

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
17.listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Emisní faktory ze spalování tuhých paliv ve spalovacích zařízeních malých výkonů

Disertační práce

Autor:

Školitel:

Studijní program:

Obor:

Ing. František Hopan

prof. Ing. Pavel Noskievič, CSc.

P3904 Inženýrská ekologie

3904V012 Ochrana životního
prostředí v průmyslu

Ostrava 2010

Abstrakt:

Disertační práce se zabývá stanovením emisních faktorů vybraných znečišťujících látek pro spalovací zdroje malých výkonů. Experimentálně stanovené emisní faktory jsou srovnávány s emisními faktory používanými pro národní inventury emisí ČR. Práce je rozdělena do šesti hlavních částí:

První kapitola „Úvod“ v němž jsou stanoveny cíle disertační práce.

Druhá kapitola „Teoretická část“ stručně uvádí čtenáře do problematiky bilancování emisí, seznamuje se současnými emisními faktory a nastiňuje problematiku jejich stanovování.

Třetí kapitola „Metodika experimentů“ předkládá konkrétní konstrukce spalovacích zařízení, parametry paliv, speciální trať pro odvod spalin a metody vzorkování škodlivin a sledování tepelně technických parametrů provozu spalovacích zařízení.

Čtvrtá kapitola nazvaná „Experimenty“ popisuje průběh provedených experimentů. Tyto informace jsou nezbytné pro pochopení a správnou interpretaci výsledků.

Pátá kapitola „Výsledky“, je rozdělena do několika podkapitol. Každá podkapitola je věnována konkrétní znečišťující látce nebo skupině látek. Jednotlivé podkapitoly se věnují: oxidu uhelnatému, oxidům dusíku, oxidu siřičitému, nemetanovým těkavým organickým látkám, tuhým znečišťujícím látkám, dioxinům a furanům, polychlorovaným bifenylym, hexachlorbenzenem a polyaromatickým uhlovodíkům. Každá látka nebo skupina látek je stručně představena, jsou nastíněny rizika s jejím výskytem v ovzduší a mechanismus vzniku. Jsou představeny naměřené experimentální výsledky uspořádané podle druhu spalovaného paliva, použité konstrukce spalovacího zařízení a způsobu provozu zařízení. Výsledky jsou diskutovány a je provedeno jejich zobecnění pro využití v ČR. Zobecněné experimentálně stanovené emisní faktory jsou porovnány s emisními faktory používanými v ČR a s emisními faktory doporučovanými pro státy EU v dokumentu EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009 - Part B - 1. A.4. small combustion. Tyto tři sady emisních faktorů jsou aplikovány na modelovou spotřebu tuhých paliv a zemního plynu v domácnostech v ČR v roce 2006 a jsou tak demonstrovány dopady užití různých emisních faktorů na odhad množství emisí ze sektoru vytápění domácností.

Šestá kapitola „Závěr“ shrnuje nejdůležitější poznatky disertační práce. Rozděluje znečišťující látky na dvě kategorie. Jednou kategorií jsou znečišťující látky jejichž vznik je prioritně spjat s vlastnostmi spalovaného paliva a druhou skupinou jsou znečišťující látky jejichž vznik je prioritně spjat s kvalitou spalovacího procesu, tedy s konstrukcí spalovacího zařízení. A dále se kapitola zamýšlí nad možnostmi snižování emisí z malých zdrojů.

Klíčová slova:

emisní faktory, malé spalovací zdroje, tuhá paliva, látky znečišťující ovzduší, perzistentní organické polutanty

Abstract:

The dissertation thesis deals with determination of emission factors of selected pollutants in households. Experimentally determined emission factors are compared with the emission factors used for national emission inventories in the Czech Republic. The thesis is divided into six main sections:

The "Introduction" part, which specifies the objectives of the dissertation thesis.

The "Theoretical part" is briefly introducing readers to the problems of balancing emissions, acquaints with the current emission factors and outlines the problems with their determination.

The third section "Methodology of experiments" presents particular design of combustion equipment, fuel parameters, a special track for flue gas exhaust and methodology of sampling of pollutants and monitoring of thermal parameters of combustion plants.

The fourth chapter, entitled "Experiments", describes the course of experiments carried out. This information is necessary for proper understanding and interpretation of results.

The fifth chapter "results" is divided into several sections. Each subsection is devoted to a particular pollutant or group of substances. Individual subsections are dedicated to: carbon monoxide, nitrous oxide, sulfur dioxide, non-methane volatile organic compounds, solid pollutants, dioxins and furans, polychlorinated biphenyl, hexachlorobenzene and polyaromatic hydrocarbons. Every substance or group of substances is briefly introduced, the mechanism of their formation and the risks of their occurrence in the atmosphere are outlined. The chapter also presents experimental results obtained, which are organized by the type of fuel burned, the construction of incinerator and method of operation used. The results are discussed and generalized for the use in the country. The generalized experimentally determined emission factors are compared with the emission factors used in the Czech Republic and the emission factors recommended for the EU in the document EMEP / EEA Emission Inventory Guidebook 2009 - Part B - 1 A.4. small combustion. These three sets of emission factors are applied to model consumption of fossil fuels and natural gas in households in the Czech Republic in 2006 and thus the effects of using different emission factors to estimate emissions from domestic heating sector are demonstrated.

The sixth chapter 'Conclusion' summarizes the main findings of the dissertation. It divides pollutants into two categories. First category contains pollutants whose formation is mainly related to the characteristics of burned fuel and the other category contains pollutants whose formation is mainly related to the quality of the combustion process, and thus to the construction of the incinerator. The chapter further examines the options for reducing emissions from small sources.

Key words:

emission factors, small combustion, solid fuels, air pollutants, persistent organic pollutants

Čestné prohlášení a souhlas s publikováním

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracoval samostatně, podle pokynů školitele a s použitím uvedené literatury.

V souladu s §47a zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů souhlasím s publikováním textu své práce na webové stránce HGF VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 20. srpna 2010

Ing. František Hopan

Poděkování:

Na tomto místě chci poděkovat **Ministerstvu životního prostředí**, které v rámci **Resortního programu výzkumu** prostřednictvím projektu **SP/1A2/116/07 - Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory** poskytlo finance pro uskutečnění mnoha náročných experimentů.

Děkuji **všem kolegům**, kteří se podíleli na přípravě a realizaci experimentů.

Děkuji svému školiteli **prof. Ing. Pavlu Noskovičovi, CSc.** a **Ing. Jiřímu Horákovi, Ph.D.** za přizvání ke spolupráci na výše uvedeném projektu a za cenné rady a postřehy poskytnuté při vzniku této disertační práce.

Děkuji své **manželce** a **rodině** za toleranci a podporu v nelehkém období studií a tvorby této práce.

Obsah:

1	Úvod.....	15
1.1	Cíle práce	15
2	Teoretická část	16
2.1	Emise znečišťujících látek do ovzduší.....	16
2.2	Bilancování znečišťujících látek v ČR a EU.....	16
2.3	Emisní faktor.....	18
2.4	Specifikum malých zdrojů znečišťování, základní přehled typů používaných spalovacích zařízení a druhů paliva v ČR.....	19
2.5	Podíl malých zdrojů na znečištění ovzduší ČR pro vybrané látky (pro PAU a PM je dominantní).....	21
2.6	Rozsah sledovaných látek	22
2.7	Stanovení EF při spalování tuhých paliv v malých spalovacích zdrojích	22
3	Metodika experimentů	23
3.1	Cíle experimentů	23
3.2	Výběr spalovacích zařízení pro experimenty	24
3.3	Výběr paliv pro experimenty	31
3.4	Experimentální měřicí trať	33
3.5	Metodiky odběru a stanovení znečišťujících látek.....	35
4	Experimenty.....	46
4.1	Proměnné pro výběr experimentů	46
4.2	Popis průběhu experimentů.....	48
5	Výsledky	70
5.1	Komentář k formě vyjádření výsledků.....	71
5.2	Základní znečišťující látky - Oxid uhelnatý (CO)	73
5.3	Základní znečišťující látky - Oxidy dusíku (NO _x)	78
5.4	Základní znečišťující látky - Oxid siřičitý (SO ₂)	82
5.5	Základní znečišťující látky - Nemetanové těkavé organické látky (NMVOC).....	86
5.6	Tuhé znečišťující látky (TZL).....	91
5.7	Perzistentní organické polutanty (POP) - Dioxiny a furany (PCDD/F).....	96
5.8	Perzistentní organické polutanty - Polychlorované bifenyly (PCB).....	103
5.9	Perzistentní organické polutanty - Hexachlorbenzen (HCB).....	110

5.10	Perzistentní organické polutanty - Polyaromatické uhlovodíky (PAU).....	114
6	Závěr	121
6.1	Vliv paliva, konstrukce a výkonu zařízení	121
6.2	Odpovědi na položené otázky	122
6.3	Možnosti snižování emisí z malých spalovacích zdrojů	123
6.4	Využití výsledků této práce.....	124

Seznam tabulek:

tab. č. 1	EF pro malá spalovací zařízení používaná v ČR	19
tab. č. 2	Rozměry a tepelně technické parametry kotle Ling 25	25
tab. č. 3	Doporučené palivo pro kotel Ling 25	26
tab. č. 4	Základní parametry kotle U26	27
tab. č. 5	Základní parametry kotle DOR32.....	28
tab. č. 6	Základní parametry kotle C20S	30
tab. č. 7	Parametry použitých tuhých paliv	32
tab. č. 8	Porovnání rozborů vzorků hnědých uhlí s katalogovými hodnotami	32
tab. č. 9	Přehled provedených zkoušek – Matice kombinací paliva, zařízení a výkonu	48
tab. č. 10	Vybrané provozní parametry série 1 (automatický, HU1, 100 % jm. výkonu)	49
tab. č. 11	Vybrané provozní parametry série 2 (prohořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)	50
tab. č. 12	Vybrané provozní parametry série 3 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)	52
tab. č. 13	Vybrané provozní parametry série 4 (odhořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)	54
tab. č. 14	Vybrané provozní parametry série 5 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)	56
tab. č. 15	Vybrané provozní parametry série 6 (zplyňovací, BUK, 100 % jm. výkonu)	57
tab. č. 16	Vybrané provozní parametry série 7 (zplyňovací, HU1, 100 % jm. výkonu)	59
tab. č. 17	Vybrané provozní parametry série 8 (krbová kamna, BUK, 100 % jm. výkonu)	61
tab. č. 18	Vybrané provozní parametry série 9 (plynový kotel, zemní plyn, 100 % jm. výkonu).....	62
tab. č. 19	Vybrané provozní parametry série 10 (automatický, CU, 100 % jm. výkonu)	63
tab. č. 20	Vybrané provozní parametry série 11 (automatický, HU2, 100 % jm. Výkonu)	64
tab. č. 21	Vybrané provozní parametry série 12 (autoamtický, BIO, 100 % jm. výkonu)	65
tab. č. 22	Vybrané provozní parametry série 13 (prohořivací, CU, 100 % jm. výkonu)	66

tab. č. 23	Vybrané provozní parametry série 14 (odhořivací, CU, 100 % jm. výkonu).....	68
tab. č. 24	Vybrané provozní parametry série 15 (automatický, HU1, 60 % jm. výkonu).....	69
tab. č. 25	Vybrané provozní parametry série 16 (Automatický HU1, 30 % jm. výkonu).....	70
tab. č. 26	Matice měřených kombinací palivo, zařízení, výkon.....	71
tab. č. 27	Odhad zastoupení spalovacích zařízení v ČR podle instalovaného výkonu v %	72
tab. č. 28	Odhad spotřeby paliv v domácnostech za rok 2006	73
tab. č. 29	Stanovené EF CO vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ.....	74
tab. č. 30	Limitní koncentrace CO dle normy ČSN EN 303-5.....	76
tab. č. 31	Naměřené koncentrace CO v mg/m ³ _N při 10 % O ₂	77
tab. č. 32	Stanovené EF NO _x vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ	79
tab. č. 33	Stanovené EF SO ₂ vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ	83
tab. č. 34	Stanovené EF NMVOC vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ.....	87
tab. č. 35	Limitní koncentrace NMVOC dle normy ,ČSN EN 303-5	89
tab. č. 36	Naměřené koncentrace NMVOC mg/m ³ _N při 10 % O ₂	90
tab. č. 37	Stanovené EF TZL vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ	92
tab. č. 38	Limitní koncentrace TZL dle normy ,ČSN EN 303-5.....	95
tab. č. 39	Naměřené koncentrace TZL mg/m ³ _N při 10 % O ₂	95
tab. č. 40	Mezinárodní faktory ekvivalentů toxicity PCDD/F.....	97
tab. č. 41	Stanovené EF TEQ PCDD/F vztažené na energii obsaženou v palivu NG _{TEQ} /GJ	99
tab. č. 42	Mezinárodní faktory ekvivalentů toxicity PCB	104
tab. č. 43	Stanovené EF TEQ PCB vztažené na energii obsaženou v palivu NG/GJ.....	105
tab. č. 44	Stanovené EF sumy PCB vztažené na energii obsaženou v palivu μG/GJ	105
tab. č. 45	Stanovené EF HCB vztažené na energii obsaženou v palivu μg/GJ	111
tab. č. 46	Stanovené EF sumy sledovaných PAU vztažené na energii obsaženou v palivu MG/GJ.....	117
tab. č. 47	Celkové zhodnocení vlivu paliva, konstrukce zařízení a provozního výkonu pro všechny sledované škodliviny	122

Seznam obrázků:

obr. č. 1	Ling 25	25
obr. č. 2	Hercules U26	26
obr. č. 3	Dakon DOR 32	28
obr. č. 4	Atmos kombi C20S.....	29
obr. č. 5	Detail spalovacího prostoru kotle C20S	29
obr. č. 6	Krbová kamna Romotop Storch Etna	31
obr. č. 7	Schéma ředícího tunelu.....	33
obr. č. 8	Ředící tunel	34
obr. č. 9	Schéma zapojení aparatury pro stanovení TZL	37
obr. č. 10	Schéma aparatury pro odběr PCDD/F, PCB a PAU	40
obr. č. 11	Pohled do spalovací komory při části zkoušky 3-1	53
obr. č. 12	Kouř vycházející z kotle při části zkoušky 3-1	53
obr. č. 13	Zadehtovaný držák filtru po odběru TZL po zkoušce 3-1	53
obr. č. 14	Zabarvení sorpčních roztoků na POP po zkoušce 3-1	53
obr. č. 15	Kotel umístěný na váhovém mostu.....	57
obr. č. 16	Pohled na hořící palivo do zásobníku kotle	57
obr. č. 17	Kotel na váhovém mostu	60
obr. č. 18	Palivo v zásobníku	60
obr. č. 19	Zapálené palivo v zásobníku.....	60
obr. č. 20	Popel ve spodní části kotle.....	60
obr. č. 21	Spečenec popela na retortě kotle	66
obr. č. 22	Detail přetaveného popela	66
obr. č. 23	Strukturní vzorec 2,3,7,8-tetrachlordibenzodioxinu	96
obr. č. 24	Strukturní vzorce pro dioxiny a furany.....	96
obr. č. 25	Obecná struktura molekuly PCB	103
obr. č. 26	Molekula HCB	110
obr. č. 27	Prohlášení uživatele výsledků řešení projektu č. SP/1a2/116/07	124

Seznam grafů:

graf č. 1	Průběhy naměřených výkonů série 1 (automatický, HU1, 100 % jm. výkonu)	49
graf č. 2	Průběhy naměřených výkonů série 2 (prohořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)	51
graf č. 3	Průběhy naměřených výkonů série 3 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)	53
graf č. 4	Průběhy naměřených výkonů série 4 (odhořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)	55
graf č. 5	Průběhy naměřených výkonů série 5 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)	56
graf č. 6	Průběhy naměřených výkonů série 6 (zplyňovací, BUK, 100 % jm. výkonu)	58
graf č. 7	Průběhy naměřených výkonů série 7 (zplyňovací, HU1, 100 % jm. výkonu)	59
graf č. 8	Průběhy naměřených koncentrací kyslíku ve spalinách za zařízením série 8 (krbová kamna, BUK, 100 % jm. výkonu)	61
graf č. 9	Průběhy naměřených výkonů série 9 (plynový kotel, zemní plyn, 100 % jm. výkonu).....	62
graf č. 10	Průběhy naměřených výkonů série 10 (automatický, CU, 100 % jm. výkonu)	63
graf č. 11	Průběhy naměřených výkonů série 11 (automatický, HU2, 100 % jm. Výkonu)	64
graf č. 12	Průběhy naměřených výkonů série 12 (autoamtický, BIO, 100 % jm. výkonu)	65
graf č. 13	Průběhy naměřených výkonů série 13 (prohořivací, CU, 100 % jm. výkonu)	67
graf č. 14	Průběhy naměřených výkonů série 14 (odhořivací, CU, 100 % jm. výkonu)	68
graf č. 15	Průběhy naměřených výkonů série 15 (automatický, HU1, 60 % jm. výkonu)	69
graf č. 16	Průběhy naměřených výkonů série 16 (Automatický HU1, 30 % jm. výkonu)	70
graf č. 17	Porovnání EF CO doporučovaných dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC	75
graf č. 18	Modelový odhad emisí CO z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC	76
graf č. 19	Trend závislosti obsahu dusíku v palivu na EF NO _x (srovnání zkoušek provedených na automatickém kotli).....	80

graf č. 20	Trend závislosti teploty spalin na EF NO _x (srovnání zkoušek provedených na automatickém kotli s palivem HU1)	81
graf č. 21	Porovnání EF NO _x doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC	81
graf č. 22	Modelový odhad emisí NO _x z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC	82
graf č. 23	Porovnání EF SO ₂ doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC	84
graf č. 24	Trend závislosti obsahu síry v palivu na EF SO ₂ (srovnání všech provedených experimentů)	85
graf č. 25	Modelový odhad emisí SO ₂ z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC	85
graf č. 26	Trend závislosti emisí CO na emisích NMVOC (data z experimentů na automatickém kotli)	88
graf č. 27	Porovnání EF NMVOC doporučených EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC	88
graf č. 28	Modelový odhad emisí NMVOC z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC	89
graf č. 29	Porovnání EF TZL doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC	93
graf č. 30	Trend závislosti obsahu popela v palivu na EF TZL (srovnání všech provedených experimentů)	94
graf č. 31	Modelový odhad emisí TZL z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC	94
graf č. 32	Vliv množství TEQ PCDD/F na obsah chloru v palivu.....	100
graf č. 33	Stanovené koncentrace TEQ PCDD/F na automatickém kotli při spalování různých typů paliv a srovnání s limitní koncentrací legislativně stanovenou pro spalovny odpadů	101
graf č. 34	Porovnání EF TEQ PCDD/F doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC.....	101
graf č. 35	Modelový odhad emisí TEQ PCDD/F z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC.....	102
graf č. 36	Porovnání EF PCB doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC	107
graf č. 37	Modelový odhad emisí PCB z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC	107
graf č. 38	Vztah mezi PCB a PCDD/F dle Pandelova et al.,2009	108
graf č. 39	Vztah mezi koncentrací TEQ PCB a koncentrací TEQ PCDD/F stanovený z experimentů na VEC.....	108

graf č. 40	Vztah mezi koncentrací TEQ PCB a obsahem chloru v surovém palivu ...	109
graf č. 41	Porovnání EF HCB doporučených dle EEA a stanovených VEC	112
graf č. 42	Modelový odhad emisí HCB z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA a VEC	113
graf č. 43	Vztah mezi koncentrací HCB a obsahem chloru v surovém palivu	113
graf č. 44	Vážené poměrové rozdělení PAU dle experimentálních dat VEC	116
graf č. 45	Vážené poměrové rozdělení PAU dle EEA.....	118
graf č. 46	Vážené poměrové rozdělení PAU dle ČHMÚ.....	119
graf č. 47	Vážené poměrové rozdělení PAU dle EEA, ČHMÚ a VEC	119
graf č. 48	Porovnání EF sumy 4 PAU doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC.....	120
graf č. 49	Modelový odhad emisí sumy 4 PAU z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC.....	121

Seznam zkratek:

BIO	palivo použité k experimentům, pelety z kukuřičné slámy, jedná se o palivo s vyšším obsahem chloru oproti dřevu
BUK	buková polena, palivo použité k experimentům
CDV	Centrum dopravního výzkumu v Brně
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution - Úmluva o dálkovém přenosu znečišťujících látek přes hranice států
CO	oxid uhelnatý
CORINAIR	Core Inventory of Air Emissions
CU	černé uhlí, palivo použité k experimentům, původ Polsko
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČUTŘ	tříděné černé uhlí
EEA	European Environment Agency
EF	emisní faktor
EMEP	Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe
EPA	United States Environmental Protection Agency
EPER	The European Pollutant Emission Register
E-PRTR	The European Pollutant Release and Transfer Register
EU	Evropská unie
HCB	hexachlorbenzen
HU	hnědé uhlí, palivo použité k experimentům, původ Severočeské Doly
HUTŘ	tříděné hnědé uhlí
ISKO	Informačního systému kvality ovzduší
NFR	Nomenclature For Reporting - UNECE nomenclature for reporting of air pollutants
NMVOC	nemetanové těkavé organické sloučeniny
NO _x	oxidy dusíku
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované bifenyly
PCDD/F	polychlorované dibenzo-p-dioxiny a furany
PM ₁₀	Prachové částice o velikosti menší než 10 mikrometrů
PM _{2,5}	Prachové částice o velikosti menší než 2,5 mikrometrů
POP	Perzistentní organické polutanty
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší
SLDB	Sčítání lidu, domů a bytů
SNAP97	Selected Nomenclature for Air Pollution (EEA)
SO _x	oxidy síry (oxid siřičitý)
TEQ	toxický ekvivalent
TK	těžké kovy
TZL	tuhé znečišťující látky
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VEC	Výzkumné energetické centrum
ZL	základní znečišťující látky
ZP	zemní plyn

1 Úvod

Poznání, vědění a informace jsou nejcennějším pokladem národa či lidstva. Každý národ je tím bohatší, čím více o sobě ví. V současné době je pozornost často směřována na ochranu životního prostředí, které je poměrně novým oborem a mnoho jeho aspektů stále není uspokojivě vysvětleno a prozkoumáno. V současné době jsou na národních, evropských a světových úrovních zpracovávány evidence množství vypouštěných znečišťujících látek. Tyto databáze se snaží podchytit v maximální míře všechny zdroje vypouštějící znečišťující látky do složek životního prostředí. Jsou to zdroje přírodní, například sopečná činnost, lesní požáry apod., ale také zdroje antropogenní, zdroje vzniklé lidskou činností. Mezi tyto zdroje spadá zemědělská činnost a průmyslová činnost, energetika, doprava, zpracovávání a zneškodňování odpadů.

