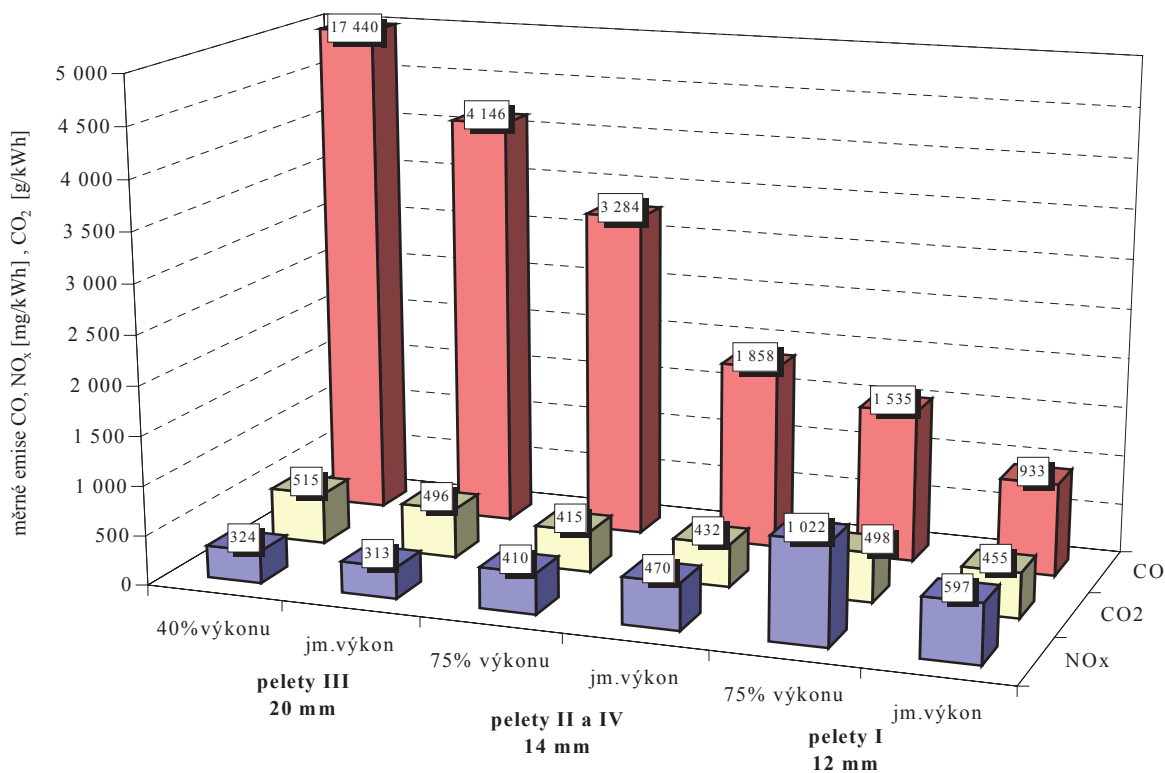
10.10. Spalování biomasy a tvorba znečišťujících látek

Biomasa byla spalována ve formě dřevěných pelet v kotlích Ling 25 a Ling 50. Velkou výhodou spalování biomasy v porovnání se spalováním ostatních druhů pevných paliv je minimalizace emisí SO₂. Stejně tak emise CO₂ s ohledem na svůj charakter vzniku nepředstavují problém. Závislosti zvýšené tvorby CO na snižujícím se výkonu kotle popsána v 10.3 se projevila také u spalování biomasy (viz graf č. 35). Příčina kolísání výsledných emisí NO_x (u kotle Lng 25) není známa.

Byla sledována závislost tvorby emisí na průměru dřevěných pelet (graf č. 36). Měrné emise CO rostou se zvětšujícím se průměrem spalovaných pelet. Je to dáno jejich menším měrným reakčním povrchem.



GRAF Č. 35 MĚRNÉ EMISE ZE SPALOVÁNÍ PELET I AŽ IV V ZÁVISLOSTI NA VÝKONU KOTLE LING 25 A LING 50



GRAF Č. 36 MĚRNÉ EMISE ZE SPALOVÁNÍ PELET V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRU PELET

10.11. Závislost účinnosti kotle na změně výkonu kotle

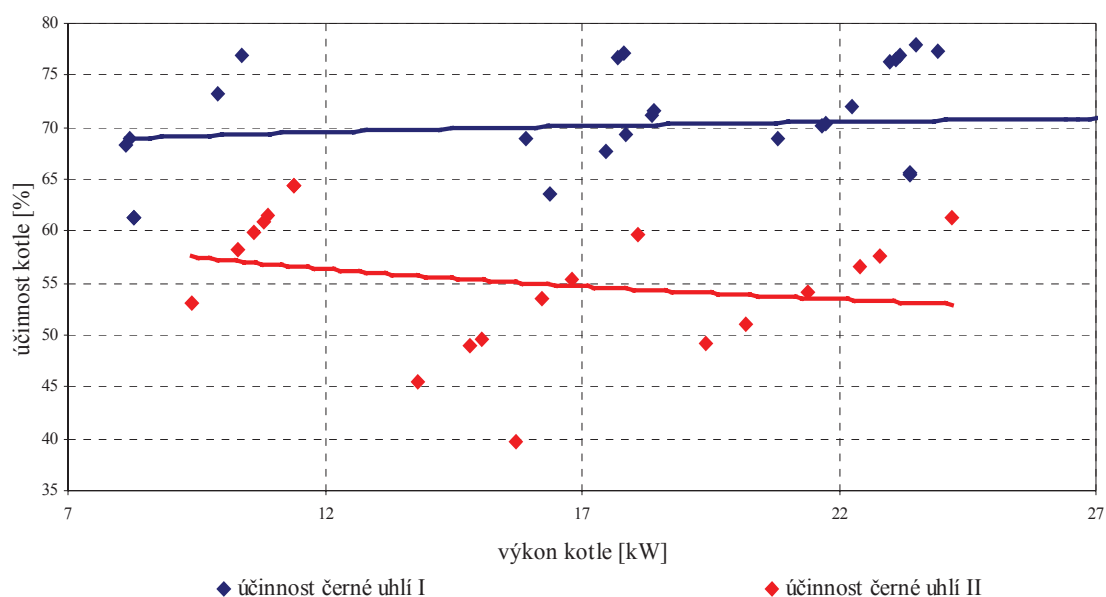
Účinnost kotle byla stanovena přímou metodou (viz 9.2.6). Hlavní parametry, které nejvíce ovlivňují výslednou účinnost kotle jsou:

- teplota spalin na výstupu z kotle (dimenze výměníku, nerovnoměrnost tepelného zatížení výměníku, teplotní spád topné vody, zanesení teplosměnných ploch, rozrážeče spalin),