Tato disertační práce se zabývá problémem vypouštění škodlivých látek vznikajících při vytápění domácností malými zdroji spalování. A také se snaží odpovědět na následující otázky:

- Je vůbec možné věrohodně stanovit bilanci (odhad) emisí znečišťujících látek z malých spalovacích zdrojů?
- Jsou emisní faktory používané v současné době pro odhad množství emisí z malých spalovacích zdrojů v ČR věrohodné?

Malé spalovací zdroje spalující tuhá paliva, zejména uhlí a dřevo, jsou zřejmě významným zdrojem emisí mnoha znečišťujících látek. Jejich kvantifikace je velmi obtížná, neboť se jedná o statisíce zdrojů různého stáří, různých konstrukcí a spalujících různá paliva, která jsou plošně rozmístěná po území ČR. Do tohoto stanovení vstupuje velké množství statistických a empiricky stanovených dat, která jsou zatížena značnou nejistotou.

1.1 Cíle práce

Cílem práce je experimentální kvalifikované stanovení hodnot emisních faktorů všech sledovaných znečišťujících látek pro typické konstrukce malých spalovacích zařízení a pro typická paliva používaná v ČR.

Pro systematickou náročnost úkolu jsem řešenou problematiku rozdělil následujících dílčích cílů:

- a) Volba reprezentativních spalovacích zařízení a reprezentativních paliv charakteristických pro Českou republiku,
- b) Volba sledovaných znečišťujících látek, příprava vhodných měřicích metodik, metod stanovení a jejich validace,
- c) Volba a sestavení tratí a aparatur pro reprezentativní vzorkování znečišťujících látek,
- d) Provedení spalovacích zkoušek zaměřených na stanovení emisních faktorů znečišťujících látek,
- e) Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich přehledné zpracování,
- f) Stanovení vlivu spalovacího zařízení na velikost emisních faktorů znečišťujících látek,

- g) Stanovení vlivu paliva na velikost emisních faktorů znečišťujících látek,
- h) Stanovení vlivu provozu spalovacího zařízení na velikost emisních faktorů znečišťujících látek,
- i) Návrh obecných emisních faktorů pro ČR na základě naměřených dat a jejich porovnání s hodnotami emisních faktorů používanými v současnosti.

2 Teoretická část

2.1 Emise znečišťujících látek do ovzduší

2.1.1 Co jsou to emise znečišťujících látek?

Termín „emise“ nejlépe vystihují české ekvivalenty „vnášení“ nebo „vypouštění“ znečišťujících látek do ovzduší. Je to proces spojený s činností nebo dějem. Dle zákona č. 86/2002 je termín emise definován jako vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do životního prostředí.

Znečišťující látky definuje tentýž zákon č. 86/2002 o ovzduší jako látky tuhé, kapalné a plynné, které mají nebo mohou mít po fyzikální nebo chemické přeměně nebo po spolupůsobení s jinou látkou škodlivý vliv na lidské zdraví a pohodu, zdraví zvířat, na životní prostředí, na klimatický systém Země nebo na hmotný majetek.

Znečišťování ovzduší je proces vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do ovzduší v důsledku lidské činnosti vyjádřené v jednotkách hmotnosti za jednotku času.

2.2 Bilancování znečišťujících látek v ČR a EU

2.2.1 Bilance emisí znečišťujících látek v České republice

V České republice jsou, dle zákona o ovzduší č. 86/2002, zdroje emisí evidovány v tzv. „Registru emisí a zdrojů znečišťování ovzduší“ (REZZO). REZZO je využíván mj. také k bilancím emisí jednotlivých znečišťujících látek do ovzduší a zajištěním jeho provozu je pověřen Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Zákon o ovzduší dělí zdroje na 2 základní skupiny:

- stacionární zdroje znečišťování ovzduší:
 - zvláště velké a velké zdroje znečišťování REZZO 1 (>5 MW_t a závažné technologie),
 - střední zdroje znečišťování REZZO 2 (od 0,2 do 5 MW_t a významnější technologie),
 - malé zdroje znečišťování REZZO 3 (<200 kW_t), nejvýznamnější část zdrojů této kategorie z pohledu tvorby emisí zastupuje skupina spalovacích zařízení používaných pro vytápění domácností tuhými palivy do výkonu cca 40 kW.
- mobilní zdroje znečišťování ovzduší, označovány jako REZZO 4.

Data pro bilanci emisí zvláště velkých, velkých a středních zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO 1 a 2) jsou převážně získávána z kontinuálního měření nebo z pravidelně se opakujících jednorázových měření emisí těchto zdrojů.

Bilanci mobilních zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO 4) řeší modelově Centrum dopravního výzkumu v Brně (CDV) podle vlastních metodik.

Malé zdroje znečišťování ovzduší (REZZO 3) zahrnují stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu nižším než 0,2 MW, zařízení technologických procesů, nespádajících do kategorie velkých a středních zdrojů, plochy, na kterých jsou prováděny práce, které mohou způsobovat znečišťování ovzduší, skládky paliv, surovin, produktů, odpadů a zachycených exhalátů a jiné stavby, zařízení a činnosti, výrazně znečišťující ovzduší. V rámci REZZO 3 jsou modelově vypočítávány emise z vytápění domácností, emise těkavých organických látek z plošného použití rozpouštědel, emise NH₃ z nesledovaných chovů hospodářských zvířat a z nakládání s chlévskou mrvou a emise TZL z výše uvedených chovů zvířat. Emise jsou modelově vypočítávány na pracovišti ČHMÚ Milevsko a posílány do Informačního systému kvality ovzduší (ISKO).

2.2.2 Bilancování (odhad) množství emisí znečišťujících látek z malých spalovacích zdrojů (vytápění domácností)

Základním úskalím stanovení bilance (odhadu) je značné množství nepravidelně rozmístěných zdrojů na sledovaném území, různých konstrukcí spalujících různé typy paliv.

Bilance emisí dané znečišťující látky na daném území jsou vypočítávány podle relativně jednoduchého vzorce:

a) počítá se ze spotřeby paliv pro vytápění domácností

$$A = \sum_i (P_i \cdot EF_{(1)i}) \quad [\text{kg / rok}] \quad (1)$$

b) počítá se z potřeby energie na vytápění domácností

$$A = \sum_i (E_i \cdot EF_{(2)i}) \quad [\text{kg / rok}] \quad (2)$$

Kde

A	roční emise dané látky na sledovaném území [kg/rok]
i	druhy paliv (hnědé a černé uhlí, koks, dřevo, lehké topné oleje, propanbutan a zemní plyn)
P _i	roční spotřeba daného paliva [t/rok nebo v tis. m ³ /rok pro plynné palivo]
EF _{(1)i}	emisní faktor dané látky pro dané palivo [g/t nebo v kg/tis. m ³ pro plynné palivo]
E _i	roční spotřeba energie při použití daného paliva na vytápění domácností [GJ/rok]
EF _{(2)i}	emisní faktor dané látky pro dané palivo v [kg/GJ příkonu]

Tyto bilance jsou stanovovány pro jednotlivé obce, města a kraje a následně jako souhrn pro celou Českou republiku.

Pro stanovení energetické spotřeby a následně spotřeby paliva pro každou obec je potřeba značného množství statistických dat jako např. počet obyvatel, průměrná velikost otápené

plochy, typ a vlastnosti paliva používané k vytápění, klimatologické informace a mnoho dalších. Data byla získána ze Sčítání lidu, domů a bytů v roce 2001, která jsou průběžně aktualizována a verifikována dle metodik ČHMÚ [2].

Další veličinou potřebnou pro stanovení bilance je emisní faktor (EF) dané látky pro dané palivo.

2.3 Emisní faktor

Emisní faktor je empiricky stanovená veličina, která vyjadřuje střední množství sledované škodliviny vztažené na spálené jednotkové množství daného paliva nebo na energii v palivu obsaženou. Hodnota emisního faktoru závisí převážně na těchto základních vlivech:

- konstrukce spalovacího zařízení (konstrukce spalovací komory, rozvody spalovacích vzduchů, typ spalování/zplyňování, prohořívání, odhořívání, velikost spalovací komory, čas setrvání hořlaviny v oblasti vysokých teplot),
- způsob přikládání paliva (kontinuálně - automaticky, dávkově - ručně),
- provozní podmínky spalovacího zařízení (teplota ve spalovací komoře, regulace přívodu spalovacích vzduchů, kvalifikovanost obsluhy),
- vlastnosti paliva (druh, místo původu, vlhkost, obsah a vlastnosti popelovin, kontaminace, granulometrie).

2.3.1 Používané emisní faktory

Stanovení množství emisí je prováděno s využitím emisních faktorů daných prováděcím předpisem (příloha č. 2 NV 205/2009 Sb [4]), a emisních faktorů získaných z jiných dostupných zejména zahraničních zdrojů [22] pro další škodliviny (TK, POP aj.). Tyto používané emisní faktory jsou stanoveny pro ohlašování emisí v rámci plnění závazků Úmluvy o dálkovém přenosu znečišťujících látek přes hranice států (CLRTAP).

Emisní faktory NO_x pro malé zdroje byly vyhláškou č. 205/2009Sb. změněny oproti původním uvedeným ve vyhlášce č. 356/2002Sb. Pro hnědé uhlí tříděné a lehký topný olej (LTO) zůstal emisní faktor stejný, pro černé uhlí tříděné a koks byl změněn z 1,5 na 2 kg/t, pro dřevo ze 3 na 0,75 kg/t, pro propan-butan (PB) z 2,4 na 1,8 kg/t a pro zemní plyn z 1600 na 1300 kg/10⁶ m³.

Znečišťující látka	jednotka	hnědé uhlí tříděné	černé uhlí tříděné	koks	dřevo	LTO	PB	zemní plyn
Tuhé emise (TE)	kg/t (kg/10 ⁶ m ³)	1,0*Ap	1,0*Ap	1,0*Ap	5,2	2,13	0,45	20
PM ₁₀	% z TE	75	75	60	95	83	100	100
PM _{2,5}	% z TE	25	25	30	90	67	100	100
SO ₂	kg/t (kg/10 ⁶ m ³)	19,0 * Sp	19,0 * Sp	19,0 * Sp	1	20*Sp	0,004	9,6
NO _x	kg/t (kg/10 ⁶ m ³)	3	2	2	0,75	10	1,8	1300
CO	kg/t (kg/10 ⁶ m ³)	45	45	45	1	0,359	0,46	320
NMVOC	kg/t (kg/10 ⁶ m ³)	8,9	8,9	8,9	0,89	0,34	0,09	64
PCB	mg/t	0,603	4,77	4,77	x	3,6	x	x
PCDD/F TEQ	mg/t	0,006	0,004	0,004	0,005	0,001	x	x
Benzo(b)fluoranten	mg/t	1150	1600	1600	3260	8,6	x	x
Benzo(k)fluoranten	mg/t	525	50	50	1080	3,9	x	x
Benzo(a) pyren	mg/t	845	1500	1500	2480	4,3	x	x
Indeno(1,2,3cd)pyren	mg/t	1110	3000	3000	1760	8,6	x	x
Cd	mg/t	6	0,233	21	x	50	x	x
Hg	mg/t	126	17	497	x	50	x	x
Pb	mg/t	277	12	1 076	x	1 260	x	x
As	mg/t	171	6	366	x	20	x	x
Cr	mg/t	38	x	33	x	480	x	x
Cu	mg/t	81	51	447	x	360	x	x
Ni	mg/t	34	36	28	x	44 000	x	x
Se	mg/t	51	20	112	x	x	x	x
Zn	mg/t	977	630	3 070	x	1 620	x	x

Ap ... obsah popele v původním vzorku paliva (%hm.)

Sp ... obsah síry v původním vzorku paliva (%hm.)

jednotky v závorce se vztahují k zemnímu plynu

tab. č. 1 EF pro malá spalovací zařízení používaná v ČR

Emisní faktory pro bilanci emisí znečišťujících látek pro malé spalovací zdroje používané v ČR uvádí tab. č. 1. Z tabulky vyplývá, že emisní faktory používané v ČR zohledňují druh paliva, ale nezabývají se typem spalovacího zařízení, ve kterém jsou paliva spalována ani kvalitou provozu zařízení. Je tedy zřejmé, že používání jedné hodnoty emisního faktoru pro jedno palivo představuje značné zjednodušení a výsledky bilance musí být zatíženy zvýšenou nejistotou vyhodnocení.

Hodnoty dnes používaných emisních faktorů byly stanoveny historicky a je třeba je aktualizovat a podrobit kritické analýze.

2.4 Specifikum malých zdrojů znečišťování, základní přehled typů používaných spalovacích zařízení a druhů paliva v ČR

Pro stanovení způsobu vytápění z pohledu typu spalovacího zařízení a typu paliva jsou využívány údaje sčítání lidu, domů a bytů (SLDB), zahrnující rozdělení bytů dle způsobu dodávky tepla na byty s dálkovým vytápěním, s kotelnou v domě (rodinné domy a bytové domy) a s individuálním vytápěním. Podle druhu paliva je pak rozdělováno vytápění na spalovací zařízení na tuhá paliva (v r. 2001 také se speciální skupinou bytů otápěných dřevem), kapalná a plynná (popř. kombinovaná) + nezahrnovaná skupina vytápění elektrickou energií a jinými druhy (zejména tepelná čerpadla).

2.4.1 Používané typy vytápění domácností

Počet bytů zahrnutých do kategorie REZZO 3 v členění na byty vytápěné uhlím, koksem, dřevem, kapalnými palivy a plynými palivy.

V České republice je vytápěno[2]:

- 39 % bytů dálkovým topením zásobovaným ze středních a velkých zdrojů,
- 36 % bytů zemním plynem,
- 6 % bytů elektřinou,
- 15 % bytů uhlím, což je asi 570 000 domácností,
- 4 % bytů dřevem, což je asi 152 000 domácností,
- zanedbatelné množství bytů lehkými topnými oleji, propan-butanem a ostatními způsoby jako např. tepelná čerpadla.

2.4.2 Používané druhy tuhých paliv a odhad počtu domácností v ČR používající pro vytápění tuhá paliva

Stanovení specifického druhu paliva je prováděno pro skupinu spalovacích zařízení na tuhá paliva. S využitím údajů dodavatelů uhlí a koksů je prováděno rozdělení spotřeby tuhých paliv na jednotlivé druhy – tříděné hnědé uhlí, tříděné černé uhlí a koks. Dle deklarace dodávek je následně prováděno rozdělení do jednotlivých krajů ČR.

Podíl spotřeby specifických druhů uhelných paliv je zhruba následující [2]:

- 90 % tříděné hnědé uhlí, což je asi 513 000 domácností,
- 5 % tříděné černé uhlí, což je asi 28 500 domácností,
- 5 % koks, což je asi 28 500 domácností.

Počet bytů zahrnutých do kategorie REZZO 3 s členěním na byty vytápěné hnědým uhlím, černým uhlím, koksem, dřevem, kapalnými palivy, zemním plynem (dříve také svítiplynem) a propan-butanem v členění na jednotlivé obce. Součástí výstupu jsou také jakostní parametry tuhých paliv.

Zdrojů (domácností) spadajících do REZZO3 je v České republice přibližně [2]:

- 513 000 spalujících tříděné hnědé uhlí,
- 152 000 spalujících dřeva,
- 28 500 spalujících tříděné černé uhlí,
- 28 500 spalujících koks.

2.4.3 Používané konstrukce malých spalovacích zdrojů

Pro zobecnování emisních faktorů je nutné mít na paměti také zastoupení používaných konstrukcí spalovacích zařízení (automatický, prohořivací, odhořivací nebo zplyňovací kotel) v členění na obce. Zpřesnění informací by mělo přinést příští Sčítání lidu, bytů a domů, které proběhne v roce 2011. K dispozici prozatím nejsou dostatečně věrohodné údaje, ale přibližný obrázek si je možno udělat například z údajů prodejnosti kotlů. Odhad zastoupení používaných konstrukcí kotlů je prezentován v tab. č. 27.

Prohořivací a odhořivací typy konstrukcí malých spalovacích zařízení jsou používány již řadu desítek let. Z dnešního pohledu jsou značně zastaralé, ale pořizovací cena je oproti zplyňovacím a automatickým kotlům 3 až 5 krát nižší.

2.5 Podíl malých zdrojů na znečištění ovzduší ČR pro vybrané látky (pro PAU a PM je dominantní)

Legislativa regulující oblast kvality ovzduší [20] přijatá v roce 1991 zásadním způsobem ovlivnila snížení množství vyprodukovaných emisí znečišťujících látek z velkých a středních zdrojů znečišťování ovzduší, které se projevilo ve zlepšené kvalitě ovzduší. Naproti tomu jen minimálně řešila problematiku emisí znečišťujících látek z malých zdrojů používaných pro vytápění domácností. Přestože dotační politika (1993 - 1996) úspěšně podporovala plynofikaci a podílela se na snížení spotřeby tuhých paliv o více než 70 %, soustavně vzrůstající cena zemního plynu a elektrické energie má ve značném měřítku za následek návrat obyvatelstva k používání cenově výhodnějších a dostupnějších paliv – uhlí a dřeva. Vizuálně je možné v období topné sezóny sledovat tento „návrat“ díky kouřícím komínům a zápachu.

Výstupy ročních bilancí emisí v posledních letech rovněž ukazují, že podíl malých zdrojů na celkovém znečištění některými škodlivinami je výrazný, ne-li dominantní. Zpracované studie [21] hovoří až o 66 % podílu znečištění polycyklickými aromatickými uhlovodíky (PAU) a 35% podílu primárních částic PM_{10} vyprodukovaných při vytápění domácností spalováním tuhých paliv. Trvale zvýšené imisní koncentrace PM_{10} a $PM_{2,5}$ představují jeden z největších současných problémů v oblasti kvality ovzduší v ČR. Tato problematika je pochopitelně také úzce spjata i s emisemi persistentních organických látek (POP). Trend zvýšeného podílu malých neprůmyslových zdrojů na celkových emisích těch nejnebezpečnějších látek je celoevropský [22]. Z emisní bilance PCDD/F 17ti evropských států vyplývá, že zatímco v roce 1985 jen cca 23 % emisí PCDD/F pocházelo z neprůmyslových zdrojů, v roce 2005 již malé neprůmyslové zdroje tvořily 50–60 % celkových emisí PCDD/F [23].

2.5.1 Nedostatek evidence kombinovaného způsobu vytápění

Při posuzování vlivu skladby vytápění domácností na kvalitu ovzduší je však nezbytné vzít v úvahu, že prezentované hodnoty vycházejí pouze z modelového vyjádření údajů ze Sčítání lidu, domů a bytů v r. 2001 (SLDB), aktualizovaného každoročně s využitím údajů dodavatelů paliv a tepla[2]. V rámci modelu je tak kalkulováno s dokumentovaným způsobem vytápění, tzn. v rodinném domku se zavedeným plynem je homogenně uvažováno pouze využití právě tohoto paliva. Již zmiňované cenové rozdíly v nákladech na vytápění různými druhy médií však s největší pravděpodobností vedou k tomu, že skutečně homogenní vytápění je realizováno jen menším procentem domácností, a to zejména v místech, kde je dostupnost dalších druhů paliv komplikovanější, než jinde. Často je využívána kombinace zdrojů tepla. Hlavní plynový zdroj je kombinován se zdrojem na spalování dřeva, např. krbová kamna.

2.5.2 Vliv topné sezóny na imisní situaci v průmyslových oblastech

Také dlouhodobá imisní data získaná v oblastech zasažených znečištěním z velkých průmyslových zdrojů, vykazují v průběhu topné sezóny pozoruhodné změny, které ukazují na nezanedbatelný podíl malých spalovacích zařízení na zhoršené kvalitě ovzduší. Obyvatelé v takto znečištěných oblastech často kladou vinu za zhoršenou kvalitu ovzduší jen velkým znečišťovatelům a nepřipouštějí si, že také oni sami se nemalým dílem na daném znečištění mohou podílet.

2.5.3 Shrnutí stavu

Spalování tuhých paliv je vždy doprovázeno produkcí znečišťujících látek a obecným cílem by mělo být jejich množství snížit na přijatelnou úroveň. Otázkou ovšem zůstává, kdo tuto úroveň stanoví a hlavně zda vůbec existují nějaké, v reálném životě použitelné, nástroje pro její prosazení. Co dělat? Známe řešení? Jak kontrolovat co a jak je spalováno v českých obydlích? Značná část domácností spalující tuhá paliva tak činí s ohledem na menší náklady na topnou sezónu, a proto jsou nejrozšířenější levná spalovací zařízení, ve kterých se většinou spalují nevhodná paliva a také domovní odpad.

2.6 Rozsah sledovaných látek

Rozsah sledovaných škodlivin je dán zejména požadavky vycházejícími z NV 351/2002 Sb [3], určujícím rozsah znečišťujících látek, pro něž jsou sledovány limity kvality ovzduší, a dále pak požadavky na mezinárodní reporting k Úmluvě o dálkovém přenosu znečišťujících látek přes hranice států (CLRTAP), daný požadavky Směrnice pro odhad a ohlašování emisí (UNECE Guidelines for estimating and reporting emissions).

V současnosti se pro oblast malých zdrojů znečišťování ovzduší jedná o tyto skupiny látek:

- Základní znečišťující látky (ZL) - NO_x , CO , NMVOC, SO_2 , NH_3 ,
- Tuhé znečišťující látky (TZL) - celkové TZL, částice $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM_{10}), částice $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$),
- Těžké kovy (TK) – olovo (Pb), kadmium (Cd), rtuť (Hg), arzen (As), chrom (Cr), měď (Cu), nikl (Ni), selen (Se), zinek (Zn),
- Perzistentní organické polutanty (POP) - suma polychlorovaných bifenyly (ΣPCB), suma toxických ekvivalentů polychlorovaných dibenzo-p-dioxinů a polychlorovaných dibenzofuranů ($\Sigma\text{TEQ PCDD/F}$), hexachlorbenzen (HCB), benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, Indeno(1,2,3-cd)pyren, suma těchto 4 PAU.

Všechny tyto látky vyjma NH_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ a TK byly vzorkovány a vyhodnocovány pro všechny experimenty. Základní informace o všech sledovaných látkách nebo skupinách látek jsou uvedeny v kapitolách věnovaných jednotlivým znečišťujícím látkám.

2.7 Stanovení EF při spalování tuhých paliv v malých spalovacích zdrojích

Cílovou skupinou zdrojů znečišťování ovzduší jsou malá spalovací zařízení používaná pro vytápění domácností a spalující především tuhá paliva. Z hlediska množství emisí znečišťujících látek se jedná o nejvýznamnější část spadající do databáze REZZO 3.

Stanovení emisních faktorů základních plyných znečišťujících látek jako jsou CO , NO_x , SO_2 a TOC (NMVOC) je dobře zvládnutá oblast a jsou používány standardizované metodiky. Problematické však je stanovení tuhých znečišťujících látek a látek na ně vázaných, což zahrnuje také POP a TK.

2.7.1 Úskalí stanovení emisních faktorů

Stanovení emisních faktorů plyných látek, TZL a látek na ně vázaných ve spalinách ze spalování tuhých paliv v malých zdrojích znečišťování představuje specifickou metodickou oblast, protože se musí vyrovnat s mnoha nestandardními podmínkami.

2.7.1.1 Úskalí spojené se stanovením EF daného typu spalovacího zařízení a daného typu paliva

Často je nutné se vyrovnávat s problémy:

- Jako je nestabilita spalovacího procesu (nestabilita měřené matrice) a z ní vyplývající vyšší nejistota naměřených hodnot,
- převážně používána periodická – přerušovaná doprava paliva, celý spalovací proces pak probíhá ve spalovacích periodách a je velmi nestabilní (dynamický),
- nestabilní tlakové poměry v komíně, které jsou v úzké vazbě na změnu teploty spalin,
- proměnlivá rychlost hoření a tedy i spotřeby paliva během spalovací periody (příkládacího cyklu) a s tím související proměnlivé množství spalin v čase,
- proměnlivá koncentrace znečišťujících látek během spalovací periody (příkládacího cyklu),
- omezená opakovatelnost spalovacích zkoušek související se značnou citlivostí systému na vnější zásahy a změny podmínek,
- rychlost spalin v kouřovodech malých spalovacích zařízení je často v rozsahu 0,5 až 2 m/s. Standardizované metodiky zabývající se reprezentativním vzorkováním spalin z kouřovodu požadují rychlost vzorkovaného plynu alespoň 5 m/s, což vede k problémům s reprezentativním vzorkováním,
- složení spalin za spalovacím zařízením při teplotách 200 až 450 °C může být značně odlišné od složení spalin vycházejících z komínu při mnohem nižších teplotách. Může například docházet k tzv. de-novo syntéze, PCDD/F jsou formovány z neextrahovatelných uhlíkových struktur, které jsou zásadně rozdílné od finálních produktů [6].

Nejenže je rychlost spalin v komíně nízká a těžko měřitelná, ale navíc se mění v čase, takže reprezentativní vzorkování plynu (dodržení tzv. izokinetických podmínek odběru vzorku) je problematické a přitom pro správné stanovení velmi důležité.

2.7.1.2 Úskalí spojené se zobrazením EF na určitou geografickou oblast

Pro správné zobecnění EF znečišťujících látek je velmi důležité získat experimentální data na všech hlavních typech používaných spalovacích zařízení a paliv. Zobecnění je potom možno provádět na základě naměřených experimentálních dat a znalostí zastoupení spotřeby paliv a zastoupení spalovacích zařízení na území, pro které je EF stanovován.

3 Metodika experimentů

Na Výzkumném energetickém centru je zpracováván projekt zadaný Ministerstvem životního prostředí České republiky – projekt č. SP/1a2/116/07 „Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory“ v rámci něhož mohla vzniknout i tato disertační práce.

3.1 Cíle experimentů

Cílem experimentů bylo stanovit EF znečišťujících látek se zaměřením na:

- vliv spalovaného paliva
- vliv spalovacího zařízení
- vliv obsluhy zařízení

3.1.1 Vliv paliva

Stanovení vlivu spalovaného paliva pro velikost EF škodlivin. Bylo nutno vybrat několik paliv typických pro Českou republiku a spalovat je za podobných podmínek, nejlépe v jednom spalovacím zařízení.

3.1.2 Vliv spalovacího zařízení

Stanovení vlivu spalovacího zařízení pro velikost EF škodlivin. Bylo nutno vybrat několik spalovacích zařízení typických pro Českou republiku a spalovat v nich jedno palivo, pokud to bude vybrané spalovací zařízení umožňovat.

3.1.3 Vliv obsluhy zařízení

Stanovení vlivu obsluhy spalovacího zařízení na velikost EF škodlivin. Na jednom spalovacím zařízení při použití jednoho paliva budou provedeny zkoušky při různých provozních stavech daného zařízení. Zde je možno sledovat vliv dvou samostatných parametrů:

vliv provozu zařízení na jmenovitý výkon kotle a na jiný než jmenovitý výkon kotle

3.2 Výběr spalovacích zařízení pro experimenty

Bylo nutno vybrat ta zařízení, jejichž použití je v České republice typické. Zastoupení typů konstrukcí kotlů v ČR bylo nastíněno v kapitole 2.4.3. Na českém trhu je celá řada českých i zahraničních výrobců malých spalovacích zařízení různých konstrukcí, avšak pro testovací účely bylo třeba vybrat vždy jednoho zástupce. Vybrána byla tato spalovací zařízení:

- Jako zástupce **automatických kotlů** byl vybrán kotel Benekov Ling 25 (Ling 25).
- Jako zástupce **prohořivacích kotlů** byl vybrán kotel Viadrus Hercules U26 (U26)
- Jako zástupce **odhořivacích kotlů** byl vybrán kotel Dakon DOR 32 (DOR 32)
- Jako zástupce **zplyňovacích kotlů** byl vybrán kotel Atmos C20S (C20S)
- Jako zástupce **krbových kamen** byla vybrána kamna Romotop Storch Etna (ETNA)
- Jako zástupce **plynových kotlů** byl vybrán kotel Viadrus G27 ECO GL (ECO)

3.2.1 automatický kotel – Benekov Ling 25

Jako zástupce automatických kotlů byl vybrán teplovodní kotel Ling 25 (viz. obr. č. 1), který vyrábí společnost BENEKOVtherm s.r.o. (dále jen Ling 25). Kotel vychází z principu spodního přikládání paliva, kotlové těleso je svařováno z ocelových kotlových plechů. Kotel umožňuje spalování černého uhlí, hnědého uhlí a biomasy v podobě pelet. Kotel splňuje dle normy ČSN EN 303-5 třídu 3. Výrobce udává při provozu na uhlí jmenovitý výkon 25 kW a při provozu na dřevěné pelety jmenovitý výkon 22 kW. Pod výměníkem je umístěno spalovací zařízení, které je tvořeno litinovým roštem, keramickým stabilizátorem, retortou, tzn. litinovým kolenem pro přísun paliva a směšovačem vzduchu. Keramický stabilizátor usměrňuje hoření, snižuje úletovou prašnost, odráží teplo zpět do hořáku a pomáhá 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. Škrtkící klapou na ventilátoru je možno regulovat množství spalovacího vzduchu[27].



obr. č. 1 Ling 25

3.2.1.1 základní parametry

Rozměry a tepelně technické parametry kotle jsou uvedeny v tab. č. 2.

		Hnědé uhlí	dřevěné pelety
Jmenovitý výkon	kW	25	22
Regulovatelný výkon	kW	6,6 až 25	6,5 až 22
Spotřeba paliva	kg/h	1,9 až 6,2	1,6 až 5,4
Teplota spalin při jmenovitém výkonu	°C	185	210
Teplota spalin při minimálním výkonu	°C	115	110
Účinnost kotle	%	až 81,2	až 81,4
Hmotnost	kg	340	
Obsah vodního prostoru	dm ³	85	
Průměr kouřovodu	mm	145	
Kapacita zásobníku paliva	dm ³	160	
Teplosměnná plocha kotle	m ²	2,7	
Rozměry kotle: šířka x hloubka x výška	mm	1410 x 834 x 1418	
Kominový tah	mbar	1,9	

tab. č. 2 Rozměry a tepelně technické parametry kotle Ling 25

3.2.1.2 doporučené palivo

Palivo doporučené výrobcem: hnědé uhlí velikosti ořech 2 nebo dřevěné pelety s parametry uvedenými v tab. č. 3.

		Hnědé uhlí ořech 2	dřevěné pelety
Zrnitost	mm	10 až 25	průměr 6 až 14
Výhřevnost	MJ/kg	min. 17	
Obsah popele	%	max. 12	max. 1,5
Vlhkost	%	max. 20	max. 10
Obsah síry	%	max. 0,9	
Měrná sirnatost	g/MJ	max. 0,5	
Obsah prachu	%	max. 10	
Teplota tání popela	°C	max. 1500	
Obsah bitumenů	%	max. 3,5	

tab. č. 3 Doporučené palivo pro kotel Ling 25

3.2.2 prohořivací kotel – Viadrus Hercules U26

Jako zástupce prohořivacích kotlů byl zvolen teplovodní kotel Hercules U26 v 5ti článkové verzi, vyráběný firmou Viadrus (dále jen U26). Kotel je zobrazen na obr. č. 2. Tento kotel je určen ke spalování tuhých paliv – koksu, černého uhlí a dřeva (dřevěných briket). Kotel je vhodný pro vytápění menších obytných a rekreačních zařízení. Je možno jej zapojit do systému s přirozeným nebo nuceným oběhem otopné vody. Maximální provozní přetlak je 4 bar [24].



obr. č. 2 Hercules U26

3.2.2.1 konstrukce

Hlavní částí kotle je litinové článkové kotlové těleso. Články vytvářejí spalovací a popelníkový prostor, vodní prostor a konvekční část. Vstup a výstup otopné vody je umístěn na zadní části kotle. Celé kotlové těleso je izolováno minerální izolací, která snižuje ztráty sdílením tepla do okolí. Přívod spalovacího vzduchu do kotle je regulován samočinnou dusívkou dle teploty vody v kotli, umístěnou na popelníkových dvířkách. Sekundární vzduch je do kotle přiváděn manuálně ovládanou dusívkou na příkládacích dvířkách.

3.2.2.2 základní parametry

Základní parametry kotle U26 (5ti článková verze) pro koks, černé uhlí a dřevo jsou uvedeny v tab. č. 4.

		koks	černé uhlí	dřevo
Výkon kotle	kW	27 až 32		
Účinnost kotle		80	75	75
Max. teplota spalin	°C	250	300	300
Hmotnost kotle	kg	314		
Výška x šířka x hloubka	mm	1128 x 544 x 750		
Hloubka spalovacího prostoru	mm	405		
Objem vodního prostoru	l	39		
Světlost kouřové roury	mm	156		
Min. požadovaný komínový tah	mbar	0,2		
Doba hoření při jm. výkonu	hod	4	2	
Teplota spalin při jm. výkonu	°C	220 až 250	220 až 300	
Teplota spalin při minimálním výkonu	°C	120 až 180	120 až 190	
Třída kotle dle ČSN EN 303-5		1		

tab. č. 4 Základní parametry kotle U26

3.2.2.3 doporučené palivo

Kotel je určen pro spalování:

- černého uhlí o zrnitosti 24 až 60 mm, vlhkosti max. 15 % a výhřevnosti 26 až 28 MJ/kg
- koksu o zrnitosti 24 až 60 mm, vlhkosti max. 15 % a výhřevnosti 26 až 30 MJ/kg
- dřeva o vlhkosti max. 20 % a výhřevnosti 14 až 18 MJ/kg

3.2.3 odhořivací kotel – Dakon DOR 32

Jako zástupce odhořivacích kotlů byl vybrán kotel DOR 32 jehož výrobcem je firma Dakon (dále jen DOR 32). Kotel je zobrazen na obr. č. 3. Jedná se o ocelový teplovodní kotel, který je určen k vytápění bytů, rodinných domů, provozoven s tepelnou ztrátou cca 32 kW. Otopný systém může být s otevřenou nebo tlakovou expanzní nádobou a samotížným nebo nuceným oběhem otopné vody, s max. provozním přetlakem 200 kPa. Kotel je určen pro spalování pevných paliv.

Předepsané palivo je hnědé uhlí velikosti ořech 1. Výrobce však uvádí možnost spalování jiných typů paliv, nemusí však být zachovány výkonové parametry kotle[25].

3.2.3.1 Konstrukce

Těleso kotle je svařeno z ocelových výlisků. Vnitřní prostor je rozdělen na násypnou šachtu, spalovací prostor a spalinové cesty. Spalovací prostor je vyložen šamotovou vyzdívkou. Pod spalovacím prostorem a násypnou šachtou je uložena soustava otočných roštů. Spalovací vzduch je přiváděn do kotle regulovatelnou dusivkou, umístěnou v popelníkových dvířkách. Primární vzduch je veden pod otočné rošty a sekundární vzduch je veden do spalovacího prostoru. Pro zlepšení spalování je kotel vybaven přívodem terciárního vzduchu (do spalovacího prostoru) umístěným v bocích kotle.



obr. č. 3 Dakon DOR 32

3.2.3.2 základní parametry

Základní parametry kotle DOR 32 pro hnědé uhlí jsou uvedeny v tab. č. 5.

Výkon kotle	kW	32
Rozsah výkonu	kW	9 až 32
Účinnost kotle s použitím doporučeného paliva	%	74 až 78
Účinnost kotle s použitím náhradního paliva	%	72 až 83
Hmotnost kotle bez vody	kg	240
Výška x šířka x hloubka	mm	1040 x 700 x 870
Objem vodního prostoru	l	64
Světlost kouřové roury	mm	150
Min. požadovaný komínový tah	Pa	26
Teplota spalin při jm. výkonu	°C	250
Teplota spalin při minimálním výkonu	°C	100
Třída kotle dle ČSN EN 303-5		2

tab. č. 5 Základní parametry kotle DOR32

3.2.3.3 doporučené palivo

Předepsané palivo pro kotel DOR 32 je hnědé uhlí - zrnění ořech 1 (20 až 40 mm), o výhřevnosti 16 MJ/kg, obsah vody do 28%. V kotli lze topit i jinými druhy pevných paliv, nemusí být ale zachovány provozní podmínky a parametry kotle jako u předepsaného paliva.

3.2.4 zplyňovací kotel – Atmos C20S

Jako zástupce zplyňovacích kotlů byl vybrán kotel Atmos C20S (dále jen C20S). Kotel je konstruován pro spalování dřeva a hnědého uhlí na principu generátorového zplyňování s použitím odtahového ventilátoru, který odsává spaliny z kotle.

Teplovodní kotel ATMOS Kombi C20S (viz. obr. č. 4) je určen pro vytápění rodinných domů, chat, chalup a jiných obdobných objektů o tepelných ztrátách 20 až 48 kW. Kotel je konstruován na spalování hnědého uhlí ořech 1 a kusového dřeva o délce 330 mm.

K topení lze použít hnědé uhlí kostka, hnědouhelné a dřevěné brikety. Kotel není určen pro spalování pilin a drobného dřevního odpadu. Lze ho spalovat jen v malém množství spolu s uhlím nebo polenovým dřevem v maximálním poměru 1:10.

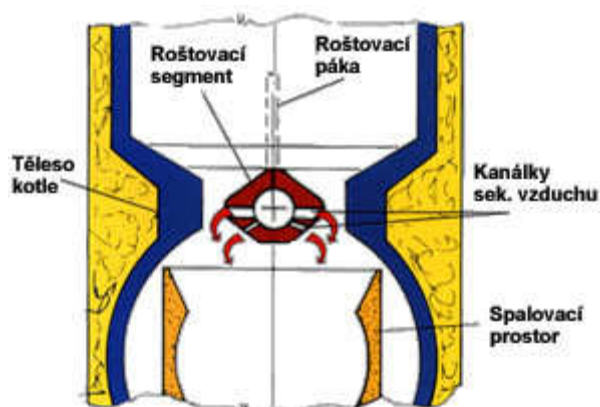
Kotel je vybaven dostatečně velkou násypkou paliva, proto odpadá pracná úprava dřeva dělením na menší kusy. Ušetří se tím nejen fyzická námaha, ale i čas nutný věnovat této práci[26].



obr. č. 4 Atmos kombi C20S

3.2.4.1 konstrukce

Těleso kotlů je vyrobeno jako svařenec z kvalitních ocelových plechů o tloušťce 3 až 6 mm. Je tvořeno dvěma nad sebou posazenými komorami, vrchní slouží jako zásobník paliva, spodní jako spalovací komora a popelník. Mezi nimi je umístěn nový, patentem chráněný otočný rošt (viz. obr. č. 5), který umožňuje dokonalé zplyňování uhlí a dřeva jednotlivě nebo dohromady a snadné odstraňování popela. V zadní části tělesa kotlů je svislý spalínový kanál, opatřený ve vrchní části zatápníci záklopkou. Vrchní část spalínového kanálu je opatřena odtahovým hrdlem pro připojení na komín.



obr. č. 5 Detail spalovacího prostoru kotle C20S

3.2.4.2 základní parametry

Základní parametry kotle C20S pro uhlí a dřevo jsou uvedeny v tab. č. 6.

Výkon kotle	kW	20
Rozsah výkonu	kW	17 až 25
Účinnost kotle v celém rozsahu výkonu	%	81 až 84
Hmotnost kotle	kg	298
Výška x šířka x hloubka	mm	1420 x 590 x 770
Obsah násypky paliva	dm ³	100
Objem vodního prostoru	l	64
Světlost kouřové roury	mm	152
Min. požadovaný komínový tah	Pa	25
Třída kotle dle ČSN EN 303-5		3

tab. č. 6 Základní parametry kotle C20S

3.2.4.3 doporučené palivo

- Hnědění uhlí o zrnitosti ořech 2 nebo kostka
- Kusové dříví o délce 330 mm nebo dřevěných briket

3.2.5 křbová kamna – ETNA

Jedná se o výrobek firmy Romotop, který je v Německu prodáván pod značkou STORCH. Jsou to křbová kamna moderní konstrukce, které se vyznačují nahoru vysouvateľnými a zároveň také výklopnými dvířky. Zařízení je vybaveno centrálním přívodem spalovacího vzduchu, který je rozdělen na primární a sekundární spalovací vzduch a předehřátý vzduch pro oplachování skleněných výplní kamen. Kamna disponují velkou spalovací komorou a výměníkem s dvojitou změnou směru kouře. Pro účinnou regulaci výkonu je do kamen vestavěna škrťící klapka přívodního vzduchu. Dále jsou kamna vybavena uzavíratelným roštem pro lepší spalování dřeva a briket. Odvod kouře z kamen je možno volit v provedení nahoru nebo dozadu. Ve spodní části jsou kamna vybavena praktickou zásuvkou na pomůcky, vhodnou k uložení příslušenství [28]. Pohled na křbová kamna je na obr. č. 6.

3.2.5.1 základní parametry

Dle výrobce se vyznačují těmito vlastnostmi:

- hmotnost bez keramiky 235 kg
- hmotnost s keramikou 435 kg
- jmenovitý výkon 8 kW
- regulovatelný rozsah výkonu 4 až 11 kW
- průměr kouřovodu 150 mm
- vytápěcí schopnost 180 m³
- tah 12 Pa
- účinnost 80,3 %.

3.2.5.2 doporučené palivo

Štípané dříví nebo brikety.



obr. č. 6 Krbová kamna Romotop Storch Etna

3.3 Výběr paliv pro experimenty

Paliva byla vybrána s přihlédnutím k udávaným spotřebám, druhům a vlastnostem paliv používaných k vytápění domácností v ČR. Po získání a zpracování těchto dat bylo rozhodnuto pro experimenty použít tato paliva: hnědé tříděné uhlí, černé tříděné uhlí, bukové dřevo, pelety z kukuřičné slámy a zemní plyn.

Z každého pořízeného tuhého paliva byly odebrány vzorky, u kterých byl v laboratořích Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí a.s. (akreditovaná zkušební laboratoř č. 1078) proveden hrubý technologický rozbor, prvkový rozbor, výhřevnost, prvkové složení paliva a rozbor obsahu chloru. Výsledky těchto rozborů jsou uvedeny v tab. č. 7.

Palivo		Hnědé uhlí	Hnědé uhlí	Černé uhlí	Bukové dřevo	Biomasa
Označení paliva		HU1	HU2	CU	BUK	BIO
Původ paliva		Severočeské doly a.s.	Severočeské doly a.s.	Polské	-	kukuřičná sláma
Granulometrie		ořech 1 (20 až 40 mm)	ořech 2 (10 až 25 mm)	ořech 1 (20 až 40 mm)	kusové	peletky (průměr 5 mm, délka 9 mm)
Q_i^r	kJ/kg	19 060	19 190	31 860	15 680	13 200
V^{daf}	%	51,09	53,1	32,53	85,58	82,24
C^r	%	46,88	46,56	78,01	41,10	35,25
H^r	%	3,83	3,82	4,33	5,11	4,42
N^r	%	0,65	0,72	1,01	0,09	0,79
O^r	%	16,35	16,53	10,46	43,08	33,43
S^r	%	0,62	0,91	0,67	0,22	0,13
A^r	%	4,18	6,91	3,01	0,83	15,78
w^r	%	27,48	24,56	4,48	9,58	10,21
C^{daf}	%	68,60	67,94	84,33	45,88	47,63
H^{daf}	%	5,60	5,57	4,68	5,70	5,97
N^{daf}	%	0,95	1,05	1,09	0,10	1,07
O^{daf}	%	23,92	24,12	11,31	48,09	45,17
S^{daf}	%	0,91	1,33	0,72	0,25	0,18
Cl^r	%	0,0031	0,0078	0,1554	0,0053	0,1057

tab. č. 7 Parametry použitých tuhých paliv

U hnědých uhlí HU1 a HU2 byly stanovené hodnoty konfrontovány s hodnotami uvedenými v katalogu hnědého uhlí [5] vydaných společností Severočeské Doly a.s. Jediný rozdíl mezi HU1 a HU2 je v granulometrii paliva viz. tab. č. 7.