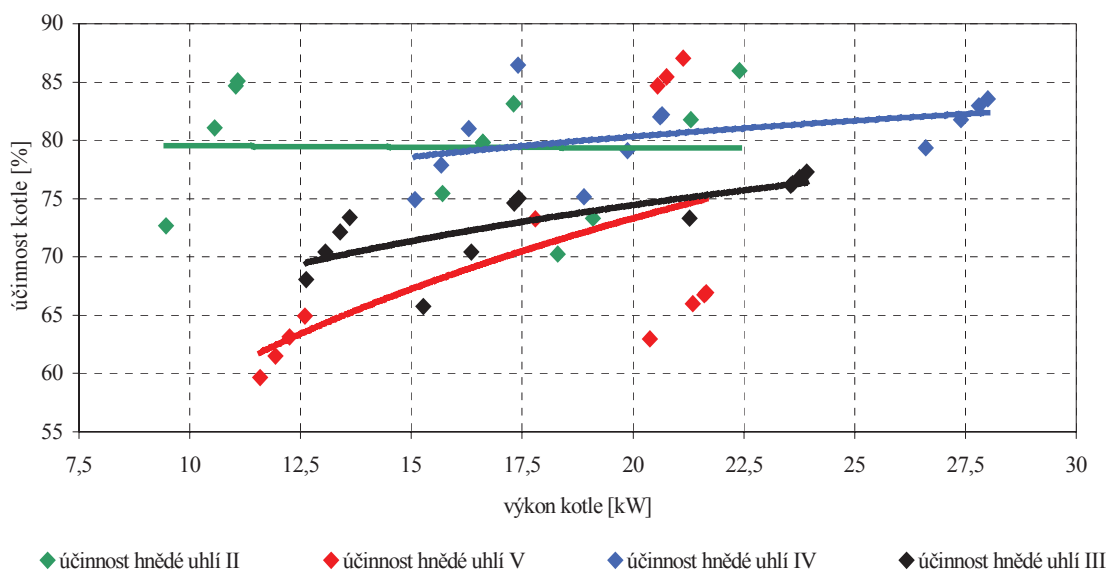
- nedopal v tuhých zbytcích po spalování,
- kvalita spalování (vyhoření CO),
- druh paliva,
- provozní parametry kotle (výkon, součinitel přebytku spalovacího vzduchu).

S ohledem na množství provedených zkoušek (viz tab. č. 20) byla účinnost kotle podrobněji sledována jen u kotle Ling 25. Průběh výsledných účinností dosažených na kotli Ling 25 při spalování tuhých paliv jsou označeny jako graf č. 37 (černé uhlí), graf č. 38 (hnědé uhlí), graf č. 39 (dřevěné pelety). Z výsledků je zřejmé, že:

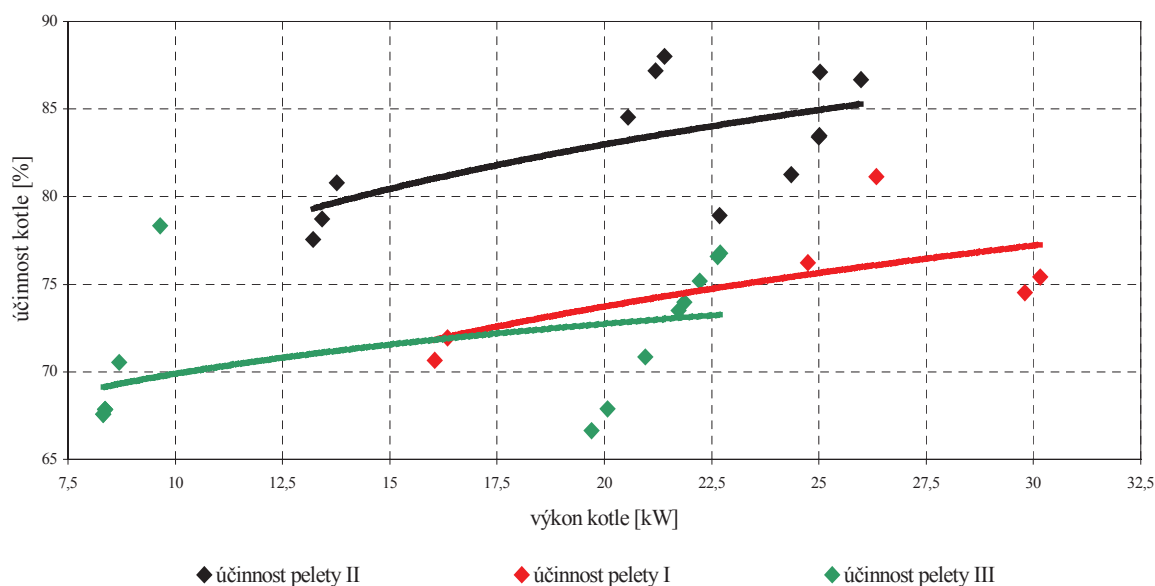
- Při spalování černého uhlí byla dosažena účinnost cca 40÷78 %. Účinnosti daleko více než na výkonu byly závislé na typu paliva. Při spalování černého uhlí II byla účinnost cca 45÷62 % a při spalování černého uhlí I byla účinnost cca 62÷78 %. Malá účinnost u černého uhlí II, byla způsobena chováním paliva nad retortou. Palivo přepadávalo do popelníku dříve než vyhořelo, což způsobilo enormní nárůst ztráty nedopalem v tuhých zbytcích po spalování. Je zřejmé, že běžně nesledované parametry jako je např. spékavost mohou u kotlů malých výkonů citelně ovlivnit výslednou hodnotu dosažené účinnosti a proto je nutné jim v další fázi vývoje věnovat zvýšenou pozornost.
- Při spalování hnědé uhlí se pohybovala účinnost kotle v rozmezí cca 60÷86%. Z výsledků není možné vypočítat jednoznačnou závislost účinnosti na provozovaném výkonu kotle. Více je účinnost ovlivněna tvarem hořící uhelné hmoty (spečence popeloviny a paliva se nad retortou přemisťují a mění tlakovou ztrátu vrstvy a tím také rovnoměrnost přívodu spalovacího vzduchu). Převážně s rostoucím výkonem rostla účinnost. To ukazuje, že zařízení nepracuje při spalování hnědé uhlí v optimálním provozním režimu (ten je u vyššího výkonu).
- Při spalování dřevěných pelet se pohybovala účinnost kotle v rozmezí cca 67÷88%. U spalování dřevěných pelet se s rostoucím výkonem zvyšovala účinnost. Také byla pozorována výrazná závislost účinnosti na druhu paliva, zejména na jejich rozměru.