K původu paliva CU se podařilo zjistit pouze to, že pochází z Polska. Podrobnější informace nejsou k dispozici.

označení paliva		HU1		odchylka vzorku vůči katalogu %	HU2		odchylka vzorku vůči katalogu %
		vzorek	katalog		vzorek	katalog	
Q_i^r	kJ/kg	19 060	17 600	8,3	19 190	17 600	9,0
V^{daf}	%	51,09	51,00	0,2	53,1	51,00	4,1
A^r	%	4,18	6,84	x	6,91	6,84	x
w^r	%	27,48	30,20	x	24,56	30,20	x
C^{daf}	%	68,60	71,41	-3,9	67,94	71,30	-4,7
H^{daf}	%	5,60	5,45	2,8	5,57	5,50	1,3
N^{daf}	%	0,95	0,89	6,9	1,05	0,89	18
O^{daf}	%	23,92	22,15	8,0	24,12	22,21	8,6
S^{daf}	%	0,91	1,22	-26	1,33	1,22	8,6
A^d	%	5,76	9,80	-41	9,16	9,80	-6,5
Cl	%	0,0040	0,0286	-86	0,0097	0,0315	-69

tab. č. 8 Porovnání rozborů vzorků hnědých uhlí s katalogovými hodnotami

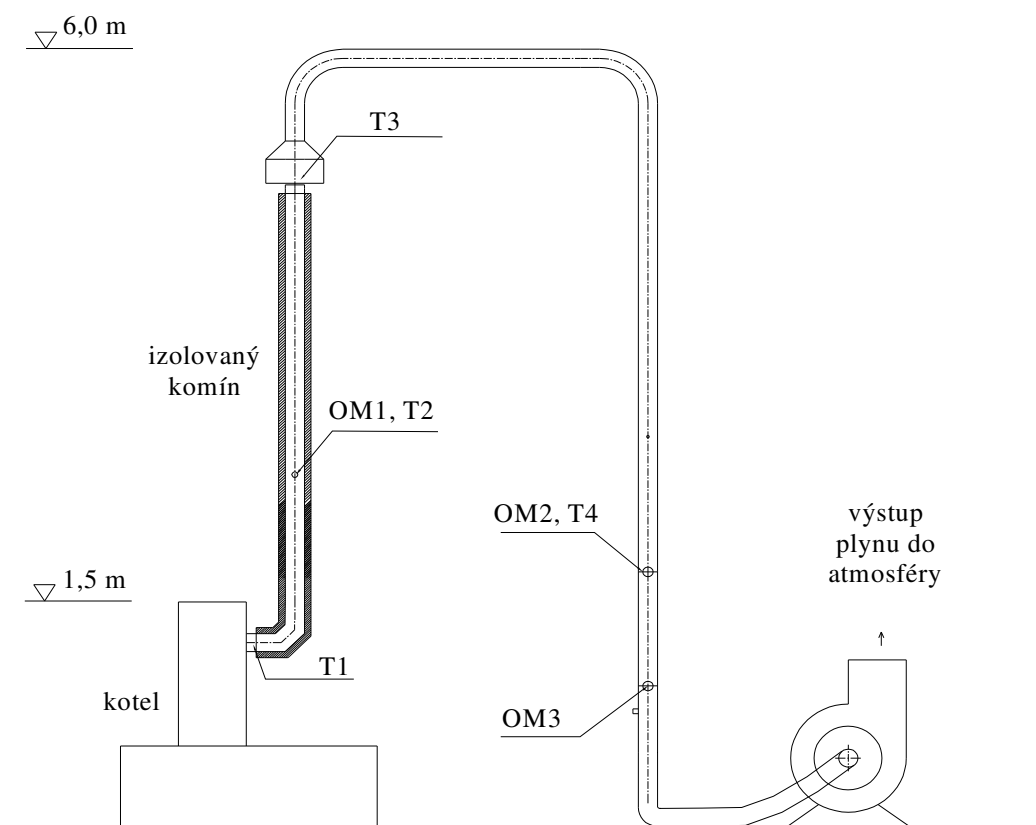
V tab. č. 8 jsou porovnány rozborů vzorků paliv HU1 a HU2 s nalezenými katalogovými hodnotami producenta paliva. Parametry nalezené v katalogu uhlí byly srovnány s výslednými rozborů použitých vzorků. Katalogové hodnoty pro černé uhlí z Polska (CU) se nepodařilo zajistit.

Pro porovnání byla zvolena 10 % tolerance rozdílu stanovených hodnot oproti katalogovým hodnotám. Odchylené hodnoty vzorku jsou v tab. č. 8 označeny tyrkysově. Analyzovaný vzorek paliva HU1 se v základním technologickém a prvkovém rozboru neshoduje v mezích zvolené tolerance u obsahu síry a popeloviny, které jsou oproti katalogovým hodnotám nižší. Což je z kvalitativního hlediska pozitivní.

3.4 Experimentální měřící trať

3.4.1 Ředící tunel

Možností, jak částečně vyřešit komplikace uvedené v kap. 2.7.1.1, je použití ředícího tunelu (viz obr. č. 7). Nad komín je umístěna digestoř, kterou jsou všechny spaliny odsáty do potrubí a také zchlazeny a naředěny okolním vzduchem. Ředící tunel byl na zkušebně Výzkumného energetického centra postaven s přihlédnutím na zásady dle EPA 5G [7] a AS/NZS 4013:1999 [8], CEN/TC 295/WG5 27.9.2006 [9]. Jeho použití bylo validováno pro stanovení tuhých znečišťujících látek a látek na ně vázaných [41].

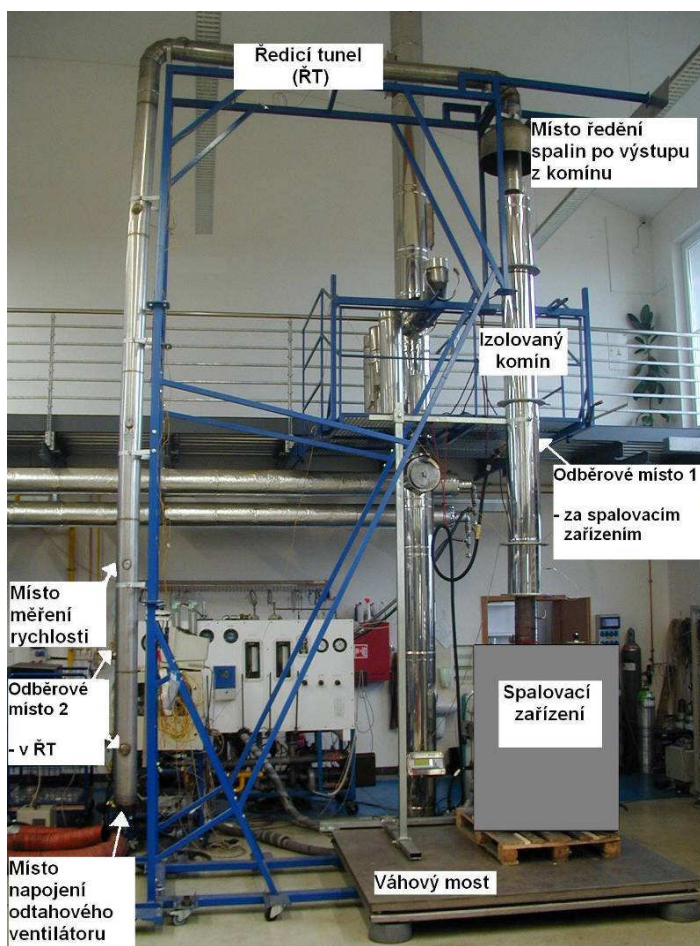


obr. č. 7 Schéma ředícího tunelu

V ředícím tunelu, v odběrovém místě OM2 a OM3, jsou podmínky pro izokinetické vzorkování podstatně příznivější než v měřícím úseku za kotlem, v odběrovém místě OM1. Nevýhodou místa OM2 a OM3 může být částečné usazování částic v ředícím tunelu

a zvýšení vlivu paměťového efektu. Výhody odběru v ředícím tunelu však převažují nad nevýhodami a lze je definovat takto:

- Rychlost spalin je možné ovlivnit nastavením ředícího poměru. Ředěním se rychlost spalin v ředícím tunelu zvýší a pohybuje se v lépe měřitelných hodnotách (cca 4 až 6 m/s), což je příznivější pro zvládnutí reprezentativního (izokinetického) vzorkování spalin.
- Koncentrace znečišťujících látek po naředění je menší, takže problémy se zahlcením filtrů a pevných sorbentů jsou menší než při odběru přímo v komínu.
- Měření je uskutečňováno až za koncem komínu, takže naměřené emise znečišťujících látek jsou bližší emisím znečišťujících látek vypouštěných na reálném konci komínu a zahrnují i případný vliv komínu.
- Koncentrace vodní páry v ředícím tunelu je řádově nižší než za spalovacím zařízením, což usnadňuje řešení problematiky rosného bodu a kondenzace vody v měřicím úseku a také ve vzorkovacích aparaturách.
- Lepší homogenita spalin, neboť před vzorkovacími místy jsou dlouhé rovné úseky potrubí.



obr. č. 8 Ředící tunel

3.5 Metodiky odběru a stanovení znečišťujících látek

Odběr vzorků a analýza základních plynných znečišťujících složek spalin (CO, NO_x, SO₂ a NMVOC) je prováděn v izolovaném komíně cca 1 metr za spalovacím zařízením dle ČSN ISO 10396 (norma pro odběr vzorku) [10].

Složky CO, NO_x a SO₂ jsou stanovovány na principu absorpce infračerveného záření dle ČSN EN 15058 (CO) [13], ČSN ISO 10849 (NO_x) [14], ČSN ISO 7935 (SO₂) [15], NMVOC je stanovován principem využívajícím vlastnosti plameno-ionizačního detektoru dle ČSN EN 12619 [16].

Pro reprezentativní odběry vzorku PCDD/F, PCB, PAU, TZL a TK je důležité dodržení izokinetických podmínek odběru. Proto byly tyto látky vzorkovány v ředícím tunelu, kde jsou podmínky pro izokinetické vzorkování příznivější. Poměr ředění spalin vzduchem byl stanovován podle koncentrací O₂ a CO₂ za kotlem a v ředícím tunelu.

Odběry vzorků pro stanovení TZL jsou prováděny dle ČSN ISO 9096 [11]. TZL jsou stanovovány gravimetricky vážením odebraného vzorku dle stejné normy.

Odběry vzorků pro stanovení PCDD/F, PCB a PAU byly prováděny dle standardizovaného postupu ČSN EN 1948-1[12] za použití filtračně-kondenzační metody. Vzorky POP (PCDD/F, PCB, PAU a HCB) byly analyzovány dle ČSN EN 1948-2, 3 a 4 [17][18][19].

3.5.1 Metodika stanovení koncentrací plynných složek emisí

Pro měření byly užívány dvě samostatné odběrové trasy:

Trasa A

odběrové místo za kotlem, označeno jako OM1 na obr. č. 7, měřené složky SO₂, CO, O₂, NO_x, CO₂ a NMVOC.

Trasa B

odběrové místo v ředícím tunelu, označeno jako OM2 na obr. č. 7, měřené složky O₂ a CO₂.

3.5.1.1 Odběr vzorku spalin pro stanovení plynných znečišťujících látek

Odběr vzorků spalin byl uskutečňován pomocí sondy s vyhřívaným keramickým filtrem pro odloučení tuhých částic, za kterým bylo připojeno vytápěné vedení vzorku (vytápěná hadice), které slouží k zabránění kondenzace. Dále byl vzorek veden do analyzátoru, kde bylo nejprve provedeno odloučení vlhkosti v chladnici plynů a dále byla provedena samotná analýza složení plynu. Výjimkou je příprava vzorku pro stanovení NMVOC, kde se vzorek nechladí z důvodů možných kondenzací jejich složek. NMVOC je proto stanovován ve vlhkém vzorku.

Analyzátory byly před měřením justovány pomocí příslušných kalibračních směsí, čímž byla ověřena jejich správná funkce.

3.5.1.2 Stanovení koncentrace SO₂, CO, O₂, NO_x, CO₂, NMVOC ve spalinách

Koncentrace SO₂, CO, O₂, NO_x a CO₂ byly měřeny kontinuálním analyzátozem Advance Optima. Složky SO₂, CO, NO_x a CO₂ byly stanoveny na principu absorpce infračerveného záření. Složka O₂ byla stanovena na základě paramagnetického principu. Koncentrace

emisí NMVOC byly měřeny kontinuálním analyzátozem Mutli-FID 100, pracujícím na plameno-ionizačním principu. Tento přístroj byl kalibrován na propan.

3.5.1.3 Vyhodnocení

Všechny plynné znečišťující látky jsou měřeny kontinuálně po celou dobu experimentu. Hodnoty jsou vzorkovány v sekundových intervalech a do databází měřených hodnot jsou ukládány minutové průměry. Všechny plynné látky jsou měřeny jako objemové koncentrace sledované látky v suchém plynu v ppm nebo %. Výjimkou jsou NMVOC, které jsou stanovovány také jako objemové koncentrace, ale ve vlhkém vzorku. Proto je nutné koncentraci NMVOC přepočítat na suchý vzorek. Okamžitá vlhkost spalin za kotlem však není k dispozici, proto jsou koncentrace NMVOC přepočítávány průměrnou vlhkostí spalin vypočtenou ze složení paliva a průměrné koncentrace O₂ za dobu experimentu.

Objemové koncentrace stanovené v suchých spalinách jsou přepočítány na hmotnostní koncentrace vztažené na 1 m³ suchých spalin při normálních podmínkách (0°C a 101 325 Pa).

$$c(x)_m = c(x)_v \cdot \rho_x \quad [\text{mg} / \text{m}_N^3] \quad (3)$$

kde

x složky CO, SO₂, NO_x vyjádřené jako NO₂, NMVOC vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC)

$c(x)_m$ hmotnostní koncentrace složky x [mg/m³_N],

$c(x)_v$ objemová koncentrace složky x měřená [ppm],

ρ_x hustota složky x při normálních stanových podmínkách [kg/m³_N].

Hmotnostní koncentrace jsou stanoveny pro každou hodnotu minutového průměru přepočteny na nulový obsah kyslíku ve spalinách.

$$c(x)_{stech} = c(x)_m \cdot \frac{21}{21 - O_{2K}} \quad [\text{mg} / \text{m}_N^3] \quad (4)$$

kde

$c(x)_{stech}$ je hmotnostní koncentrace složky x přepočítaná na nulový kyslík [mg/m³_N],

O_{2K} je průměrná koncentrace kyslíku v suchých spalinách stanovená v dané minutě v místě měření složky x (za kotlem) v [%]

Následně je stanovena průměrná hodnota hmotnostní koncentrace složky x vztažená na 1 m³ suchých spalin při nulovém obsahu kyslíku ve spalinách za celou dobu experimentu. S koncentrací stanovenou při 0 % O₂ je dále počítáno.

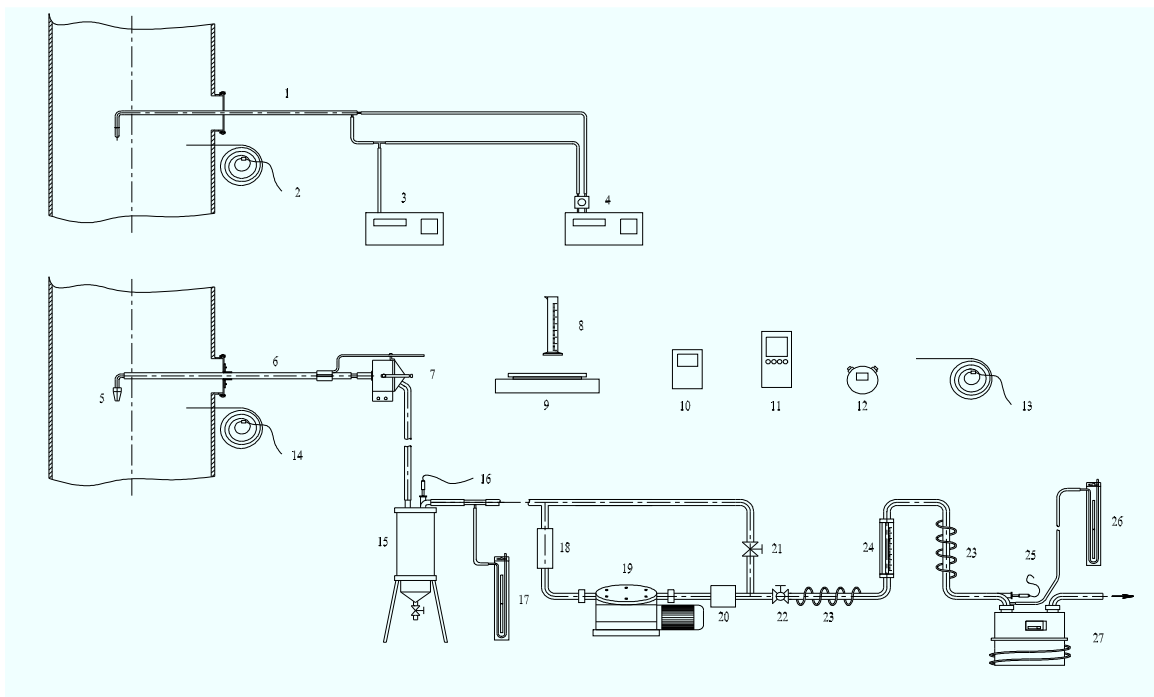
3.5.2 Metodika stanovení tuhých znečišťujících látek (TZL)

Vzorek pro stanovení koncentrace TZL ve spalinách byl odebírán v odběrovém místě označeném OM3 viz. obr. č. 7.

3.5.2.1 Princip metody

Měření bylo provedeno gravimetrickou aparaturou podle ČSN ISO 9096. Princip měřicí metody je založen na „izokinetickém“ odsátí vzorku plynu z kouřovodu.

Podle naměřené rychlosti plynu se provede přepočítání pro nastavení odsávací rychlosti v ústí odběrové sondy. Naměřená rychlost plynu zároveň slouží pro výpočet celkového množství spalin protékajícího v měřicím profilu.



- | | |
|---|--|
| 1. Prandtlůva trubice | 16. termočlánek pro měření teploty na výstupu plynu z kondenzátoru |
| 2. Termočlánek pro měření teploty v potrubí | 17. manometr pro měření statického tlaku na výstupu plynu z kondenzátoru |
| 3. manometr pro měření statického tlaku v potrubí | 18. filtr pro ochranu čerpadla před vniknutím nečistot |
| 4. manometr pro měření diferenčního tlaku na Prandtlově trubici | 19. membránové čerpadlo |
| 5. hubice odběrové sondy | 20. tlumič |
| 6. odběrová sonda | 21. regulační ventil pro nastavení průtoku plynu aparaturou |
| 7. zachycovač tuhých znečišťujících látek s filtrem | 22. regulační ventil pro nastavení průtoku plynu aparaturou |
| 8. předem zvažovaná nádoba pro jímání kondenzátu | 23. vodní ohříváč plynu nad teplotu rosného bodu |
| 9. laboratorní předvážky pro stanovení hmotnosti zkondenzované vody | 24. rotametr |
| 10. barometr | 25. termočlánek pro měření teploty plynu na vstupu do membránových plynových hodin |
| 11. teplotní ústředna | 26. manometr pro měření statického tlaku na vstupu do membránových plynových hodin |
| 12. stopky | 27. vyhřívané membránové plynové hodiny |
| 13. termočlánek pro měření teploty okolí | |
| 14. termočlánek pro měření teploty spalin v potrubí | |
| 15. kondenzátor | |

obr. č. 9 Schéma zapojení aparatury pro stanovení TZL

3.5.2.2 Popis aparatury a manipulace se vzorky

Pro stanovení koncentrace TZL v místě měření se provádí odběr elektricky vyhřívanou sondou, která je napojena pružnou přechodkou na elektricky vyhřívaný zachycovač, kde se

na filtru ze skleněných mikrovláken zn. EDEROL zachytí TZL z odsávaného vzorku plynu. Po zachycení TZL je odsátý plyn veden do kondenzátoru, kde je zachycena většina vodní páry obsažené ve spalinách ve formě kondenzátu, který se po ukončení odběru vzorku váží laboratorními předvážkami. Z kondenzátoru vystupuje ochlazený plyn s obsahem vodní páry na mezi sytosti při známé teplotě, tzv. syté spaliny. Spaliny jsou vedeny přes membránové čerpadlo do vyhřívaných membránových plynových hodin.

Požadovaný průtok je regulován nastavením regulačního ventilu. Po ukončení odběru se provede zvažení zachycených TZL. Schéma sestavy přístrojů pro izokinetický odběr TZL je na obr. č. 9.

3.5.2.3 Popis analýzy

Koncentrace TZL se stanoví jako podíl množství zachycených TZL k objemu odsátých suchých spalin při normálních stavových podmínkách.

3.5.2.4 Vyhodnocení

Hmotnost TZL v odebraném vzorku spalin zachycených na filtru je přepočítána na koncentraci vztaženou k objemu spalin při normálních stavových podmínkách v ředícím tunelu.

$$c(TZL)_m = \frac{m(TZL)}{V_{TZL}} \quad [mg / m_N^3] \quad (5)$$

kde

$c(TZL)_m$ je hmotnostní koncentrace TZL na 1 m³ suchých spalin při normálních stavových podmínkách v ředícím tunelu [mg/m³_N].

Tato hmotnostní koncentrace je následně přepočítána na koncentraci při 0% O₂ ve spalinách

$$c(TZL)_{stech} = c(TZL) \cdot \frac{21}{21 - O_{2RT}} \quad [mg / m_N^3] \quad (6)$$

kde

$c(TZL)_{stech}$ je hmotnostní koncentrace v suchém plynu při normálních stavových podmínkách a při nulové koncentraci kyslíku ve spalinách [mg/m³_N],

O_{2RT} je průměrná objemová koncentrace kyslíku v suchém plynu v ředícím tunelu během odběru TZL [%].

S hmotnostní koncentrací TZL stanovenou při 0 % O₂ je dále počítáno.

3.5.3 Odběr pro stanovení POP

Odběr probíhal v místě označeném na obr. č. 7 jako OM2.

3.5.3.1 Princip metody

Odběr vzorku pro stanovení PCDD/F, PCB a PAU je prováděn na základě postupů uvedených v ČSN EN 14682. Je použit vzorkovací systém: filtračně-kondenzační.

3.5.3.2 Popis aparatury a manipulace se vzorky

Plyn v potrubí je vzorkován izokineticky. Emise PCDD/F, PCB a PAU (které jsou z části obsaženy v plynné fázi a z části absorbovány na pevných částicích) jsou zachycovány ve vzorkovací trati. Schéma systému zapojení je označeno jako obr. č. 10. Vzorek plynu je prosáván hubicí, sondou a filtrem (teplota filtru je udržována pod 125 °C, ale nad teplotou rosného bodu spalin). Dále plyn prochází kondenzátorem a kondenzační baňkou. Za ní jsou dvě promývačky naplněné 0,5 l směsí ethylenglykolmonoethylether/voda (1:2 v/v). Na konci odběrové trati (za sušicí věží) je čerpadlo s plynoměrem a regulační člen. Vzorkovací plyn se v kondenzátoru chladí na teplotu pod 20 °C. Vzorkovací trať je před vzorkováním spikována PCDF značenými standardy $^{13}\text{C}_{12}$ (první sorpční stupeň odběrové aparatury).

Filtr (typ GF8 od fy Schleicher&Schuell) a prachové částice na něm zachycené jsou po ukončení odběru přeneseny do skleněné vzorkovnice. Filtr s tuhými částicemi tvoří první část složeného vzorku. Vnitřní část vyhřívané titanové sondy je po ukončení postupně opláchnuta demineralizovanou vodou, acetonem a hexanem. Oplach sondy tvoří druhou část složeného vzorku a je transportován do laboratoře v uzavřené skleněné nádobě.

Po ukončení odběru je obsah promývačky spojen s kondenzátem (hmotnost kondenzátu se stanoví vážením), všechny nevyhřívané části aparatury přicházející do styku s emisemi včetně promývačky jsou opláchnuty acetonem a hexanem a oplachová kapalina je také přidána ke kondenzátu. Tyto kapalné podíly tvořící třetí část složeného vzorku jsou transportovány do laboratoře v uzavřené skleněné nádobě.

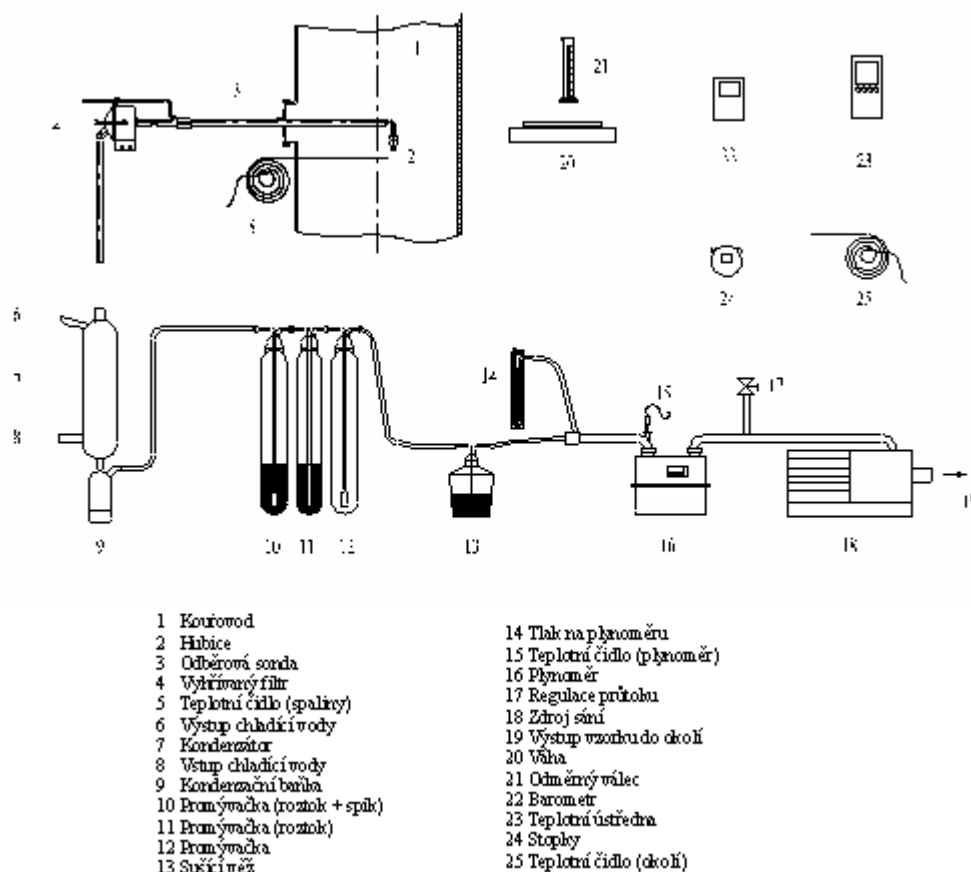
Kondenzát, absorpční roztoky a proplachovací roztoky jsou spojeny, a jsou k nim přidány izotopicky značené extrakční standardy, což je směs vybraných izotopově značených standardů $^{13}\text{C}_{12}$ 2,3,7,8-PCDD/F. Tyto standardy slouží pro vlastní kvantifikaci analytů a pro stanovení výtěžnosti vzorkovacích standardů, které byly před vzorkováním vloženy na první sorpční stupeň odběrové aparatury.

3.5.3.3 Popis analýzy

Analýza odebraných vzorků POP byla provedena v akreditovaných zkušebních laboratořích č. 1393 spadající pod Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě, Centrum hygienických laboratoří.

Analyty se ze vzorku extrahují, v případě pevných matric v Soxhletově extraktoru resp. ASE (Accelerated solvent extraction), v případě kapalných matric v systému kapalina-kapalina. Vzorky popílků se před extrakcí rozkládají pomocí kyseliny chlorovodíkové.

Pokud je požadováno, tak je ze surového extraktu odebrána alikvotní část, ve které jsou po jejím vyčištění a zkoncentrování stanoveny PAU metodou HPLC/FLD. Surový extrakt se dále čistí pomocí koncentrované kyseliny sírové a na kombinované silikagelové koloně. Takto přečištěný extrakt se frakcionuje na Florisilu tak, aby došlo k oddělení PCB a PCDD/F do samostatných frakcí. PCB frakce se analyzuje pomocí vysokorozlišovací plynové chromatografie v kombinaci s vysokorozlišovací hmotnostní spektrometrií (HRGC/HRMS). PCDD/F frakce se zkoncentruje, přidá se k ní nástřikový standard (směs vybraných izotopově značených PCDD/F, které slouží pro zjištění výtěžnosti extrakčních standardů) a dále se analyzuje pomocí HRGC/HRMS. Výsledkem měření jsou obsahy jednotlivých skupin tetra- až okta-CDD/F, jednotlivých 2,3,7,8-PCDD/F a I-TEQ.



obr. č. 10 Schéma aparatury pro odběr PCDD/F, PCB a PAU

3.5.3.4 Vyhodnocení

Hmotnosti jednotlivých POP_i ve vzorku jsou přepočítány na hmotnostní koncentrace vztahované k objemu spalin při normálních stavových podmínkách v ředicím tunelu.

$$c(POP_i) = \frac{m(POP_i)}{V_{POP}} \quad [ng / m_N^3] \quad (7)$$

kde

$m(POP_i)$ je hmotnost jednoho z kongenerů PCDD nebo PCDF nebo PCB nebo PAU nebo HCB nebo jejich přepočty na toxické ekvivalenty v odebraném vzorku [ng/vzorek],

V_{POP} je objem odebraného vzorku suchých spalin v ředicím tunelu při normálních stavových podmínkách při stanovení POP [m_N^3].

Tato koncentrace je následně přepočítána na koncentraci při 0% O_2 ve spalinách

$$c(POP_i)_{stech} = c(POP_i) \cdot \frac{21}{21 - O_{2RT}} \quad [ng / m_N^3] \quad (8)$$

kde

$c(POP_i)_{stech}$ je průměrná hmotnostní koncentrace v suchém plynu při normálních stavových podmínkách a při nulové koncentraci kyslíku ve spalínách za dobu odběru [ng/m^3_N],

O_{2RT} je průměrná hodnota objemové koncentrace kyslíku v suchém plynu v ředicím tunelu během odběru POP [%].

S koncentrací stanovenou při 0 % O_2 je dále počítáno.

3.5.4 Stanovení množství spalín dle měření rychlosti spalín v ředicím tunelu

V ředicím tunelu je instalována měřicí rychlostní sonda, pomocí které je po celou dobu měření kontrolována a měřena rychlost spalín v ředicím tunelu. Rychlost stanovená uprostřed potrubí je násobena konstantou profilu, která má hodnotu 0,831. Tímto součinem dostáváme střední rychlost spalín v měřicím profilu v m/s. Vynásobením střední rychlosti plynu v profilu obsahem plochy profilu je získán průtok spalín v ředicím tunelu při aktuálním stavu spalín a aktuálním kyslíku.

Rychlost spalín uprostřed potrubí:

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{ef}}} \quad [m/s] \quad (9)$$

kde

k je konstanta rychlostní sondy [-]

Δp je diferenční tlak naměřený na rychlostní sondě [Pa]

ρ_{ef} je hustota spalín v potrubí (ředicím tunelu) při aktuálních stavových podmínkách [kg/m^3]

Střední rychlost spalín v celém měřicím profilu:

$$v_{str} = v \cdot k_{prof} \quad [m/s] \quad (10)$$

kde

k_{prof} je konstanta měřicího profilu, která byla stanovena z dostatečně velkého množství měření rychlosti v celém měřicím profilu. Stanovená hodnota je 0,831 [-].

Průtok vlhkých spalín v ředicím tunelu za aktuálních stavových podmínek $Q_{v,ef}$:

$$Q_{v,ef} = S \cdot v_{str} \cdot 3600 \quad [m^3/h] \quad (11)$$

kde

S je plocha průřezu měřicího profilu. Profil je kruhový o průměru 150 mm. Plocha je dosazovaná v [m^2]

Průtok vlhkých spalín v ředicím tunelu při normálních stavových podmínkách spalín $Q_{v,N}$:

$$Q_{v,N} = Q_{v,ef} \cdot \frac{(T_N + t_{sp})}{T_N} \cdot \frac{p_N}{(p_{atm} + p_{stat})} \quad [m^3/h] \quad (12)$$

kde

T_N	je normální termodynamická teplota 273,15 [K]
t_{sp}	je měřená teplota spalin v měřicím profilu [°C]
p_N	je normální tlak 101 325 [Pa]
p_{atm}	je měřený atmosférický tlak [Pa]
p_{stat}	je měřený statický tlak v měřicím profilu podtlak se záporným znaménkem/ přetlak s kladným znaménkem [Pa]

Průtok suchých spalin v ředícím tunelu při normálních stavových podmínkách spalin $Q_{s,N}$:

$$Q_{s,N} = Q_{v,N} \cdot (1 - w) \quad [m_N^3 / h] \quad (13)$$

kde

w je vlhkost spalin (objemový podíl vody v plynném stavu ku objemu vlhkých spalin) [-]

Průtok suchých spalin při normálních stavových podmínkách spalin přepočtený na nulovou koncentraci kyslíku ve spalinách $Q_{s,N,stech}$:

$$Q_{s,N,stech} = Q_{s,N} \cdot \frac{21 - O_{2mer}}{21} \quad [m_N^3 / h] \quad (14)$$

kde

O_{2mer} je koncentrace kyslíku měřená v měřicím profilu [%]

3.5.5 Výpočet množství spalin dle množství a složení paliva

Součinitel zvětšení objemu vlhkostí vzduchu v :

$$v = 1 + \frac{\varphi \cdot p''}{p_{atm} - p''} \quad [-] \quad (15)$$

kde

φ relativní vlhkost okolního vzduchu [-]

p'' parciální tlak vodní páry při teplotě okolí [Pa]

p_{atm} je měřený atmosférický tlak [Pa]

Teoretická stechiometrická spotřeba kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{32} \cdot S + \frac{22,4}{4} \cdot H - \frac{22,4}{32} \cdot O \quad [m_N^3 / kg] \quad (16)$$

kde

C hmotnostní podíl uhlíku v palivu [-]

S hmotnostní podíl síry v palivu [-]

H hmotnostní podíl vodíku v palivu [-]

O hmotnostní podíl kyslíku v palivu [-]

Teoretická stechiometrická spotřeba suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva V_{vz} :

$$V_{vz} = \frac{V_{O_2}}{0,21} \quad [m_N^3 / kg] \quad (17)$$

Teoretické stechiometrické množství suchých spalin vzniklé při spálení 1 kg paliva

$$V_{s,sp} = \frac{22,4}{12} \cdot C + \frac{22,4}{32} \cdot S + \frac{22,4}{28} \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz} \quad [m_N^3 / kg] \quad (18)$$

3.5.6 Metoda stanovení výkonu teplovodního kotle

Výkon teplovodního kotle P_k :

$$P_k = m_v \cdot c_v \cdot \Delta t \quad [kW] \quad (19)$$

kde

m_v průtok vody kotlem [kg/s]

c_v měrná tepelná kapacita vody [kJ/(kg.K)]

Δt rozdíl teplot výstupní a vstupní kotlové vody [K]

Výkon krbových kamen je počítán pomocí nepřímé účinnosti (viz. níže).

3.5.7 Metoda stanovení přímé účinnosti spalovacího zařízení

Výpočet je prováděn dle norem ČSN EN 303-5, ČSN EN 13 229 ČSN EN 13 240 [42][43][44]. Přímá účinnost η je stanovena podle základního vztahu

$$\eta = \frac{P_k}{Q_B} \cdot 100 \quad [\%] \quad (20)$$

kde

P_k tepelný výkon spalovacího zařízení [kW]

Q_B tepelný příkon [kW]

Tepelný příkon stanovím

$$Q_B = \frac{B \cdot Q_i^r}{3,6} \quad [kW] \quad (21)$$

kde

B hmotový tok (spotřeba) paliva [kg/h]

Q_i^r výhřevnost paliva [MJ/kg]

$$B = \frac{m_{poc} - m_{kon}}{\tau} \quad [kg / h] \quad (22)$$

kde

m_{poc} hmotnost paliva na počátku zkoušky [kg]

m_{kon} hmotnost paliva na konci zkoušky [kg]

τ doba zkoušky [h]

Největší slabinou stanovení přímé účinnosti je stanovení hmotového toku paliva. Je možno relativně přesně stanovit dávku přikládaného paliva, ale nastává problém s určením doby, za kterou palivo vyhoří. V praxi je váženo jak množství přiloženého paliva, tak celé spalovací zařízení i s palivem a je kontinuálně pozorován úbytek paliva. Problémem zůstává určení, v jaký čas zkoušku ukončit. Neboť hmotnost kotle se nikdy nevrátí na původní hmotnost tj. před přiložením paliva. V zařízení totiž zůstává popel a nedohořelé zbytky paliva.

Jednodušší je situace u automatických kotlů. V automatickém kotli vždy hoří jen poměrně malá část paliva. Díky tomu spalování probíhá rovnoměrně.

3.5.8 Metoda stanovení nepřímé účinnosti spalovacího zařízení

Metoda stanovení nepřímé účinnosti identifikuje ztráty spalovacího zařízení a snaží se vyčíslit jejich velikost. Výpočet je prováděn dle norem ČSN EN 303-5, ČSN EN 13 229 a ČSN EN 13 240 [42][43][44]. Základní vztah pro výpočet účinnosti nepřímou metodou je

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r + q_s) \quad [\%] \quad (23)$$

kde

q_a je poměrná ztráta citelným teplem spalín ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]

q_b je poměrná ztráta plynným nedopalem ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]

q_r je poměrná ztráta mechanickým nedopalem ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]

q_s je poměrná ztráta sdílením tepla do okolí ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva [%]

Mimo výše uvedené ztráty připadá v úvahu ještě ztráta citelným teplem tuhých zbytků po spalování, která však bývá obvykle velice nízká.

3.5.9 Možnosti vyjádření množství emisí znečišťujících látek

V předešlých kapitolách byl naznačen způsob, jak emise znečišťujících látek vyjádřit jako hmotnostní koncentrace v 1 m^3 suchých spalín při normálních stavových podmínkách a při nulovém obsahu kyslíku - $c(\text{ZL})_{\text{stech}}$. Všechny tyto koncentrace můžeme shodně přepočítat a vyjádřit několika používanými způsoby.

3.5.9.1 Hmotnostní koncentrace v suchých spalínách při 10% kyslíku

Pro přepočet $c(\text{ZL})_{\text{stech}}$ na koncentraci při 10 % O_2 je použit vztah

$$c(\text{ZL})_{10\% \text{O}_2} = c(\text{ZL})_{\text{stech}} \cdot \frac{(21-10)}{21} \quad [\text{g} / \text{m}_N^3] \quad (24)$$

kde

ZL je jakákoli sledovaná znečišťující látka x, TZL, POPi, TKi

- $c(ZL)_{stech}$ je hmotnostní koncentrace ZL v suchých spalinách při normálních stavových podmínkách a nulovém obsahu kyslíku [g/m^3_N] (případně jiných násobných jednotkách hmotnosti ng, μg , mg nebo kg)
- $c(ZL)_{10\%O_2}$ je hmotnostní koncentrace ZL v suchých spalinách při normálních stavových podmínkách při 10 % objemového obsahu kyslíku ve spalinách [g/m^3_N]

3.5.9.2 Hmotový tok znečišťující látky za čas

Pro přepočítání $c(ZL)_{stech}$ na hmotový tok ZL je možno použít dva způsoby výpočtu. Je možné vycházet z množství spalin stanovené měřením dle kapitoly 3.5.4

$$m(ZL) = c(ZL)_{stech} \cdot Q_{s,N,stech} \quad [g/h] \quad (25)$$

kde

$Q_{s,N,stech}$ je průtok suchých spalin při normálních stavových podmínkách spalin přepočtený na nulovou koncentraci kyslíku ve spalinách stanovený měřením [m^3_N/h]

nebo z množství spalin vypočteného z parametrů a množství spáleného paliva dle kapitoly 3.5.5.

$$m(ZL) = c(ZL)_{stech} \cdot V_{s,sp} \cdot B \quad [g/h] \quad (26)$$

kde

B hmotový tok (spotřeba) paliva [kg/h]
 $V_{s,sp}$ je teoretické stechiometrické množství suchých spalin vzniklé při spálení 1 kg paliva [m^3_N/kg]

Dle výsledků provedené datové analýzy bylo zjištěno, že výpočet množství spalin dle složení a spotřeby paliva dává věrohodnější hodnoty a pro další odvozované výpočty bude vždy počítáno s vypočteným množstvím spalin.

3.5.9.3 EF vztažený na hmotnost spáleného paliva

$$EF_{(1)} = \frac{m(ZL)}{B} \quad [g/kg] \quad (27)$$

kde

B je hmotový tok (spotřeba) paliva [kg/h]

3.5.9.4 EF vztažený na energii obsaženou ve spáleném palivu

$$EF_{(1)} = \frac{m(ZL)}{Q_i^r \cdot B} \cdot 1000 \quad [g/GJ] \quad (28)$$

kde

Q_i^r je výhřevnost paliva použitého při zkoušce [MJ/kg]

4 Experimenty

4.1 Proměnné pro výběr experimentů

Základními proměnnými pro experimenty jsou: palivo, spalovací zařízení, výkonový režim.

4.1.1 Paliva

Pro experimenty byla vybrána paliva, jejichž parametry uvádí tab. č. 7. Jedná se o paliva, které jsou pro účely této dizertační práce označené jako: HU1, HU2, CU, BUK, BIO, ZP.

4.1.2 Spalovací zařízení

Experimenty byly provedeny na těchto typech konstrukcí spalovacích zařízení :

- Prohořivací kotel
- Odhořivací kotel
- Zplyňovací kotel
- Automatický kotel
- Krbová kamna
- Plynový kotel

Podrobnější informace o použitých spalovacích zařízeních je možno nalézt v kapitole 3.2.

4.1.3 Provozní režimy

Při zkouškách byly zvoleny tyto provozní režimy:

- 100 % jmenovitého výkonu
- 60 % jmenovitého výkonu
- 30 % jmenovitého výkonu

Nejčastěji byly experimenty prováděny při jmenovitém výkonu zařízení, a bylo postupováno dle doporučení výrobců. Některé zkoušky byly prováděny na nižších výkonech, přičemž byla dle možností upravena dávka paliva a množství spalovacího vzduchu.

4.1.4 Výběr variant měření

Dle popisu v kapitolách 4.1.1, 4.1.2 a 4.1.3 máme k dispozici:

- 5 druhů paliv
- 6 druhů konstrukcí spalovacích zařízení
- 3 výkonová nastavení

Tyto stupně volnosti nám teoreticky umožňují připravit $5 \times 6 \times 3 = 90$ různých kombinací měření. Část těchto kombinací je nerealizovatelná a část pozbývá smyslu. Proto je nutné z nich vybrat ty potřebné. A experimenty provést jen u těch, které poskytnou největší množství potřebných informací.

4.1.5 Seznam vybraných experimentů

Veškeré experimentální testy byly rozvrhnuty do tří měřicích kampaní. Rozdělení experimentů do kampaní bylo nutné z hlediska naplánování dostupnosti měřícího zařízení

a časové náročnosti experimentů. Každá kombinace byla opakována 3 krát z důvodů zabezpečení dostatečné věrohodnosti naměřených dat a možnosti případného vyloučení odlehlých výsledků.

V první experimentální části probíhající od července do září roku 2008 byly pro měření vybrány tyto kombinace:

- Série 1 - HU1, Ling 25, 100 % jm. výkonu
- Série 2 - BUK, U 26, 100% jm. výkonu
- Série 3 - HU1, U 26, 100% jm. výkonu
- Série 4 - BUK, DOR 32, 100% jm. výkonu
- Série 5 - HU1, DOR 32, 100% jm. výkonu
- Série 6 - BUK, C20S, 100% jm. výkonu
- Série 7 - HU1, C20S, 100% jm. výkonu
- Série 8 - BUK, ETNA, 100% jm. výkonu
- Série 9 - ZP, Plynový kotel, 100 % jm. výkonu

V druhé experimentální části probíhající v březnu 2009 byly pro měření vybrány tyto kombinace:

- Série 10 - HU2, Ling 25, 100 % jm. výkonu
- Série 11 - CU, Ling 25, 100 % jm. výkonu
- Série 12 - BIO, Ling 25, 100 % jm. výkonu

Ve třetí experimentální části probíhající v červenci a srpnu 2009 byly pro měření vybrány tyto kombinace:

- Série 13 - CU, U26, 100 % jm. výkonu
- Série 14 - CU, DOR 32, 100 % jm. výkonu
- Série 15 - HU1, Ling 25, 60 % jm. výkonu
- Série 16 - HU1, Ling 25, 30 % jm. výkonu

Všechny experimenty byly provedeny na Výzkumném energetickém centru (VEC), které disponuje špičkově vybavenou zkušebnou pro testování spalovacích zařízení malých výkonů a je akreditovanou zkušební laboratoří č. 1166.3 se zaměřením na měření emisí, zkoušení tepelně-energetických zařízení, měření dalších tepelně-technických veličin, teplot, tlaků, průtoku, vlhkosti, zkoušky bezpečného provozu, vzorkování a analýzy vzorků. Výčet akreditovaných metod dává tomuto pracovišti vynikající předpoklady pro kvalitní zvládnutí uvažovaných experimentů.

Celkem bylo v rámci této dizertační práce provedeno 46 zkoušek při použití 5ti druhů paliva, 6ti konstrukcí spalovacích zařízení a při provozu na 3 různých výkonových hladinách. Měřené kombinace jsou přehledně uvedeny v tab. č. 9.

konstrukce kotle	% jm. výkonu	palivo					
		ořech 1	ořech 2	ořech 1	polena	peletky	plyn
		HU1	HU2	CU	buk	BIO	zemní plyn
automatický kotel	100	1	11	10	x	12	x
	60	15	x	x	x	x	x
	30	16	x	x	x	x	x
prohořivací kotel	100	3	x	13	2	x	x
odhořivací kotel	100	5	x	14	4	x	x
zplyňovací kotel	100	7	x	x	6	x	x
krbová kamna	100	x	x	x	8	x	x
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	9

Legenda:

číslo (1 až 16) označení série, ve které byla tato kombinace měřena

x měření není možno provést (palivo nelze spalovat v tomto zařízení)

tab. č. 9 Přehled provedených zkoušek – Matice kombinací paliva, zařízení a výkonu

4.2 Popis průběhu experimentů

V této kapitole jsou stručně popsány průběhy všech 16ti sérií experimentů a také okomentovány nestandardní a neplánované stavy, které nastaly během provádění experimentů.