GRAF Č. 37 ZÁVISLOST ÚČINNOSTI KOTLE LING 25 NA VÝKONU PŘI SPALOVÁNÍ ČERNÉHO UHLÍ



GRAF Č. 38 ZÁVISLOST ÚČINNOSTI KOTLE LING 25 NA VÝKONU PŘI SPALOVÁNÍ HNĚDÉHO UHLÍ



GRAF Č. 39 ZÁVISLOST ÚČINNOSTI KOTLE LING 25 NA VÝKONU PŘI SPALOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH PELET

10.12. Palivové náklady na produkci tepla

Spalování tuhých paliv v kotlích malých výkonů má jediný hlavní cíl a tím je výroba tepelné energie pro potřebu provozovatele. Samozřejmě v dnešní době existuje více možností, jak si zajistit dodávku či výrobu tepelné energie (dle místních podmínek).

Rozhodnout se mezi tím, co nabízí dnešní trh je složité a musí být předcházeno analýzou. V analýze musíme odpovědět jaké máme požadavky, ale samozřejmě jaké jsou naše možnosti. Malý nástin (jistě ne vyčerpávající) základních kritérií, nad kterými se musíme zamyslet při výběru způsobu výroby tepla jsou uvedeny v tab. č. 29.

Celkové roční náklady na uspokojení roční potřeby tepla jsou výsledkem součinu roční spotřeby tepla (GJ/r) a nákladů na výrobu jednotky tepla (Kč/GJ).

První položka představuje problém provedení stavby (celková tepelná izolace budovy, okna apod). Trend do budoucna, který nabývá na atraktivnosti s rostoucí cenou energie, je stavba nízko-energetických domů. Takovýmto řešením je možno snížit i několikanásobně roční spotřebu.

Druhá položka (náklady na výrobu jednotky tepla) představuje problém provedení celého topného systému, jehož základní složky jsou:

- zdroj tepla (kotel)
- palivo
- způsob transformace energie
- transport energie do místa určení
- regulace

Náklady na výrobu jednotky tepla tvoří:

- palivové náklady
- ostatní složky nákladů

Kritérium	Váha kritéria
Ekonomické aspekty	9
cena kotle	
životnost	
cena paliva	
poruchovost	
účinnost kotle	
návratovost investice	
Komfort obsluhy	4
perioda přikládání	
čistota provozu	
možnost regulace na dálku	
snadnost obsluhy a ovládání	
snadnost přikládání	
snadnost odpopelnění	
Palivo	6
Druh paliva	
Možnost záměny paliva	
Požadavky na kvalitu paliva	
Dostupnost paliva	
Obsah hořlaviny v popeli	
Požadavky na velikost skladovacích prostor	
Ostatní	3
Prostorová náročnost na instalaci	
Provozní parametry při sníženém výkonu	
Dosažitelnost servisu	
Dynamika kotle	
Ovládání přebytku vzduchu	
Měrné emise	
Komínová ztráta	
Ztráta sdílením tepla do okolí	
Desing	
Riziko havárie při provozu	
Náročnost instalace a zprovoznění zařízení	
Reference	

10 - max. váha kritéria, 0 - minimální váha kritéria

TAB. Č. 29 KRITÉRIA PRO ANALÝZU PŘI VÝBĚRU TYPU TOPENÍ

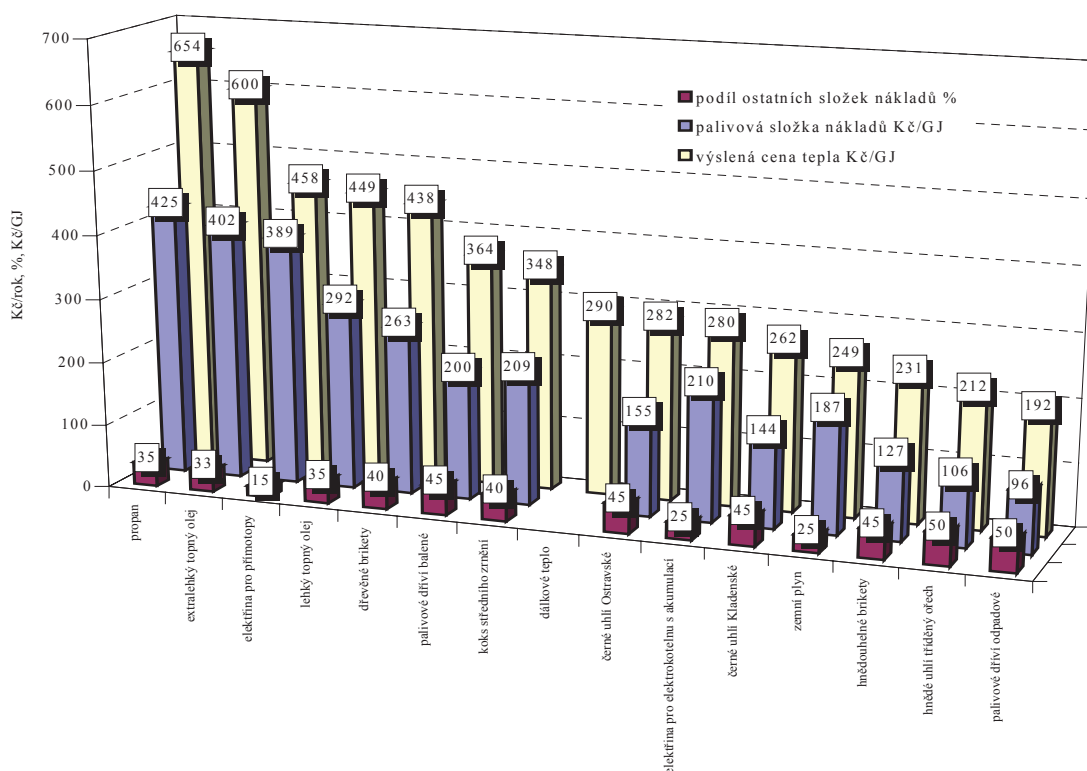
Palivové náklady se vypočtou dle následujícího vztahu:

$$N_{\text{pal}} = \frac{C_{\text{paliva}}}{Q_i^r \cdot \eta_k} \quad [\text{Kč/GJ}] \quad (39)$$

kde N_{pal} je palivové náklady v Kč/GJ
 C_{paliva} cena paliva v Kč/t
 Q_i^r výhřevnost paliva v MJ/kg
 η_k účinnost kotle

Z výše uvedených tří členů vzorce, které ovlivňují palivové náklady, můžeme nejvíce ovlivnit výběrem technologie s vysokou účinností. Samozřejmě i zde jsou technické hranice. Přehled současné úrovně palivových nákladů včetně odhadu ostatních složek nákladů a tedy i výsledné ceny tepla pro různá paliva je zobrazen jako graf č. 40 (ceny paliv jsou platné k 31.7.2000).