4.2.1 série 1 (zkoušky 1-1, 1-2 a 1-3)

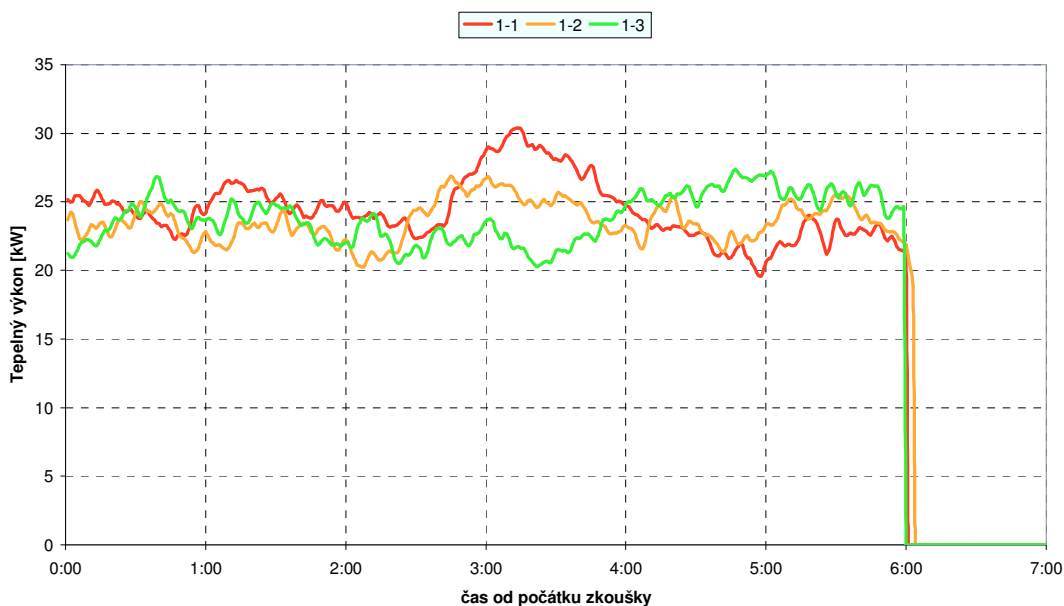
Série 1 byla provedena ve dnech 16, 17 a 18 července 2008 na automatickém kotli (Ling 25) při spalování hnědého uhlí (HU1). Kotel byl dle možností stabilizován a bylo přistoupeno k měření. Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle. Podávач paliva automatického kotle byl během všech tří zkoušek nastaven stejně. Podávач podával palivo do kotle po dobu 12 sekund a 20 sekund byl vypnutý. Výkon ventilátoru přivádějícího spalovací vzduch byl nastaven na 90 % výkonu.

Pro tuto sérii zkoušek bylo použito palivo o zrnitosti větší než doporučuje výrobce, a to z důvodu možnosti srovnání výsledků ze spalování stejného paliva s výsledky na dalších spalovacích zařízeních. Jiná zrnitost paliva nepůsobila žádné problémy s dopravou paliva do kotle ani při spalování. Z naměřených výkonových průběhů je patrné, že kotel byl během zkoušek relativně dobře ustálený. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 10. Provoz kotle byl během všech tří zkoušek ustálený, tuto skutečnost dokládá graf č. 1. Z vzájemného porovnání výkonových průběhů (viz. graf č. 1) jednotlivých zkoušek je možno konstatovat, že zkoušky probíhaly za podobných podmínek, pouze při zkoušce 1-1 došlo oproti zkouškám 1-2 a 1-3 ke ztlačení výkonu. V průběhu čtvrté až páté hodiny měření klesl výkon kotle z cca 30 kW na cca 20 kW. Tento rozkmit však nezpůsobil ztlačení výkonu na kontinuálně měřených složkách emisí.

Zařízení		automatický kotel		
Označení paliva		HU1		
Označení experimentu		1-1	1-2	1-3
Délka experimentu	hh:mm	6:00	6:04	6:00
Spotřeba paliva	kg/h	5,9	5,7	6,0
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	78,0	78,8	74,6
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	27,0	25,8	27,6
Tepelný výkon	průměr	24,4	23,6	23,9
	medián	24,1	23,4	23,9
	min	19,6	20,2	20,3
	max	30,4	26,9	27,4
	výběrová sm. odch.	2,2	1,4	1,8
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	9,4	10,0	9,8
	medián	9,6	10,0	9,7
	min	4,3	5,0	4,4
	max	13,8	14,6	13,8
	výběrová sm. odch.	1,8	1,5	1,6
Teplota spalin za zařízením	průměr	257	255	258
	medián	256	255	257
	min	236	228	231
	max	285	274	282
	výběrová sm. odch.	9	8	10

tab. č. 10 Vybrané provozní parametry série 1 (automatický, HU1, 100 % jm. výkonu)

automatický kotel palivo HU1



graf č. 1 Průběhy naměřených výkonů série 1 (automatický, HU1, 100 % jm. výkonu)

4.2.2 série 2 (zkoušky 2-1, 2-2 a 2-3)

Série 2 byla provedena ve dnech 22, 23 a 24 července 2008 na prohořivacím kotli (Viadrus U26) při spalování bukových polen (BUK). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle.

Zkoušky započaly vždy, když byl kotel roztopen na jmenovitý výkon a v kotli byla vytvořena základní vrstva paliva. Dávky přikládání paliva byly vypočítány na základě znalosti výhřevnosti použitého paliva a údajů o kotli (účinnost, jmenovitý výkon, doba hoření na jednu dávku paliva) udávaných výrobcem kotle. Přikládání paliva byla cca 14,5 kg, což vystačilo na spalovací periodu o délce přibližně 2 hodiny. Kotel pracuje

v periodickém režimu. Palivo bylo do kotle přikládáno zhruba v intervalu 2 hodiny. Délka měření byla stanovena na 3 periody kotle, to odpovídá přibližně době 6 hodin.

Z naměřených průběhů výkonů je patrné, že kotel byl během zkoušek relativně dobře ustálený. Zkoušky trvaly cca 6 hodin. Průběh period při všech třech zkouškách byl srovnatelný. Během měření nedošlo k žádným problémům, které by měly vliv na chod kotle nebo na odběry vzorků spalin.

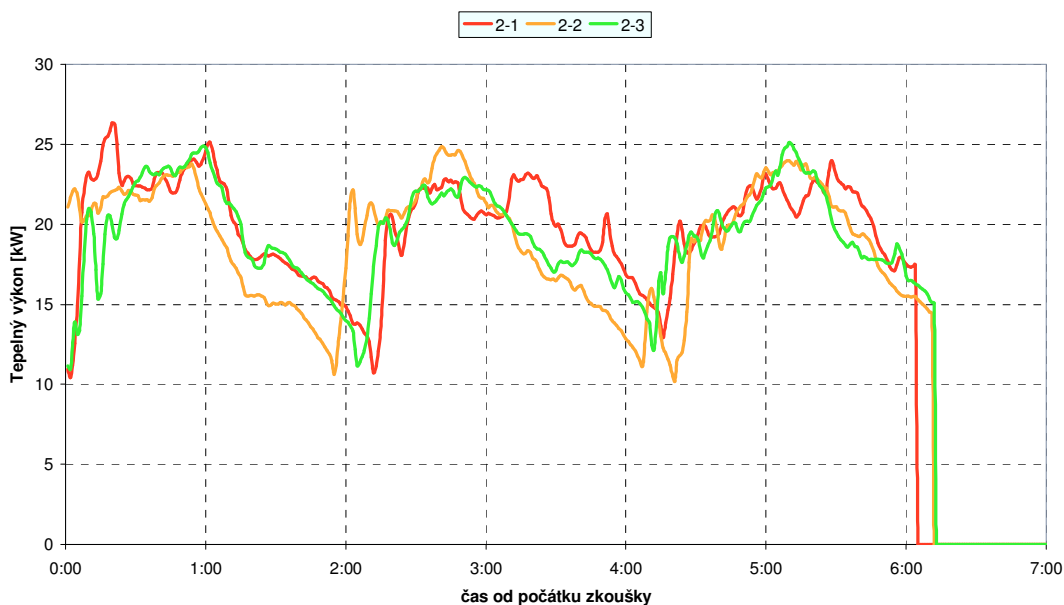
Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 11.

Vliv periodického přikládání paliva na průběh výkonu zobrazuje graf č. 2. Po každém přiložení paliva do kotle dochází ke zhoršení kvality spalovacího procesu, neboť nově přivedené palivo spotřebovává značné množství energie ke svému nahřátí, vysušení a zapálení. V kotli dochází k velkému nárůstu koncentrace CO a dalších složek emisí, spjatých s kvalitou spalovacího procesu.

Zařízení		prohořivací kotel		
Označení paliva		buk		
Označení experimentu		2-1	2-2	2-3
Délka experimentu	hh:mm	6:04	6:11	6:12
Spotřeba paliva	kg/h	6,8	7,0	7,0
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	66,9	62,3	63,4
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	24,6	25,1	25,1
Tepelný výkon	průměr	19,9	19,0	19,3
	medián	20,5	20,1	19,2
	min	10,4	10,2	11,0
	max	26,3	24,9	25,1
	výběrová sm. odch.	3,1	3,7	3,0
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	10,5	10,9	10,8
	medián	9,8	10,4	10,7
	min	6,0	5,5	5,8
	max	18,3	18,7	18,2
	výběrová sm. odch.	2,8	3,3	2,9
Teplota spalin za zařízením	průměr	226	216	231
	medián	243	222	237
	min	93	101	105
	max	332	293	315
	výběrová sm. odch.	50	48	47

tab. č. 11 Vybrané provozní parametry série 2 (prohořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)

prohořivací kotel palivo buk



graf č. 2 Průběhy naměřených výkonů série 2 (prohořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)

4.2.3 série 3 (zkoušky 3-1, 3-2 a 3-3)

Série 3 byla provedena ve dnech 4, 5 a 6 srpna 2008 na prohořivacím kotli (Viadrus U26) při spalování hnědého uhlí (HU1). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle.

Tento typ kotle není určen pro spalování hnědého uhlí, přesto byly tyto pokusy naplánovány a provedeny, neboť právě hnědé uhlí v kombinaci s prohořivací konstrukcí kotle je velmi často v českých domácnostech spalováno.

Z údajů uvedených v návodu ke kotli a ze znalosti výhřevnosti paliva byla vypočtena dávka paliva cca 25 kg. Toto množství paliva by mělo zajistit spalovací režim o délce 4 h. Před přiložením této dávky byl kotel provozován tak, aby došlo k roztopení kotle a vytvoření základní vrstvy žhavého paliva. Poté byla přiložena dávka paliva. Oproti očekávání však nedošlo ke spolehlivému rozhoření paliva. Kotel se dostal do „zplyňovacího režimu“ a ve spalovací komoře došlo k vývinu velkého množství plynu, ve kterém koncentrace CO přesáhla 10 % (rozsah použitého analyzátoru CO při měření), koncentrace TOC přesáhla 1 % (maximální rozsah použitého plameno-ionizačního detektoru) a koncentrace O₂ ve spalinách poklesla na 1,5 %. Plyn ve spalovací komoře několik minut po přiložení paliva je vidět na obr. č. 11. Kouř vycházející ze spalinového ventilátoru je na obr. č. 12. Výše uvedených extrémních hodnot koncentrací emisí bylo dosaženo cca po 25 minutách po přiložení dávky paliva. Po 8-mi minutách maximálních hodnot došlo k zapálení plynu, k poklesu koncentrací CO, TOC a k nárůstu koncentrace O₂.

Odběr POP musel být ukončen po 3 h, především z důvodu ucpávání měřicí trasy (filtru). Foto zabarvených sorpčních roztoků je uvedeno na obr. č. 14. Na obr. č. 13 je vidět zadehtování zachycovače na TZL po odběru TZL. Během zkoušek byly provedeny 3 odběry pro stanovení koncentrace TZL a jeden dlouhodobý odběr pro stanovení koncentrace POP.

Původně bylo naplánováno provést všechny tři zkoušky stejně. Avšak po provedení první zkoušky (3-1), musela být metodika provozování kotle upravena. Důvodem této úpravy bylo nadměrné obtěžování okolí zkušebny kouřem a zápachem.

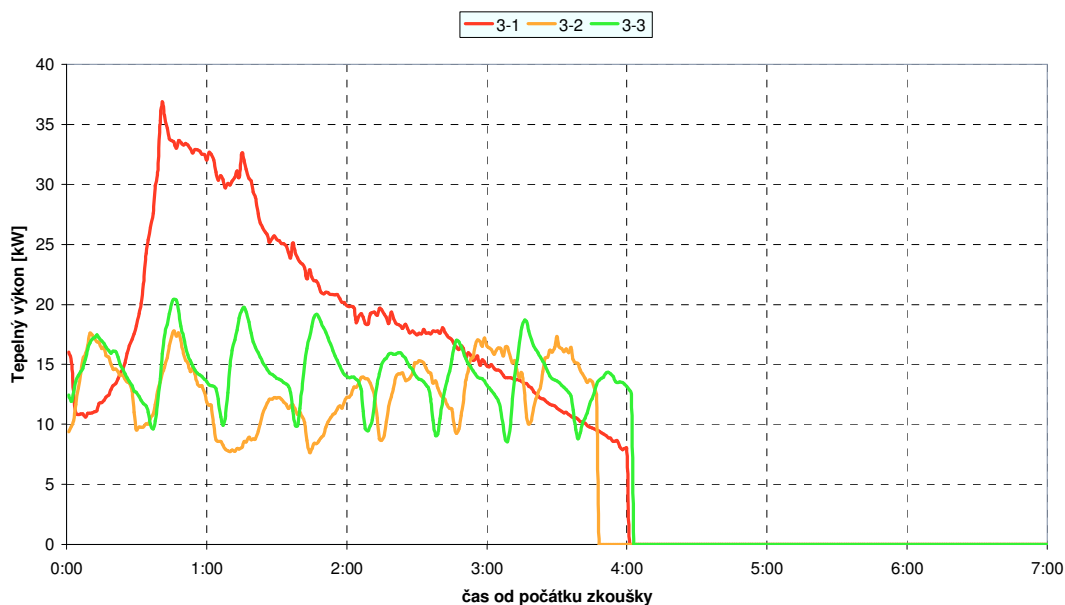
Změna spočívala ve zkrácení periody příkládání paliva do kotle na půl hodiny. Pro tuto periodu byla spočítána příkládaná dávka paliva na 2,5 kg.

Délka odběrů TZL (3 odběry) byla stanovena tak, aby vždy 1 odběr TZL proběhl během 2 přiložení paliva do kotle (cca 1 h). Délka odběru POP pokryla 8 dávek přiložení paliva do kotle (cca 4 h). Během zkoušek 3-2 a 3-3 již nedocházelo k problémům popisovaným při provádění zkoušky 3-1. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 12.

Zařízení		prohořivací kotel		
Označení paliva		HU1		
Označení experimentu		3-1	3-2	3-3
Délka experimentu	hh:mm	3:07	3:47	4:02
Spotřeba paliva	kg/h	8,1	4,5	5,2
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	45,2	54,3	52,4
Teoretické množství suchých spalín	m ³ _N /h	36,8	20,5	23,5
Tepelný výkon	průměr	19,3	12,9	14,3
	medián	17,8	13,1	14,1
	min	7,9	7,7	8,6
	max	36,9	17,8	20,4
	výběrová sm. odch.	7,6	2,7	2,5
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	12,6	16,6	16,0
	medián	14,1	16,8	16,4
	min	1,6	13,5	11,5
	max	19,6	19,8	20,0
	výběrová sm. odch.	4,4	1,5	1,8
Teplota spalín za zařízením	průměr	217	186	206
	medián	219	190	207
	min	78	92	108
	max	364	263	298
	výběrová sm. odch.	79	44	45

tab. č. 12 Vybrané provozní parametry série 3 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)

prohořivací kotel palivo HU1



graf č. 3 Průběhy naměřených výkonů série 3 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)



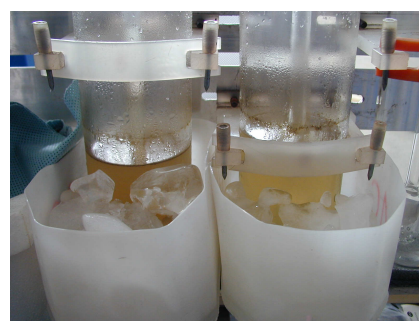
obr. č. 11 Pohled do spalovací komory při části zkoušky 3-1



obr. č. 12 Kouř vycházející z kotle při části zkoušky 3-1



obr. č. 13 Zadehtovaný držák filtru po odběru TZL po zkoušce 3-1



obr. č. 14 Zabarvení sorpčních roztoků na POP po zkoušce 3-1

4.2.4 série 4 (zkoušky 4-1, 4-2 a 4-3)

Série 4 byla provedena ve dnech 11, 12 a 13 srpna 2008 na odhořivacím kotli (Dakon DOR 32) při spalování bukových polen (BUK). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle.

Při předběžných spalovacích zkouškách na tomto kotli bylo zjištěno, že při naplnění zásobníku paliva dřevem, dochází ke klenbování a je nutno jej občas postrčit do spalovacího prostoru. Bylo proto rozhodnuto, že při ostrých zkouškách bude palivo přidáváno průběžně tak, aby k tomuto jevu nedocházelo.

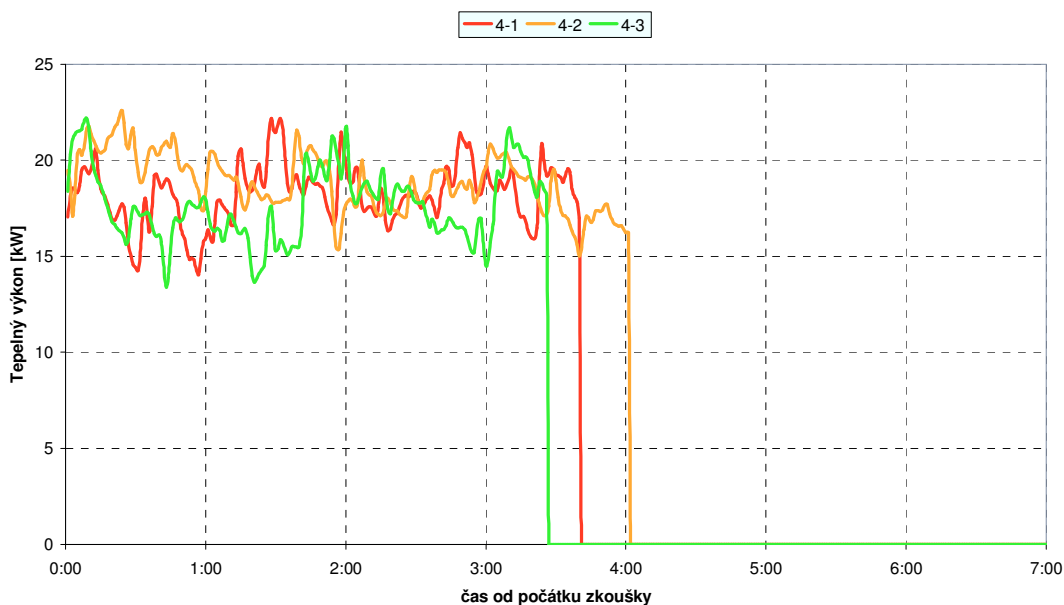
Přikládáno bylo cca 3 až 3,5 kg paliva, což odpovídá 20ti až 30ti minutovému intervalu přikládání.

Délka odběrů TZL (3 odběry) byla stanovena tak, aby vždy 1 odběr TZL proběhl během 3 příložení (cca 1 h). Délka odběru POP pokryla 8 příložení (cca 4 h). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 13. Z průběhů výkonu (viz.graf č. 4) v jednotlivých dnech je vidět, že provoz kotle byl ustálený a i přesto, že do kotle bylo palivo přikládáno v 30ti minutových periodách se efekt periodického přikládání paliva neprojevoval. Je to dáno zejména způsobem řešení spalovacího procesu (odhořivací způsob). Lze konstatovat, že podobně by se kotel choval i v případě, že by se palivo v zásobníkové šachtě nezasekávalo a bylo možno ji palivem zaplnit. Výrobce uvádí dřevo jako náhradní palivo. Zkouška s tímto palivem byla provedena z důvodu srovnání s ostatními spalovacími zařízeními.

Zařízení		odhořivací kotel		
Označení paliva		buk		
Označení experimentu		4-1	4-2	4-3
Délka experimentu	hh:mm	3:40	4:00	3:26
Spotřeba paliva	kg/h	6,3	6,7	5,6
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	66,5	64,6	72,2
Teoretické množství suchých spalín	m ³ _N /h	22,7	24,1	20,2
Tepelný výkon	průměr	18,2	19,0	17,7
	medián	18,4	19,0	17,5
	min	14,1	15,0	13,4
	max	22,2	22,6	22,2
	výběrová sm. odch.	1,6	1,4	1,9
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	12,3	12,0	13,2
	medián	12,1	12,0	13,4
	min	8,1	8,5	8,7
	max	16,9	16,4	17,4
	výběrová sm. odch.	1,8	1,5	1,9
Teplota spalín za zařízením	průměr	163	164	163
	medián	164	163	160
	min	130	132	127
	max	214	193	203
	výběrová sm. odch.	16	13	16

tab. č. 13 Vybrané provozní parametry série 4 (odhořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)

odhořivací kotel palivo buk



graf č. 4 Průběhy naměřených výkonů série 4 (odhořivací, BUK, 100 % jm. výkonu)

4.2.5 série 5 (zkoušky 5-1, 5-2 a 5-3)

Série 5 byla provedena ve dnech 1, 2 a 4 září 2008 na odhořivacím kotli (Dakon DOR 32) při spalování hnědého uhlí (HU1). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle.

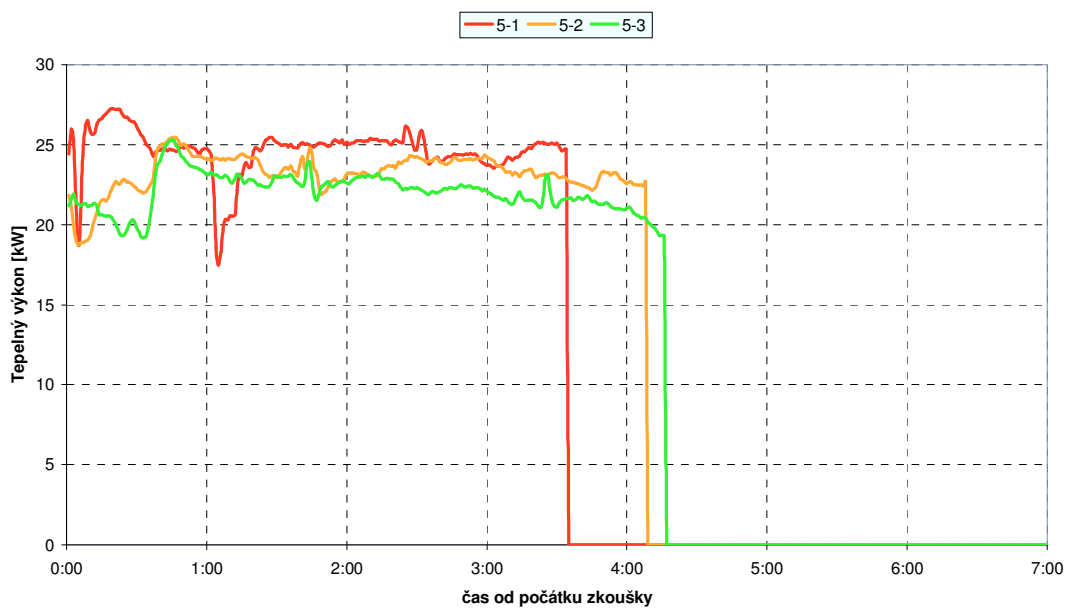
Z průběhů výkonu a teplot v jednotlivých dnech je vidět, že provoz kotle byl ustálený, a že se u něj neprojevoval efekt periodického přikládání paliva. Je to dáno zejména způsobem řešení spalovacího procesu (odhořivací způsob). Palivová šachta byla zaplněna při začátku zkoušky vždy nejméně do $\frac{3}{4}$. Při zkouškách bylo zjištěno, že při každém roštování docházelo k velkému zvýšení koncentrace CO ve spalinách a k tvorbě hustého dýmu, vycházejícího z komína.

Při zkoušce 5-1 bylo provedeno větší proroštování, čímž se do spalovací komory dostalo velké množství nezapáleného paliva. Tato skutečnost se projevila poklesem výkonu kotle a vysokými emisemi NMVOC a CO. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 14. Porovnání výkonů při jednotlivých zkouškách uvádí graf č. 5. Vliv zmíněného proroštování je v grafu patrný cca hodinu po začátku zkoušky 5-1. Pro ilustraci jsou zde uvedeny fotografie kotle viz. obr. č. 15 a pohledu do rozpálené poloprázdné násypky paliva obr. č. 16.

Zařízení		odhořivací kotel		
Označení paliva		HU1		
Označení experimentu		5-1	5-2	5-3
Délka experimentu	hh:mm	3:33	4:08	4:16
Spotřeba paliva	kg/h	6,1	5,8	5,5
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	75,9	75,9	75,7
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	28,0	26,4	25,1
Tepelný výkon	průměr	24,6	23,3	22,3
	medián	24,9	23,5	22,4
	min	17,5	18,7	19,2
	max	27,2	25,5	25,3
	výběrová sm. odch.	1,5	1,2	1,1
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	9,6	10,4	10,6
	medián	9,3	10,5	10,7
	min	8,1	8,6	8,2
	max	15,8	12,6	12,1
	výběrová sm. odch.	1,0	0,8	0,9
Teplota spalin za zařízením	průměr	199	180	190
	medián	198	181	191
	min	157	144	170
	max	222	197	217
	výběrová sm. odch.	11	9	11

tab. č. 14 Vybrané provozní parametry série 5 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)

odhořivací kotel palivo HU1



graf č. 5 Průběhy naměřených výkonů série 5 (odhořivací, HU1, 100 % jm. výkonu)



obr. č. 15 Kotel umístěný na váhovém mostu



obr. č. 16 Pohled na hořící palivo do zásobníku kotle

4.2.6 série 6 (zkoušky 6-1, 6-2 a 6-3)

Série 6 byla provedena ve dnech 9, 10 a 11 září 2008 na zplyňovacím kotli (Atmos kombi C20S) při spalování bukových polen (BUK). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle.

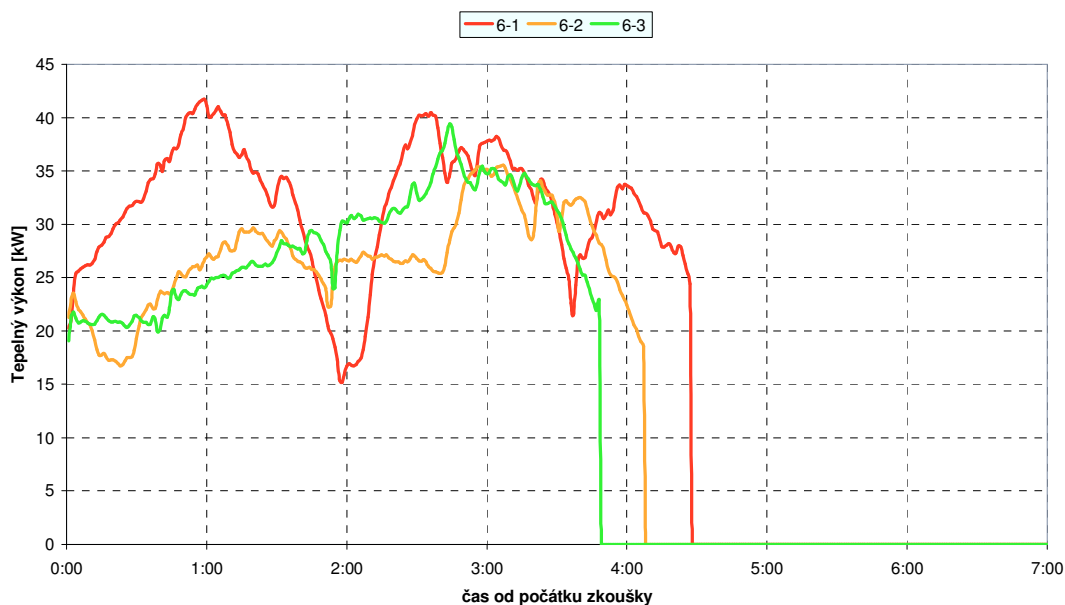
Před zkouškami byl kotel vždy provozován tak, aby došlo k roztopení kotle a vytvoření základní vrstvy paliva. Přiřadováno bylo vždy tak, aby bylo dosaženo maximální plnicí úrovně kotle, což by dle výrobce mělo stačit přibližně na 4 hodiny provozu kotle.

Při zkouškách na tomto kotli nebylo možno stabilizovat kotel na tepelném výkonu udávaném výrobcem. Bylo bezvýsledně vyzkoušeno různé nastavení poměru primárního a sekundárního vzduchu. Jmenovitý výkon kotle je dle výrobce 17 – 25 kW (dle typu paliva). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 15. Při zkouškách se průměrný dosažený tepelný výkon pohyboval okolo 27-31 kW (viz. graf č. 6). Nestabilita výkonu při zkoušce 6-1 vychází ze snahy docílit přibližně jmenovitého výkonu kotle. Tento výkonový rozkmit se samozřejmě odrazí také na kvalitě spalovacího procesu avšak v porovnání se zkouškami 6-2 a 6-3 není naměřené množství kontinuálně měřených emisí výrazně odlišné.

Zařízení		zplyňovací kotel		
Označení paliva		buk		
Označení experimentu		6-1	6-2	6-3
Délka experimentu	hh:mm	4:27	4:06	3:48
Spotřeba paliva	kg/h	10,6	9,2	9,7
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	69,1	67,3	66,1
Teoretické množství suchých spalín	m ³ _N /h	38,2	33,0	35,1
Tepelný výkon	průměr	31,9	26,8	28,0
	medián	32,8	26,7	27,8
	min	15,2	16,7	19,1
	max	41,7	35,6	39,4
	výběrová sm. odch.	6,1	4,6	5,1
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	8,9	12,3	10,7
	medián	8,5	12,3	11,3
	min	2,8	7,3	3,1
	max	19,1	17,6	15,5
	výběrová sm. odch.	3,6	2,2	2,7
Teplota spalín za zařízením	průměr	274	249	259
	medián	282	252	257
	min	125	172	181
	max	324	291	307
	výběrová sm. odch.	31	23	28

tab. č. 15 Vybrané provozní parametry série 6 (zplyňovací, BUK, 100 % jm. výkonu)

zplyňovací kotel palivo buk



graf č. 6 Průběhy naměřených výkonů série 6 (zplyňovací, BUK, 100 % jm. výkonu)

4.2.7 série 7 (zkoušky 7-1, 7-2 a 7-3)

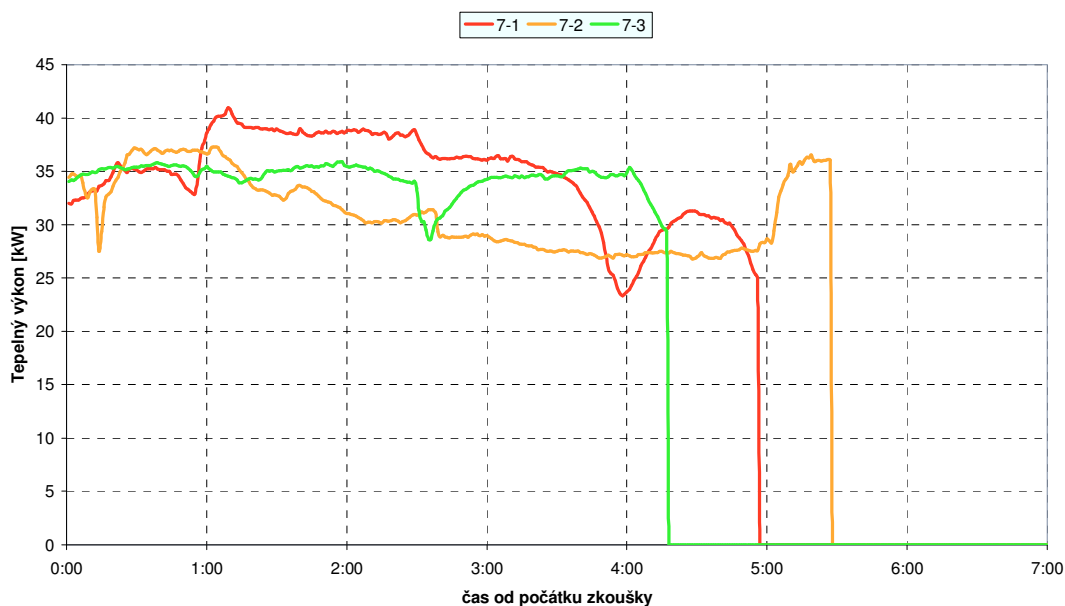
Série 7 byla provedena ve dnech 15, 16 a 17 září 2008 na zplyňovacím kotli (Atmos kombi C20S) při spalování hnědého uhlí (HU1). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle.

Před zkouškami byl kotel vždy provozován tak, aby došlo k roztopení kotle a vytvoření základní vrstvy paliva. Při zkouškách na tomto kotli nebylo možno stabilizovat kotel na tepelném výkonu udávaném výrobcem. Jmenovitý výkon kotle je dle výrobce 17 až 25 kW (dle typu paliva). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 16. Při zkouškách se průměrný dosažený tepelný výkon pohyboval okolo 31-36 kW (viz. graf č. 7). Pro ilustraci je zde přiloženo několik fotografií kotle a jeho detailů viz. obr. č. 17, obr. č. 18, obr. č. 19 a obr. č. 20.

Zařízení		zplyňovací kotel		
Označení paliva		HU1		
Označení experimentu		7-1	7-2	7-3
Délka experimentu	hh:mm	4:57	5:27	4:17
Spotřeba paliva	kg/h	7,2	7,8	8,1
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	90,6	75,1	80,5
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	33,0	35,8	36,9
Tepelný výkon	průměr	34,6	30,9	34,4
	medián	35,4	30,3	34,7
	min	23,3	26,8	28,6
	max	40,9	37,3	35,9
	výběrová sm. odch.	4,2	3,5	1,4
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	6,6	7,7	6,2
	medián	6,7	8,4	6,0
	min	1,2	3,6	3,5
	max	14,4	16,4	11,3
	výběrová sm. odch.	2,8	2,0	1,6
Teplota spalin za zařízením	průměr	308	290	315
	medián	309	283	317
	min	247	224	279
	max	350	325	329
	výběrová sm. odch.	18	18	10

tab. č. 16 Vybrané provozní parametry série 7 (zplyňovací, HU1, 100 % jm. výkonu)

zplyňovací kotel palivo HU1



graf č. 7 Průběhy naměřených výkonů série 7 (zplyňovací, HU1, 100 % jm. výkonu)



obr. č. 17 Kotel na váhovém mostu



obr. č. 18 Palivo v zásobníku



obr. č. 19 Zapálené palivo v zásobníku



obr. č. 20 Popel ve spodní části kotle

4.2.8 série 8 (zkoušky 8-1, 8-2 a 8-3)

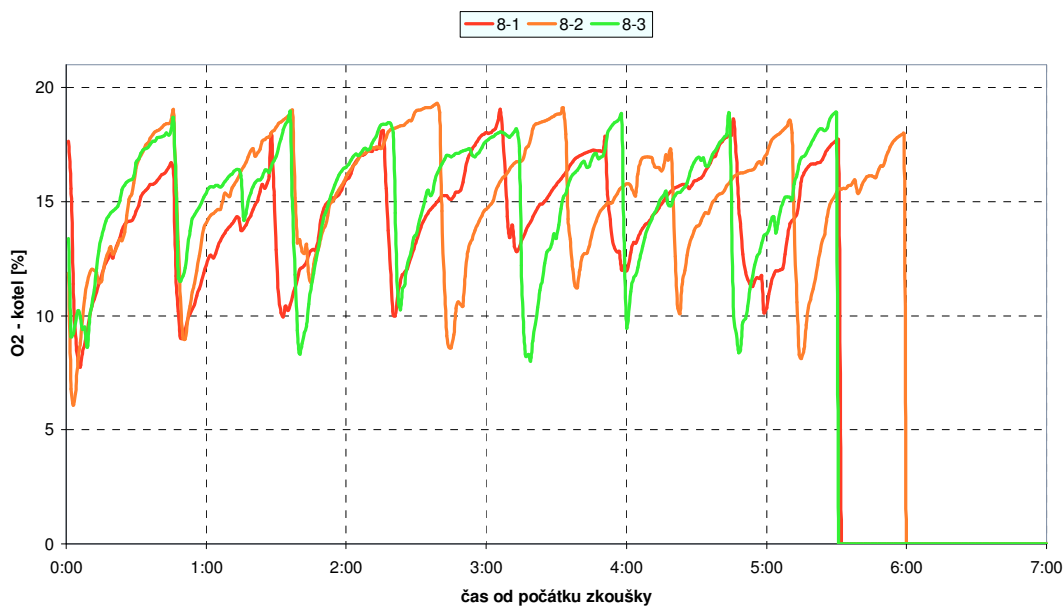
Série 8 byla provedena ve dnech 23, 24 a 25 září 2008 na krbových kamnech (Roztop ETNA) při spalování bukových polen (BUK). Před zkouškami byla krbová kamna vždy provozována tak, aby došlo k roztopení kamen a vytvoření základní vrstvy paliva. Příkladáno bylo vždy tak, aby jedna dávka paliva vydržela hořet vždy přibližně 0,75h (cca 1,8 kg paliva). Zkoušky byly prováděny v souladu s normou na zkoušení vlastností krbových kamen ČSN EN 13240.

Během každého dne zkoušek byly provedeny 3 odběry pro stanovení koncentrace TZL (každý pokrýl 2 příložení paliva), jeden odběr pro stanovení koncentrace POP a TK. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 17. Zařízení není teplovodním kotlem a nemá žádný teplovodní výměník, proto místo výkonových průběhů jsou v tomto případě porovnávány průběhy koncentrací kyslíku ve spalinách (viz. graf č. 8).

Zařízení		krbová kamna			
Označení paliva		buk			
Označení experimentu		8-1	8-2	8-3	
Délka experimentu	hh:mm	5:30	6:00	5:30	
Spotřeba paliva	kg/h	2,4	2,2	2,4	
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	67,1	63,5	63,7	
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	8,5	7,8	8,6	
Tepelný výkon	kW	průměr	x	x	x
		medián	x	x	x
		min	x	x	x
		max	x	x	x
		výběrová sm. odch.	x	x	x
Koncentrace kyslíku za zařízením	%	průměr	14,5	15,2	15,2
		medián	14,8	15,7	15,8
		min	7,7	6,1	8,0
		max	19,1	19,3	18,9
		výběrová sm. odch.	2,4	2,8	2,7
Teplota spalin za zařízením	°C	průměr	303	298	307
		medián	307	300	307
		min	204	167	218
		max	358	413	393
		výběrová sm. odch.	34	51	37

tab. č. 17 Vybrané provozní parametry série 8 (krbová kamna, BUK, 100 % jm. výkonu)

krbová kamna palivo buk



graf č. 8 Průběhy naměřených koncentrací kyslíku ve spalinách za zařízením série 8 (krbová kamna, BUK, 100 % jm. výkonu)

4.2.9 série 9 (zkouška 9-1)

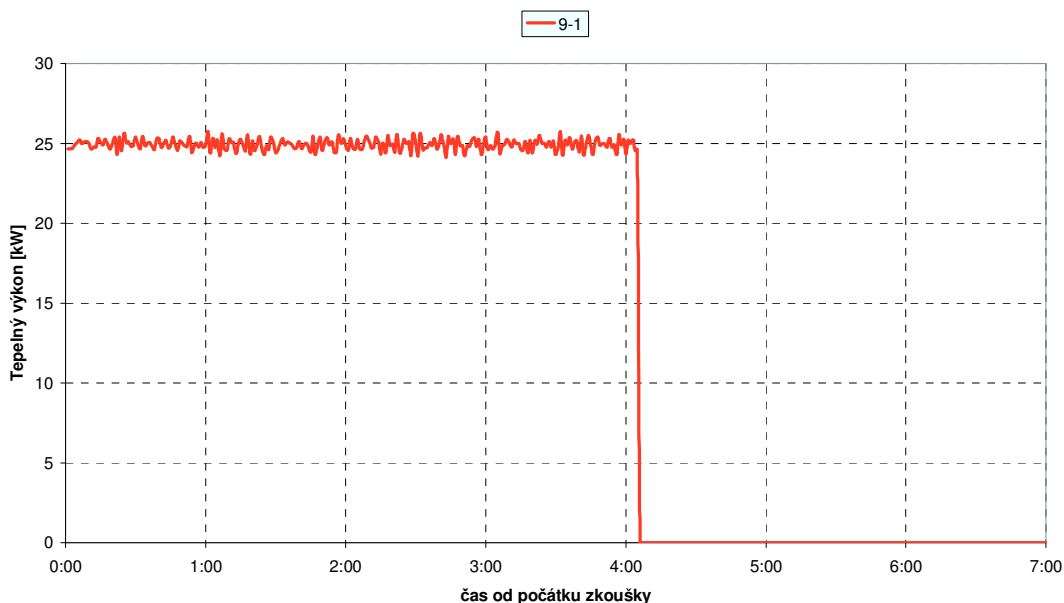
V rámci této série byla provedena pouze jedna zkouška. Měření probíhalo dne 1. října 2008 na plynovém kotli (Viadrus G 27 ECO GL) a palivem byl zemní plyn (ZP).

Kotel byl připojen na měřící smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle. Tato zkouška byla provedena pro stanovení požadovaných hodnot. Kotel byl připojen na měřící smyčku a provozován dle návodu výrobce tak, aby bylo dosaženo ideálního provozního režimu při jmenovitém výkonu kotle. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentu jsou uvedeny v tab. č. 18. Výkon kotle byl po celou dobu měření velmi stabilní (viz. graf č. 9).

Zařízení		plynový kotel	
Označení paliva		zemní plyn	
Označení experimentu		9-1	
Délka experimentu	hh:mm	4:05	
Spotřeba paliva	kg/h	2,0	
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	88,8	
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	23,9	
Tepelný výkon	kW	průměr	24,9
		medián	24,9
		min	24,1
		max	25,8
		výběrová sm. odch.	0,4
Koncentrace kyslíku za zařízením	%	průměr	14,9
		medián	14,9
		min	14,9
		max	15,0
		výběrová sm. odch.	0,0
Teplota spalin za zařízením	°C	průměr	98
		medián	98
		min	94
		max	103
		výběrová sm. odch.	2

tab. č. 18 Vybrané provozní parametry série 9 (plynový kotel, zemní plyn, 100 % jm. výkonu)

plynový kotel palivo zemní plyn



graf č. 9 Průběhy naměřených výkonů série 9 (plynový kotel, zemní plyn, 100 % jm. výkonu)

4.2.10 série 10 (zkoušky 10-1, 10-2 a 10-3)

Série 10 byla provedena ve dnech 9, 10 a 11 března 2009 na automatickém kotli (Ling 25) při spalování černého uhlí (CU). Kotel byl připojen na měřící smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle. Nastavení kotle během zkoušek bylo následující: podavač zap/vyp – 10/25 s, výkon ventilátoru přivádějícího spalovací vzduch 60 %.

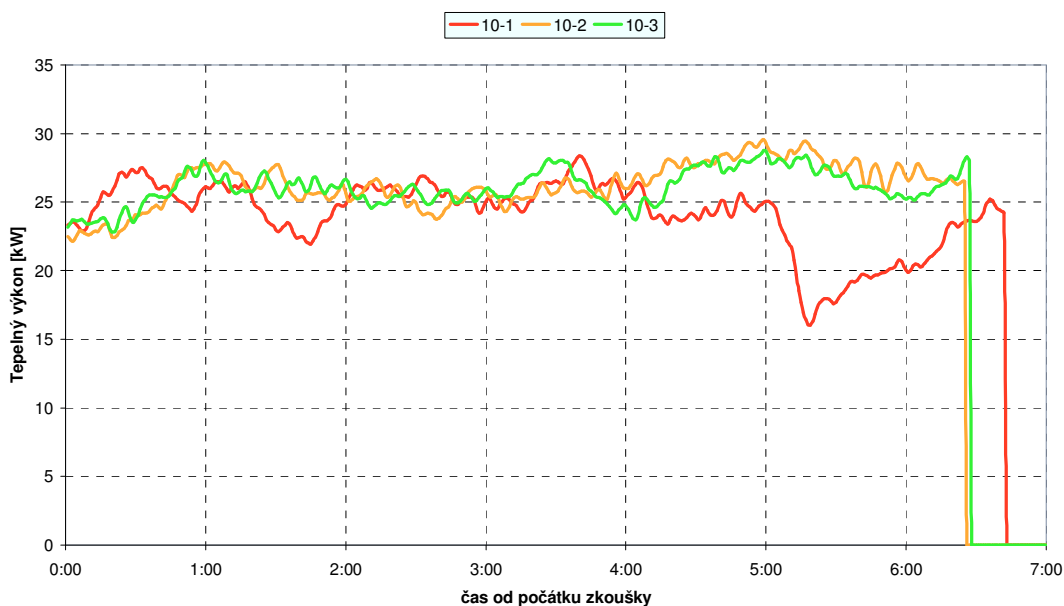
Při odběru 10-1 došlo krátce po 5 hodinách od počátku zkoušky ke krátkodobému nedostatku paliva v hořáku a to mělo za následek krátkodobou nestabilitu spalovacího zařízení (viz.graf č. 10). Během zkoušek 10-2 a 10-3 nedošlo k žádným problémům, které

by měly vliv na chod kotle nebo na odběry vzorků spalin (viz. graf č. 10). Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL, 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 19.