Uvedené palivové náklady pro hnědé uhlí, černé uhlí a palivové dříví balené (hodnoty odpovídají dřevěným peletám) jsou ve stejných úrovních, jaké byly dosaženy při spalovacích zkouškách [21]. Jak je z uvedených hodnot zřejmé, za komfort obsluhy se platí a je již pouze na provozovateli, aby si zvolil dle svých možností způsob topení. Je nutné ovšem také poznamenat, že ve většině případů vyšší cena také představuje menší tvorbu měrných emisí (vztaženo na vyrobené teplo).



GRAF Č. 40 PALIVOVÉ A CELKOVÉ NÁKLADY NA VÝROBU TEPLA PRO RŮZNÉ DRUHY VYTÁPĚNÍ

11. Závěr

11.1. Cíl práce a jeho splnění

Tuhá paliva a z nich především uhlí představují jediný pozoruhodný zdroj energie v ČR. Životnost zásob uhlí u nás představuje mnoho dalších desetiletí. Tato skutečnost vede k reálným úvahám o pokračujícím využívání tuhých paliv v domácnostech v ohništích malých výkonů, a proto byla na toto téma zaměřena tato disertační práce, která si dávala za cíl provést analýzu vhodnosti spalování uhlí v ohništích malých výkonů. Domnívám se, že stanovený cíl byl v zásadě splněn.

11.2. Teoretická část

V teoretické části práce jsem provedl rozbor současného postoje legislativy k problematice malých zdrojů znečištění ovzduší. Souhrnně je možné říci, že zákon ukládá také malým provozovatelům znečištění mnoho povinností. U právnických a fyzických osob oprávněných k podnikání dává dostatečné právní nástroje ke kontrole plnění povinností a také donucovací nástroje k realizaci případné nápravy. Jiná situace (z pohledu právních nástrojů) je u fyzických osob „nepodnikatelů“ (lokální topeniště). V případě podezření na neplnění zákona o ovzduší u těchto obyvatel je velice problematické a zdlouhavé toto podezření dokázat (provozovatel zástupce orgánu ochrany ovzduší nepustí do objektu). V běžné praxi se obecní úřady lokálními topeništi zabývají jen zřídka. Nový zákon o ovzduší, který vejde v platnost v červnu 2002, by měl být pro řešení zmíněné problematiky přínosem.

Dále jsem provedl sumární bilanci emisí z malých zdrojů znečištění ovzduší. Podstata stanovení množství emisí z malých zdrojů vychází ze spotřeby paliv a z emisních faktorů. Stanovení spotřeby paliv se provádí na základě zpracování a korekce výsledků sčítání lidu z r. 1991. K částečnému zpřesnění této hodnoty dojde po zpracování sčítání lidu, které proběhlo v roce 2001. Vlastní emisní faktory použité pro bilanci emisí zdrojů REZZO3 (viz tab. č. 14) byly převzaty z vyhlášky [27] pro kategorie pevný rošt. S ohledem na skladbu používaných kotlů v ČR to byla volba vhodná, přestože se jedná o zjednodušení problematiky. Z výsledných hodnot emisí za rok 1999 (viz tab. č. 15) vyplývá, že emise TZL, CO a C_xH_y tvoří přibližně čtvrtinu emisí sledovaných v rámci REZZO (stacionární a mobilní). Pokud budeme porovnávat pouze stacionární zdroje znečištění, můžeme říci, že emise TZL a C_xH_y z malých zdrojů tvoří cca 60 % z celkových emisí ze stacionárních zdrojů znečištění. U emisí CO je to cca 50 %, u SO_2 cca 20 % a nejmenší podíl tvoří emise NO_x a to cca 10 %. Porovnání absolutních hodnot ročních produkcí emisí pro jednotlivé REZZO neposkytuje

přesnou informaci o závažnosti postižení životního prostředí. Emise u REZZO3 jsou místem svého vypouštění do okolí zcela odlišné od emisí z větších zdrojů (nízko-úrovňové emise). Výška komínů u malých zdrojů se ve většině případů pohybuje v rozmezí 5÷12 m, zatímco výška komínů u velkých zdrojů je několikanásobně větší.

Popsal jsem základní rozdělení a charakteristické vlastnosti tuhých paliv. U kotlů nových konstrukcí se vyskytla skutečnost, že v několika případech vlastní spalovací proces a provoz kotle byl významně ovlivněn některou běžně nesledovanou vlastností paliva, např. spékavostí. To vede do budoucna k zvýšeným požadavkům, které budou kladeny na spolupráci výrobce paliv a výrobce kotlů (zatím spíše výjimky).

Spalovací proces v ohništi s jednorázovým přikládáním (prohořivací způsob) jsem podrobil teoretické analýze (viz 7.2.6), která definuje základní parametry, které ovlivňují kvalitu spalování. Spalování v těchto ohništích má charakteristický periodický průběh (viz graf č. 17) V oblasti maximální rychlosti hoření spočívá klíčový problém těchto ohnišť. Po zapálení paliva se spalovací proces přirozeně rozvíjí k vyšší rychlosti hoření a přednostně se spalují prchavé složky hořlaviny. To vyžaduje zvýšený přívod spalovacího vzduchu, který však je ze samotného principu spalování nedostačující. Výsledkem je nedokonalé spalování s vysokým obsahem oxidu uhelnatého a dalších nežádoucích produktů nedokonalého spalování ve spalinách. Nastavení přívodu vzduchu na vyšší úroveň jeho přebytku vyřeší problém jen částečně, protože se nemůže podařit úspěšně zvládnout celou oblast vysoké rychlosti hoření a navíc trvale příliš vysoký přebytek vzduchu výrazně sníží účinnost kotle v oblasti malé rychlosti hoření. Řešení problému je ve zkracování doby trvání periody spalovacího procesu, což ovšem s ohledem na zvýšenou náročnost na obsluhu pro prohořivací způsob spalování u teplovodních kotlů není přijatelné. Při spalování uhlí v kotlích malých výkonů představuje klíčový problém doprava paliva do spalovací komory.

V další části práce jsem se zabýval popisem základních principů spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů včetně jeho vývoje od nejstarších technologií (dnes ještě používaných) až po moderní technologie (dnes vyvíjené a uváděné na trh).

11.3. Experimentální část

Podstatná část této práce se věnuje experimentální části. S ohledem na důvěryhodnost a reprodukovatelnost výsledků jsem provedl velké množství experimentů (165 spalovacích zkoušek). Spalovací zkoušky jsem převážně prováděl na zkušební kotlů, která je součástí Výzkumného energetického centra a již jsem vedoucí. V první řadě jsem určil rozsah sledovaných parametrů (viz 9.1) a zvolil metodiky pro jejich stanovení. Pro realizaci

spalovacích zkoušek byla na zkušebně navržena a vybudována měřicí trať (viz obr. č. 11) a byly upraveny metodiky měření. Tento zkušební stend umožňuje stanovení základních parametrů sledovaných při spalovacích zkouškách teplovodních kotlů ve výkonnostním rozsahu cca 5 až 150 kW. Správnost použitých metodik byla potvrzena také při akreditačním řízení, kterým nyní již Akreditovaná zkušební laboratoř č. 1166.3 úspěšně prošla u Českého institutu pro akreditaci v r. 2000.

Výběr typu testovaných spalovacích zařízení byl přizpůsoben stanoveným cílům a také finanční náročnosti. Jako kotel představující starou konstrukci jsem zvolil kotel U22 využívající prohořivací způsob hoření. Za zástupce moderního automatického kotle na tuhá paliva jsem zvolil kotel Varimatik 25 a Varimatik 50 využívající princip otočného válcového roštu. Směr vývoje automatických kotlů směřuje k použití principu spodního přikládání paliva, jako zástupce tohoto směru jsem vybral kotel Ling 25 a Ling 50.

Jako palivo při spalovacích zkouškách jsem použil dva druhy černého a sedm druhů hnědého uhlí. Přestože je hlavní pozornost této práce věnována spalování uhlí, provedl jsem s ohledem na trend v energetice také spalovací zkoušky s biomasou (čtyři druhy dřevěných pelet) a s odpady potravinářského průmyslu (zemědělci disponují pozoruhodnými zásobami energie v odpadech a neprodejných přebytcích produkce).

Závislost tvorby emisí na typu spalovacího zařízení

Na základě zhodnocení výsledků spalovacích zkoušek je možné říci, že typ spalovacího zařízení zcela zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu spalování. Změny typu spalovacího zařízení vedou ke změně celého komplexu parametrů ovlivňujících vlastní spalovací proces, zejména pak:

- způsob spalování (odhořívání, prohořívání),
- doprava paliva (jednorázová, kontinuální),
- regulace příkonu zařízení,
- přívod, umístění a regulace spalovacího vzduchu.

Moderní technologie vyznačující se především kontinuálním přívodem paliva produkují cca stonásobně méně emisí CO než staré technologie (jednorázový přívod paliva, prohořívání, dnes běžně používaný). Dle výsledků (viz graf č. 28) je možno konstatovat, že u kotlů využívajících spodní přívod paliva do ohniště bylo dosaženo menší tvorby emisí CO (cca dvakrát) než u kotlů využívajících princip otočného válcového roštu. V případě emisí NO_x a CO₂ nebyl rozdíl v jejich tvorbě u kotlů staré a moderní technologie tak výrazný jako u emisí CO. Stará technologie produkovala cca osmkrát více emisí NO_x a CO₂.

Stanovené a skutečné emisní faktory

Emisní faktory používané pro bilance emisí z malých zdrojů znečištění ovzduší jsem porovnával se skutečně dosaženými hodnotami emisních faktorů při spalovacích zkouškách (viz tab. č. 22). Stanovení hodnot emisních faktorů tak jak jsou uvedeny ve vyhlášce, vycházelo ze znalostí výsledků dosažených při testování na zkušebně a z názorů odborné veřejnosti. Avšak především u starších technologií je provozní stav dosažený na zkušebně podstatně odlišný od reálného provozního stavu.

Největší rozdíl mezi stanovenými a naměřenými emisními faktory jsem zaznamenal u emisí CO. U prohořivacího způsobu spalování byl naměřený emisní faktor CO přibližně o dva řády větší než u kotlů moderní konstrukce. Emisní faktory CO pro moderní kotle přibližně odpovídaly stanoveným emisním faktorům. Bylo by vhodné u emisního faktoru CO udělat jeho korekci (navýšení) pro kotle s pevným roštem. Experimenty provedené na starém typu zařízení jsem uskutečnil pouze pro zmapování současného stavu a tomu také odpovídal omezený (čtyři režimy) počet spalovacích zkoušek, který považuji za nedostatečný pro vyslovení korekčního koeficientu. Nicméně rozdíl naměřených a předepsaných emisních faktorů je tak značný, že by bylo vhodné jako další krok v daném oboru provést měření na starých technologiích ve větším rozsahu a na základě jejich výsledků stanovit koeficient korekce. Výše uvedená skutečnost dále násobí bilanční množství emisí CO vznikajících při spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů.

Naměřené hodnoty emisních faktorů pro NO_x a CO₂ nevykazovaly výrazný rozdíl od stanovených emisních faktorů.

Závislost tvorby emisí na změně výkonu kotle

Výsledky spalovacích zkoušek jednoznačně ukazují, že se snižujícím se výkonem kotle se zvyšuje tvorba emisí CO. Pro ostatní základní znečišťující látky nebyla závislost na změně výkonu kotle potvrzena. Z pohledu tvorby škodlivin je tedy jednoznačným přínosem provozovat kotel po maximálně možnou dobu pouze při jmenovitém výkonu, kdy jsou environmentální požadavky na provoz kotle plněny v maximální míře. Toto je ve velké většině případů reálného provozu pouhá fikce a nesplnitelný požadavek. Kotle v běžném provozu pracují při jmenovitém výkonu jen v době velké potřeby tepla (teplota okolí menší než -5°C). Spojení uvedených poznatků o zvýšené tvorbě CO je technicky řešitelné pomocí provozování kotle v systému společně s akumulací nádobou. To zajistí po maximálně možnou dobu bez přerušování chodu kotle jeho provozování při jmenovitém výkonu.

Teplota v ohništi a tvorba emisí

Teplota spalin v ohništi se při realizovaných zkouškách pohybovala v rozmezí cca 750 až 1150 °C. Největších teplot bylo dosaženo při spalování černého uhlí v kotli Ling 50. Z uvedených hodnot měrných emisí NO_x není patrná přímá závislost teploty v malých ohništích na tvorbě emisí NO_x. Domnívám se, že větší závislost tvorby NO_x je patrná na typu paliva (nižší NO_x u biomasy). S ohledem na sledované trendy a hodnoty teploty ve spalovací komoře lze předpokládat, že naměřené NO_x jsou převážně palivové a podíl termických NO_x je malý. Výše uvedené závěry o tvorbě NO_x jsou spíše úvahy a nelze je zcela jednoznačně potvrdit dosaženými výsledky při experimentech. Z pohledu emisí CO je teplota v ohništi dostatečná pro dooxidování této složky a její hodnota je ovlivněna spíše jinými faktory (doba setrvání v pásmu vysokých teplot).

Odsiřování v kotlích malých výkonů

S ohledem na finanční náročnost odsiřovacích technologií je možné u malých kotlů reálně uvažovat s odsiřením založeném na aditivaci paliva. Z provedených termodynamických rozborů chemických reakcí je možné říci, odsiřování spalin u kotlů malých výkonů pomocí aditivace paliva je značně specifické a komplikované a že klíčovou roli zde představují oxidačně redukční podmínky.

Podmínky pro odsiřování spalin aditivací uhlí v kotli Ling 25 byly příznivější oproti kotli Varimatik 25. Účinnost odsiřování dosažená u kotle Varimatik 25 (16 %) je v souladu s obecnými předpoklady a poznatky. Účinnost odsiřování dosažená u kotle Ling 25 (29 a 48 %) je znatelně vyšší. Tato skutečnost je zřejmě způsobena jinou konstrukcí ohniště. V průběhu spalování v kotli Ling 25 je popel z ohniště vytlačován dalším palivem směrem nahoru. Popel tvoří nad retortou porézní spečence a doba jeho setrvání v ohništi je znatelně delší než u kotle Varimatik 25. Také vrstva popele, kterým musí spaliny procházet, je (dle spékavosti) větší než u kotle Varimatik 25 (cca 100 mm). Vrstva popele vytváří filtr (obsahuje aditivum), kterým musí spaliny obsahující SO₂ projít.

Dosažené výsledky ukazují, že pokud i nadále bude obyvatelstvo používat zařízení pro výrobu tepla, u kterých bude jako zdroj energie používáno uhlí, vede jedna z cest ke snížení emisí SO₂ směrem k používání aditivovaných paliv.

Je ovšem také nutné zmínit, že v současné době v ČR neexistuje nástroj, který by přinutil výrobce paliva dodávat obyvatelstvu aditivované palivo a povědomí obyvatel o používání takového paliva je minimální. Značné množství zdrojů tepla o malém výkonu, které je

v současné době provozováno, je zastaralé konstrukce a využití odsíření spalin aditivací paliva by mělo svá další specifika.

Střední měrné tepelné zatížení ohniště a vznik CO

Se snižujícím se výkonem kotle značně roste měrné tepelné zatížení ohniště (viz graf č. 32) a s rostoucím tepelným zatížením ohniště roste tvorba emisí CO. Je to způsobeno malou dobou setrvání oxidující hořlaviny v ohništi (v pásmu vysokých teplot). Doba setrvání plynné hořlaviny v oblasti ohniště kotle malého výkonu (Ling 25) při spalování hnědého uhlí je cca 0,2 s, což je v porovnání s velkými kotli několikanásobně menší hodnota. Snižování měrného tepelného zatížení u kotlů malých výkonů je dáno kompromisem mezi rozměry a cenou zařízení.

Součinitel přebytku spalovacího vzduchu

S ohledem na tvorbu emisí a průběh spalování je nutno zmínit skutečnost, že výsledný součinitel přebytku spalovacího vzduchu je počítán až z výsledného obsahu kyslíku ve spalinách za kotlem a nic neříká o místě vstupu vzduchu do ohniště a jeho vlastnostech. U všech testovaných kotlů (vyjma U22) byl spalovací vzduch přiváděn do ohniště pouze jako primární. S ohledem na výsledky měření je možno říci, že toto konstrukční řešení je nevhodné a bylo by vhodnější přívod spalovacího vzduchu rozdělit minimálně do dvou. Toto konstatování nabývá na vážnosti s rostoucím obsahem prchavé hořlaviny spalovaného paliva. Nutné je, aby sekundární vzduch měl dostatečnou teplotu, nebo aspoň dostatečnou hybnost, což by umožnilo smíšení se spalinami. Trend by měl směřovat k tomu, že primární spalovací vzduch umožní částečné zplynění paliva a v místě přívodu sekundárního spalovacího vzduchu dojde k dohoření plynné hořlaviny. Na základě uvedeného vyhodnocení byla navržena změna konstrukčního provedení a připravuje se výroba prototypu upravené verze kotle Ling 25, kde je řešen přívod přehřátého sekundárního vzduchu.

Opakovatelnost spalovacích zkoušek

Opakovatelnost spalovacích zkoušek je velice žádoucí vlastnost zařízení, která usnadní to, aby se běžný provoz zařízení co nejvíce podobal provozu dosaženému při vývoji a na zkušebně a také umožní reprodukovatelnost výsledků provedených měření.

Dle opakovatelnosti lze spalovací zařízení rozdělit dle výkonu a dle způsobu přívodu paliva. Opakovatelnost spalovacích zkoušek u kotlů velkých výkonů nepředstavuje velkou komplikaci. Množství regulačních prvků umožňuje opakovaně uvést kotel do podobných stavů, kterých bylo dosaženo u předchozích zkoušek. Samozřejmě tato možnost je značně snižena u kotlů menších výkonů s jednorázovým příkládáním. V takovýchto případech

existuje velké množství parametrů, které ovlivňují spalovací proces, které můžeme prakticky jen minimálně ovlivnit (tah komínu, granulometrie paliva, tlaková ztráta vrstvy paliva, teplota spalovací komory). Opakovatelnost spalovacích zkoušek u kotle s prohořivacím principem byla minimální, řádové rozdíly výsledných hodnot nebyly výjimkou a jsou dány typem zařízení a způsobem jeho obsluhy. U kotlů s mechanickou dopravou paliva byla opakovatelnost dobrá (cca 30%).

Ekologicky šetrný výrobek

Dosažené hodnoty měrných emisí u jednotlivých typů kotlů jsem porovnával také s limity, které byly stanoveny jako požadavky pro propůjčení ochranné známky „Ekologicky šetrný výrobek“ pro kotle na tuhá paliva. Z uvedených hodnot (viz graf č. 28) je zřejmé, že hodnoty limitů pro udělení ochranné známky byly postaveny velice přísně a výrobek, který jim vyhověl, představoval vyspělý stupeň technologie. V současné době jsou předepsány limity pouze pro spalování biomasy, pro spalování uhlí a koksu bylo propůjčování ochranné známky MŽP zrušeno. Přínos ochranné známky spočívá ve skutečnosti, že rozdělí spalovací zařízení do skupiny vyspělé a zastaralé, ale hlavně v tom, že je spojena s udělením dotace na 50% ceny zařízení. Bylo by vhodné přehodnotit přístup ministerstva a vrátit se také u kotlů na uhlí k programu zapůjčování ochranné známky.

Další vývoj a směr

Se snižujícím se výkonem spalovacího zařízení se zvětšují problémy s kvalitou spalování. Tyto problémy jsou dílem technického rázu, ale převážně jsou dány finanční náročností případného technicky dostupného řešení. Se snižujícím se výkonem vzrůstá poměr mezi investicí na instalovaný výkon (Kč/kW). Je nutné reálně stanovit mez přijatelné environmentální zátěže a efektivnosti spalovacího zařízení pro nové malé zdroje znečištění ovzduší. Prokázání splnění stanovených mezí musí být povinností výrobce nebo dovozce.

Vývoj moderních spalovacích zařízení by měl respektovat tyto základní body:

- vývoj spalovacího zařízení pro konkrétní druh paliva. Konstrukce univerzálních ohnišť bude postupně omezována,
- snižování měrného tepelného zatížení ohniště,
- regulace dopravy paliva umožní změnu semikontinuální dopravy paliva na skutečně kontinuální (nepřetržitou) dopravu paliva,
- rozdělení spalovacího procesu na oblast zplynění a dohoření,
- oblast zplynění bez teplosměnných ploch,
- rozdělení spalovacího vzduchu do více úrovní (nutno zmapovat proudění a koncentrační pole),

- minimalizace zásahů obsluhy,
- maximalizace efektivnosti provozu.

Shrnutí

Většina rozborů, úvah a provedených experimentů jednoznačně potvrzuje skutečnost, že uhlí není vyloženě špatné palivo, ale že je s ním špatně zacházeno a spaluje se v neodpovídajících zařízeních. Tato skutečnost samozřejmě uhlí škodí, ale není to jeho vina. Řešením je změna koncepce dosud běžně používaných technologií spalování. Musí se jít cestou kontinuální dopravy paliva. Kotle Varimatik a Ling představují první kroky na jistě ne krátké a snadné cestě ke kvalitnímu spalování tuhých paliv v ohništích malých výkonů.

Jednoznačně musí být také řečeno, že pokud chceme spalovat tuhá paliva v ohništích malých výkonů kvalitně, nikdy to nebude za tak nízké náklady jako doposud. Zvýší se náklady na kvalitnější technologii a palivo. Zde není místo si něco nalhávat a je nutné tuto skutečnost říkat nahlas.

Experimentální zkoušky včetně jejich vyhodnocení a analýz, které jsem provedl, byly součástí řešení grantů: „Kvalita spalovacího procesu v kotlích malých výkonů“ (GAČR 101/98/0820) a „Výzkumně-průmyslové centrum pro vývoj zařízení určeného k ekologickému spalování tuhých paliv, zejména biomasy“ (MPO ČR, FB-C2/15). Řešitelský tým, jehož jsem byl členem, navrhl nový typ ohniště se spodním kontinuálním přikládáním paliva. Výsledkem řešení těchto projektů byl vznik moderního kotle na tuhá paliva, který úspěšně prošel certifikací ve státní zkušebně a našel uplatnění na domácím trhu.

Závěrem bych si dovolil odpovědět na značně provokativní otázku, kterou jsem si položil hned na počátku této práce. *Je vůbec možné a vhodné s ohledem na ekologicko-ekonomické požadavky spalovat uhlí v ohništi malého výkonu? Patří uhlí do kotlů o malém výkonu?* Na základě skutečností výše uvedených konstatuji, že ano, ale ne v těch dnes u nás běžně používaných.

Použitá literatura:

- [1] BRETSCHNEIDER, B., KURFÜRST, J. *Technika ochrany ovzduší*. Praha: SNTL, 1978,
- [2] ČERNÝ, V., HRDLIČKA, L., JANEBA, B., KARTÁK, J., PIKMAN, M. *Parní kotle a spalovací zařízení*. Praha: SNTL, 1975,
- [3] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983,
- [4] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 1999*. Praha: ČHMÚ, 2000, ISBN 80-85813-77-7,
- [5] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 1998*. Praha: ČHMÚ, 1999, ISBN 80-85813-70-X,
- [6] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *Seznam platných harmonizovaných norem vyhlášených příslušným nařízením vlády*. <http://www.csni.cz/Orders/HarmList.asp>
- [7] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Sčítání lidu, domů a bytů*. Praha: ČSU, 1991,
- [8] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Spotřeba paliv a energie v roce 1999*. ČSÚ, 2000, <http://www.czso.cz/cz/cisla/8/8.htm>,
- [9] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Spotřeba paliv a energie v domácnostech za rok 1996*. Praha: ČSÚ 1998,
- [10] ČSN 07 0240. Teplovodní a nízkotlaké parní kotle, Základní ustanovení,
- [11] ČSN 44 1351. Stanovení prchavé hořlaviny,
- [12] ČSN 44 1390. Klasifikace přirozených tuhých paliv,
- [13] ČSN EN 303-5. Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení,
- [14] ČSN ISO 6096, Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda,
- [15] DANIHELKA, P., SEIDLOVÁ, J., HORÁK, J. Problémy související s odsiřováním roštových kotlů. In *Sborník z konference Kotle a kotelní zařízení 2000*. Brno, 2000, s. 191-197, ISSN-1212-463X,
- [16] FRIDRICH, V. *Zdroje tepla*. Praha: ČVTS Komitét pro techniku prostředí, 1972,
- [17] GEOFOND Č.R. Surovinové zdroje České republiky, nerostné suroviny (stav 2000). In *Ročenka 2001*, Praha: MŽP ČR, 2001, ISBN 80-7212-179-0,
- [18] GRABIC, R., DANIHELKA, P., OCELKA, T., DEJ, M., HORÁK, J. Emission of POPs from incineration of used oils in heat sources to 30 kW and to 233 kW power at presence of heavy metals. In *Sborník z konference Dioxíny v průmyslu*. Krakov, 1999,
- [19] HERČÍK, M., LAPČÍK, V., ODROUČKA, K. *Ochrana životního prostředí*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 1995, ISBN 80-7078-255-2,
- [20] HOLOUBEK, I. A KOL. Podklady pro důvodovou zprávu pro ratifikaci Protokolu o POPs. *TOCOEN Report*, 1999, (no. 151),
- [21] HORÁK, J., KOTRÁŠ, V., VOLNÁ, Z. Moderní kotle malých výkonů a využití biomasy. In *Sborník konference Snižování energetické náročnosti budov*. Ostrava, 2000, s. 149-156, ISBN-80-02-01395-6,
- [22] HRBÁČEK, J. *Práce Ústavu pro výzkum paliv*. svazek 9, Praha, 1964,
- [23] IBLER, Z., KARTÁK, J. *Technický průvodce energetika*. CD-ROM, Praha, 1999,
- [24] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World energy outlook 2000*. Paris, 2000, ISBN 92-64-18513-3,
- [25] JÍLEK, P. Problém oxidu uhličitého. *Ochrana ovzduší*, 1991, s. 115-119,
- [26] MALACHOVÁ, K., LEDNICKÁ, D., DANIHELKA, P., DEJ, M., HORÁK, J. Emise organických látek vznikajících spalováním černouhelných briket a jejich mutagenní účinky. *Ochrana ovzduší*. 2001, (č. 3), s. 5-9,

- [27] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Vyhláška č 117/1997 Sb., kterou se stanovují emisní limity a další podmínky provozování stacionárních zdrojů znečišťování a ochrany ovzduší ve znění vyhlášky 97/2000 Sb.,
- [28] MŽP ČR. Metodický pokyn odboru ochrany ovzduší Ministerstva životního prostředí České republiky pro zpoplatnění malých zdrojů znečišťování (podle § 8 odst. 1 se zřetelem k § 6 ods. 1a § 7 odst. 2 zákona 389/1991 Sb., o státní správě ochrany ovzduší a poplatcích za jeho znečišťování. In *Věstník Ministerstva životního prostředí ČR*, 1992 (č. 4),
- [29] NAŘÍZENÍ VLÁDY Č. 81/1999 Sb. kterým se mění NAŘÍZENÍ VLÁDY Č. 178/1997 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na stavební výrobky, 1999
- [30] NOSKIEVIČ, P. *Spalování uhlí*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1993, ISBN 80-7078-197-1,
- [31] Podnikové stránky ŽDB a.s. Závod topenářské techniky Viadrus, Kotel Ling25, http://www.viadrus.cz/male_kotle_ling25.html,
- [32] SEMENOV, N. S. *Cepnyje reakcii*. Leningrad, 1934,
- [33] STERN, A. C., WOHLERS, H. C., BOUBEL, R. W., LOWRY, W. P. *Fundamentals of Air Pollution*. New York: Academic Press, 1973,
- [34] TEKO. *Přehled o dodávkách a jakosti tuhých paliv na území ČR v roce 1997 pro účely registru emisních zdrojů*. Praha, 1998,
- [35] TEYSSLER, J. *Spalování popelnatých hnědých uhlí*. Praha: SNTL, 1988,
- [36] Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, <http://www.unmz.cz/index.html>,
- [37] VACÍK, J., BÁRTHOVÁ, J., PACÁK, J., STRAUCH, B., SVOBODOVÁ, M., ZEMÁNEK, F. *Přehled středoškolské chemie*. Olomouc: Moravské tiskárny a.s., 1996, ISBN 80-85937-08-5,
- [38] VOLNÁ, Z., DANIHELKA, P., KUBICA, K., OCELKA, T., HORÁK, J. Chování těžkých kovů během spalování uhlí a biomasy. In *Sborník mezinárodní vědecké konference Spalování a životní prostředí – 2001*. Ostrava, 2001, s. 238-242, ISBN 80-7078-906-9,
- [39] ZÁKON Č. 22/1997 Sb. O technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, 1997,
- [40] ZÁKON Č. 30/1968 Sb. O státním zkušebnictví, 1968,
- [41] ZÁKON Č. 309/1991 Sb. O ochraně ovzduší před znečišťujícími látkami ve znění, zákonů č. 218/1992 Sb., č. 158/1994 Sb. a č. 71/2000 Sb. (tzv. zákon o ovzduší),
- [42] ZÁKON Č. 389/1991 Sb. o státní správě ochrany ovzduší a poplatcích za jeho znečišťování ve znění zákonů č. 211/1993 Sb., č. 158/1994 Sb., č. 86/1995 Sb., č. 71/2000 Sb., č. 132/2000 Sb. a č. 258/2000 Sb,
- [43] ZÁKON Č. 71/2000 Sb. Kterým se mění zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, a některé další zákony, 2000,
- [44] 1920-1995 and beyond: trending downwards. *Cogeneration and On-Site Power Production*, 2000, (no. 6), p.29-30.

Publikace autora vztahující se k problematice disertace:

1. OCHODEK, T., HORÁK, J. Měrné emise škodlivin ze zdrojů malých výkonů. In *Sborník konference Vývojové trendy v energetice z pohledu perspektivnej aplikácie clean coal technology II*. Košice, 1998, s. 273-279,
2. OCHODEK, T., HORÁK, J. Nowoczesne konstrukcje kotłów malej mocy so spalania węgla. In *Sborník konference Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłow*. Gliwice, 1998, s. 251-259, ISBN-83-910981-0-9,
3. GRABIC, R., DANIHELKA, P., OCELKA, T., DEJ, M., HORÁK, J. Emission of POPs from incineration of used oils in heat sources to 30 kW and to 233 kW power at presence of heavy metals. In *Sborník z konference Dioxíny v průmyslu*. Krakov, 1999,
4. OCHODEK, T., HORÁK, J. Moderní kotle malých výkonů na tuhá paliva. In *Sborník konference Snižování energetické náročnosti staveb*. Ostrava, 1999, s. 195-201,
5. OCHODEK, T., HORÁK, J. Výzkum moderních kotlů malých výkonů na tuhá paliva. In *Sborník konference RACIO 99*. Plzeň, 1999, s. 121-129,
6. DANIHELKA, P., SEIDLOVÁ, J., HORÁK, J. Problémy související s odsiřováním roštových kotlů. In *Sborník z konference Kotle a kotelní zařízení 2000*. Brno, 2000, s. 191-197, ISSN-1212-463X,
7. OCHODEK, T., HORÁK, J. Moderní koncepce malých uhelných kotlů. In *Sborník konference Energetika a životní prostředí*. Hradec Králové, 2000, s. 147-151,
8. HORÁK, J. Zkušenosti se snižováním emisí síry v ohništích malých výkonů. In *Sborník z konference Mezinárodní vědecká konference, sekce energetika*. Ostrava, 2000, s. 239-247, ISBN-80-7078-796-1,
9. HORÁK, J., KOTRÁŠ, V., VOLNÁ, Z. Moderní kotle malých výkonů a využití biomasy. In *Sborník konference Snižování energetické náročnosti budov*. Ostrava, 2000, s. 149-156, ISBN-80-02-01395-6,
10. HORÁK, J., VOLNÁ, Z., TRAGAN, T., KRPEC, K. Hodnocení kvality spalování uhlí a dřevěných pelet v kotli Ling 25. In *Sborník konference Spalování a Životní prostředí*. Ostrava, 2001, s. 134-138, ISBN 80-7078-906-9,
11. VOLNÁ, Z., DANIHELKA, P., KUBICA, K., OCELKA, T., HORÁK, J. Chování těžkých kovů během spalování uhlí a biomasy. In *Sborník mezinárodní vědecké konference Spalování a životní prostředí – 2001*. Ostrava, 2001, s. 238-242, ISBN 80-7078-906-9,
12. HORÁK, J. Podmínky a způsob měření průtoku spalin a vzdušin. In *Studijní materiál pro kurz Technik měření emisí I*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava VEC, 2001, s. 84-101,
13. MALACHOVÁ, K., LEDNICKÁ, D., DANIHELKA, P., DEJ, M., HORÁK, J. Emise organických látek vznikajících spalováním černouhelných briket a jejich mutagenní účinky. *Ochrana ovzduší*. 2001, (č. 3), s. 5-9,
14. OCHODEK, T., HORÁK, J., NOSKIEVIČ, P. Moderní energetické zdroje malých výkonů. In *Sborník konference Snižování energetické náročnosti budov 2001*. Ostrava, 2001, s. 73-76, ISBN 80-02-01452-9.