Zařízení		automatický kotel		
Označení paliva		CU		
Označení experimentu		10-1	10-2	10-3
Délka experimentu	hh:mm	6:42	6:25	6:27
Spotřeba paliva	kg/h	3,8	4,1	4,0
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	69,9	70,4	72,7
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	29,0	31,4	30,2
Tepelný výkon	průměr	24,1	26,3	26,1
	medián	24,8	26,3	26,0
	min	16,0	22,1	22,8
	max	28,4	29,6	28,7
	výběrová sm. odch.	2,5	1,6	1,3
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	8,6	7,5	7,4
	medián	8,5	7,6	7,6
	min	3,3	2,8	2,8
	max	19,4	12,0	10,8
	výběrová sm. odch.	2,4	1,6	1,5
Teplota spalin za zařízením	průměr	182	197	200
	medián	185	197	200
	min	117	171	185
	max	196	211	218
	výběrová sm. odch.	10	8	5

tab. č. 19 Vybrané provozní parametry série 10 (automatický, CU, 100 % jm. výkonu)

automatický kotel palivo CU



graf č. 10 Průběhy naměřených výkonů série 10 (automatický, CU, 100 % jm. výkonu)

4.2.11 série 11 (zkoušky 11-1, 11-2 a 11-3)

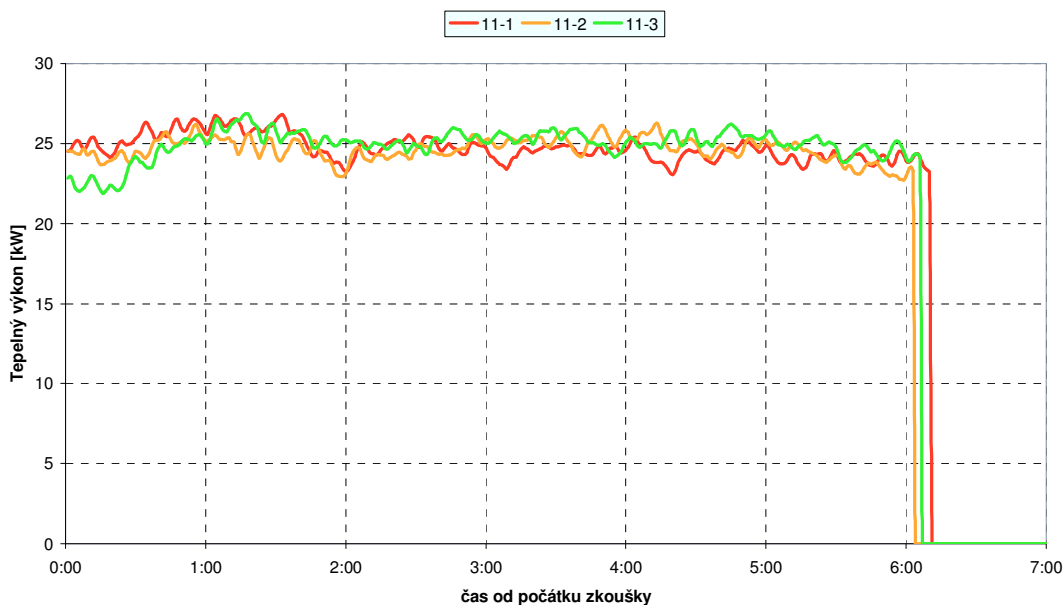
Série 11 byla provedena ve dnech 16, 17 a 18 března 2009 na automatickém kotli (Ling 25) při spalování hnědého uhlí (HU2). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován dle návodu výrobce tak, aby bylo dosaženo ideálního provozního režimu. Nastavení kotle během zkoušek bylo následující: podavač zap/vyp – 10/27 s, výkon ventilátoru přivádějícího spalovací vzduch: 90 %.

Během měření nedošlo k žádným problémům, které by měly vliv na chod kotle nebo na odběry vzorků spalin. Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL, 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Výkony všech tří zkoušek byly velmi stabilní a zkoušky jsou vzájemně porovnatelné (viz. graf č. 11). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 20.

Zařízení	automatický kotel			
Označení paliva	HU2			
Označení experimentu	11-1	11-2	11-3	
Délka experimentu	hh:mm	6:10	6:03	6:05
Spotřeba paliva	kg/h	5,9	5,9	5,9
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	72,5	72,0	72,7
Teoretické množství suchých spalin	m^3_N/h	28,8	28,9	29,0
Tepelný výkon	průměr	24,7	24,7	25,0
	medián	24,6	24,7	25,1
	min	23,1	22,7	21,9
	max	26,8	26,3	26,9
	výběrová sm. odch.	0,8	0,7	0,9
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	10,4	10,5	10,1
	medián	10,5	10,5	10,1
	min	8,1	8,1	6,8
	max	12,5	13,2	14,9
	výběrová sm. odch.	0,9	0,9	1,0
Teplota spalin za zařízením	průměr	194	200	206
	medián	194	201	207
	min	185	186	189
	max	201	209	216
	výběrová sm. odch.	3	4	6

tab. č. 20 Vybrané provozní parametry série 11 (automatický, HU2, 100 % jm. Výkonu)

automatický kotel palivo HU2



graf č. 11 Průběhy naměřených výkonů série 11 (automatický, HU2, 100 % jm. Výkonu)

4.2.12 série 12 (zkoušky 12-1, 12-2 a 12-3)

Série 12 byla provedena ve dnech 20, 23 a 24 března 2009 na automatickém kotli (Ling 25) při spalování kukuřičných pelet (BIO). Kotel byl připojen na měřící smyčku a provozován dle návodu výrobce tak, aby bylo dosaženo ideálního provozního režimu.

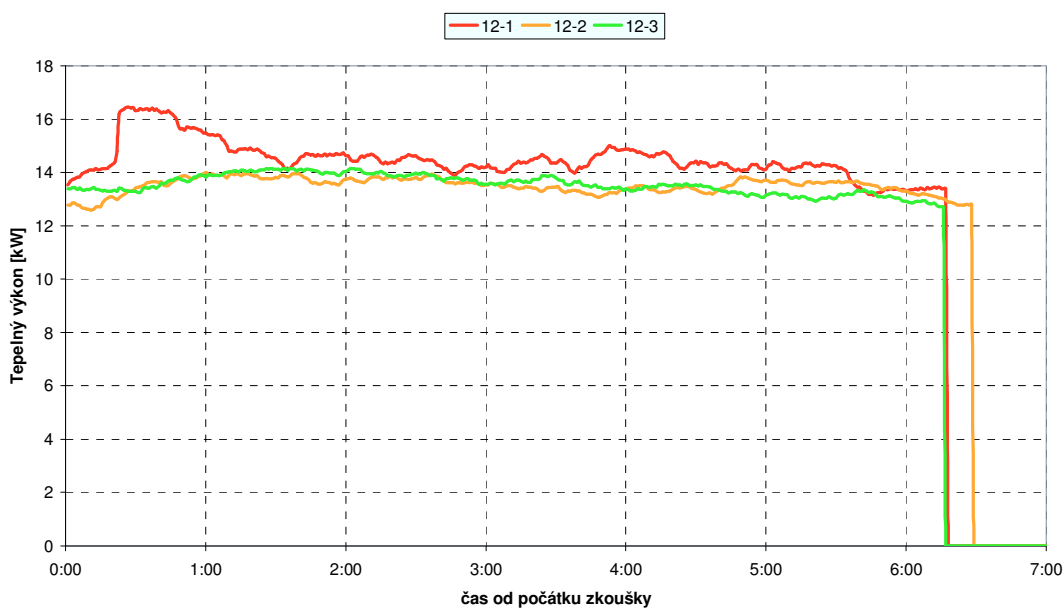
Nastavení kotle během zkoušek bylo následující: podavač zap/vyp – 14/27 s, výkon ventilátoru přivádějícího spalovací vzduch: 60 %. Během zkoušek docházelo ke spékání popela na retortě kotle (viz. obr. č. 21). Spečenec musel být během měření několikrát rozbíjen. Některé kusy spečenice tvořily sklovitou hmotu šedozelené barvy (viz. obr. č. 22).

Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL, 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Z počátku zkoušky 12-1 se nepodařilo zařízení zcela ustálit a najít vhodné provozní nastavení kotle pro toto palivo, po první hodině zkoušky už bylo vše v pořádku. Provoz kotle byl během zkoušek 12-2 a 12-3 ustálený (viz. graf č. 12). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 21.

Zařízení		automatický kotel		
Označení paliva		BIO		
Označení experimentu		12-1	12-2	12-3
Délka experimentu	hh:mm	6:18	6:29	6:16
Spotřeba paliva	kg/h	5,4	4,7	5,2
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	73,1	78,2	71,3
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	17,3	15,0	16,6
Tepelný výkon	průměr	14,5	13,5	13,6
	medián	14,4	13,6	13,5
	min	13,1	12,6	12,7
	max	16,4	14,0	14,1
	výběrová sm. odch.	0,7	0,3	0,4
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	12,5	12,9	13,1
	medián	12,4	12,9	13,1
	min	9,2	9,8	11,2
	max	18,0	16,9	15,3
	výběrová sm. odch.	1,1	1,1	0,7
Teplota spalin za zařízením	průměr	159	156	168
	medián	159	157	168
	min	140	143	156
	max	172	166	179
	výběrová sm. odch.	6	3	4

tab. č. 21 Vybrané provozní parametry série 12 (autoamtický, BIO, 100 % jm. výkonu)

automatický kotel palivo BIO



graf č. 12 Průběhy naměřených výkonů série 12 (autoamtický, BIO, 100 % jm. výkonu)



obr. č. 21 Spečenec popela na retortě kotle



obr. č. 22 Detail přetaveného popela

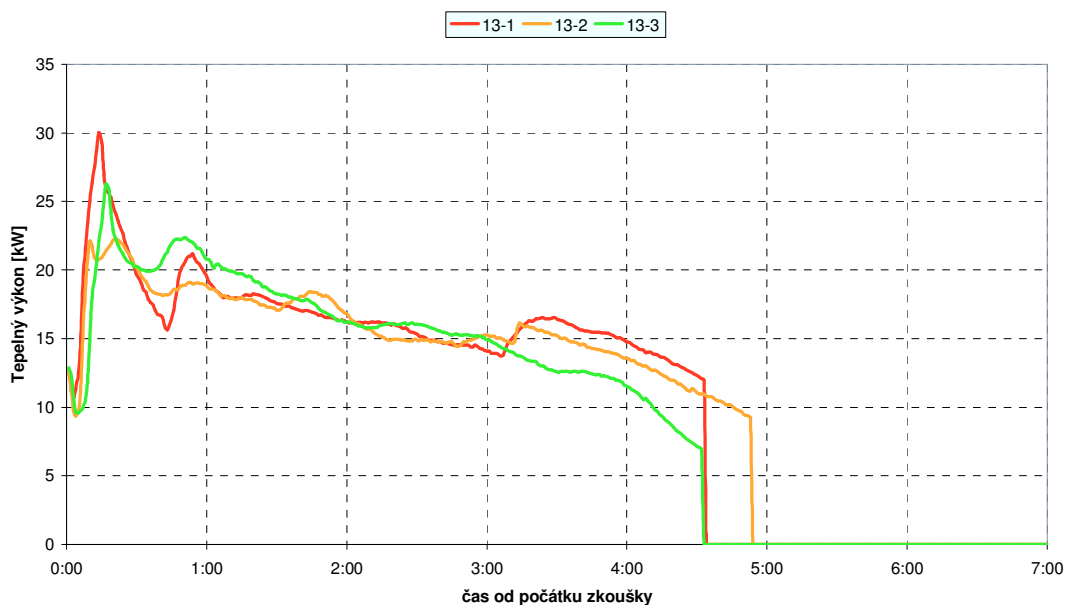
4.2.13 série 13 (zkoušky 13-1, 13-2 a 13-3)

Série 13 byla provedena ve dnech 29, 30 a 31 července 2009 na prohořivacím kotli (Viadrus U26) při spalování černého uhlí (CU). Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle. Před počátkem jednotlivých zkoušek byla vždy vytvořena dostatečná vrstva žhavého paliva tak, aby došlo k bezproblémovému zápalu příkládané dávky paliva. Dávka paliva pro zkoušky činila 13,5 kg. Po přiložení dávky paliva do kotle byly vždy ještě cca 10 minut ponechána popelníková dvířka otevřena. V první půlhodině po přiložení paliva byly vždy měřeny vysoké koncentrace CO a TOC. Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL, 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Průběhy výkonů všech tří zkoušek byly velmi podobné (viz. graf č. 13). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 22.

Zařízení		prohořivací kotel		
Označení paliva		CU		
Označení experimentu		13-1	13-2	13-3
Délka experimentu	hh:mm	4:33	4:53	4:32
Spotřeba paliva	kg/h	3,0	2,8	3,0
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	62,1	62,7	58,7
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	23,2	21,6	23,3
Tepelný výkon	průměr	16,7	16,1	15,8
	medián	16,2	15,5	15,9
	min	10,6	9,4	6,9
	max	30,0	22,3	26,3
	výběrová sm. odch.	3,1	2,7	4,1
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	12,1	12,7	12,5
	medián	12,5	13,8	13,5
	min	1,9	4,5	3,0
	max	20,9	18,4	18,9
	výběrová sm. odch.	3,0	2,7	3,8
Teplota spalin za zařízením	průměr	218	239	251
	medián	201	208	231
	min	114	126	118
	max	386	425	438
	výběrová sm. odch.	49	65	72

tab. č. 22 Vybrané provozní parametry série 13 (prohořivací, CU, 100 % jm. výkonu)

prohořivací kotel palivo CU



graf č. 13 Průběhy naměřených výkonů série 13 (prohořivací, CU, 100 % jm. výkonu)

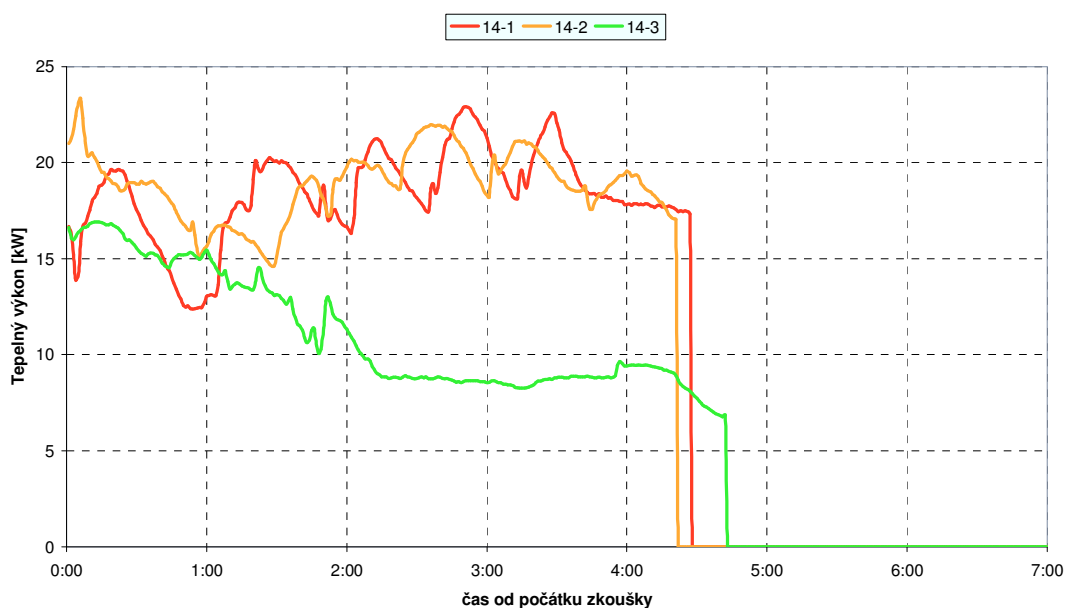
4.2.14 série 14 (zkoušky 14-1, 14-2 a 14-3)

Série 14 byla provedena ve dnech 4, 5 a 6 srpna 2009 na odhořivacím kotli (Dakon DOR 32) při spalování černého uhlí (CU). Kotel byl připojen na měřící smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 100 % jmenovitého výkonu kotle. Před jednotlivými zkouškami byl kotel provozován tak, aby bylo dosaženo běžného provozního stavu kotle. Během zkoušek bylo do kotle dosypáváno palivo dle potřeby (což vzhledem k tomu, že se jedná o kotel s odhořivacím způsobem spalování, nemělo vliv na výsledky spalovacích zkoušek). Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL, 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Při zkoušce 14-3 bylo pro spalovací zkoušku použito palivo, které krátce před provedením zkoušky vydatně zsmoklo. Vlhkost paliva byla vyšší než při zkouškách 14-1 a 14-2. Díky tomuto faktu bylo obtížné udržet provoz kotle na jmenovitém výkonu (viz. graf č. 14). Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 23.

Zařízení		odhořivací kotel		
Označení paliva		CU		
Označení experimentu		14-1	14-2	14-3
Délka experimentu	hh:mm	4:27	4:20	4:49
Spotřeba paliva	kg/h	3,3	3,1	1,9
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	61,4	67,4	64,6
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	25,8	24,2	14,9
Tepelný výkon	průměr	18,4	18,9	11,3
	medián	18,4	19,0	9,5
	min	12,4	14,6	8,1
	max	22,9	23,3	16,9
	výběrová sm. odch.	2,4	1,8	3,0
Koncentrace kyslíku za zařízením	průměr	11,6	11,1	12,4
	medián	11,8	11,3	12,5
	min	7,3	7,8	8,3
	max	16,3	14,2	14,4
	výběrová sm. odch.	2,1	1,5	1,0
Teplota spalin za zařízením	průměr	200	208	152
	medián	204	209	140
	min	144	175	98
	max	234	232	213
	výběrová sm. odch.	22	14	34

tab. č. 23 Vybrané provozní parametry série 14 (odhořivací, CU, 100 % jm. výkonu)

odhořivací kotel palivo CU



graf č. 14 Průběhy naměřených výkonů série 14 (odhořivací, CU, 100 % jm. výkonu)

4.2.15 série 15 (zkoušky 15-1, 15-2 a 15-3)

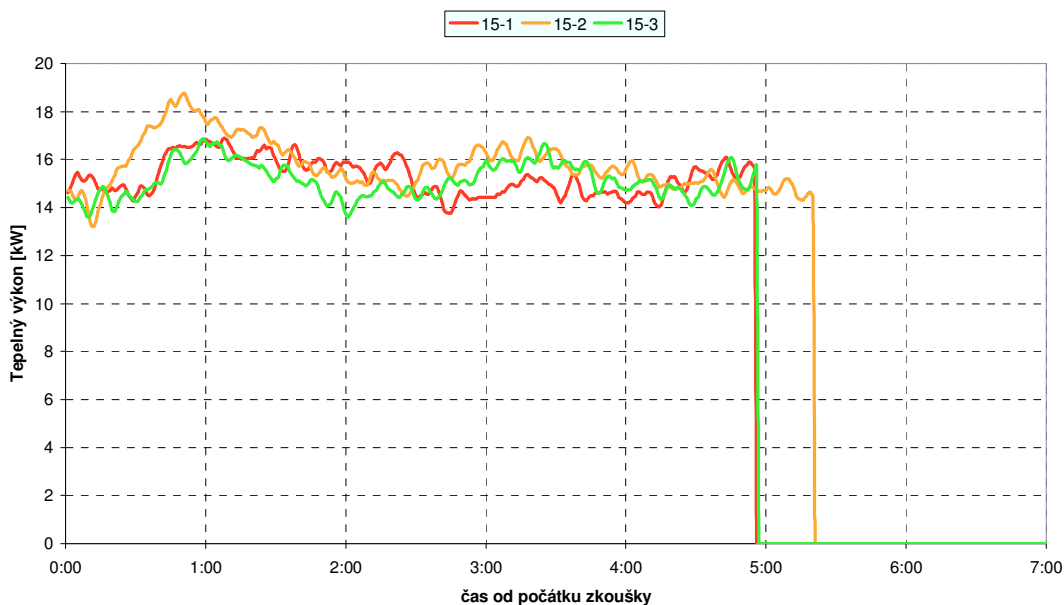
Série 15 byla provedena ve dnech 11, 12 a 13 srpna 2009 na automatickém kotli (Ling 25) při spalování hnědého uhlí (HU1) a provozu na cca 60 % jmenovitého výkonu. Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 60 % jmenovitého výkonu kotle. Nastavení kotle během zkoušek bylo následující: podavač zap/vyp – 6/23 s, výkon ventilátoru přivádějícího spalovací vzduch: 45 %.

Během měření nedošlo k žádným problémovým stavům, které by měly vliv na chod kotle nebo na odběry vzorků spalin (viz. graf č. 15). Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL a 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 24.

Zařízení		automatický kotel			
Označení paliva		HU1			
Označení experimentu		15-1	15-2	15-3	
Délka experimentu	hh:mm	5:04	5:20	4:56	
Spotřeba paliva	kg/h	3,5	3,8	3,6	
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)	%	80,5	77,5	77,1	
Teoretické množství suchých spalin	m ³ _N /h	16,4	17,5	16,9	
Tepelný výkon	kW	průměr	15,3	15,9	15,1
		medián	15,2	15,7	15,0
		min	13,8	13,2	13,6
		max	16,9	18,8	16,9
		výběrová sm. odch.	0,8	1,1	0,7
Koncentrace kyslíku za zařízením	%	průměr	12,1	11,8	12,1
		medián	12,2	12,1	12,2
		min	8,5	7,4	8,3
		max	14,7	15,9	14,5
		výběrová sm. odch.	1,1	1,4	1,1
Teplota spalin za zařízením	°C	průměr	164	169	168
		medián	164	169	168
		min	153	150	158
		max	172	181	177
		výběrová sm. odch.	4	5	4

tab. č. 24 Vybrané provozní parametry série 15 (automatický, HU1, 60 % jm. výkonu)

automatický kotel palivo HU1



graf č. 15 Průběhy naměřených výkonů série 15 (automatický, HU1, 60 % jm. výkonu)

4.2.16 série 16 (zkoušky 16-1, 16-2 a 16-3)

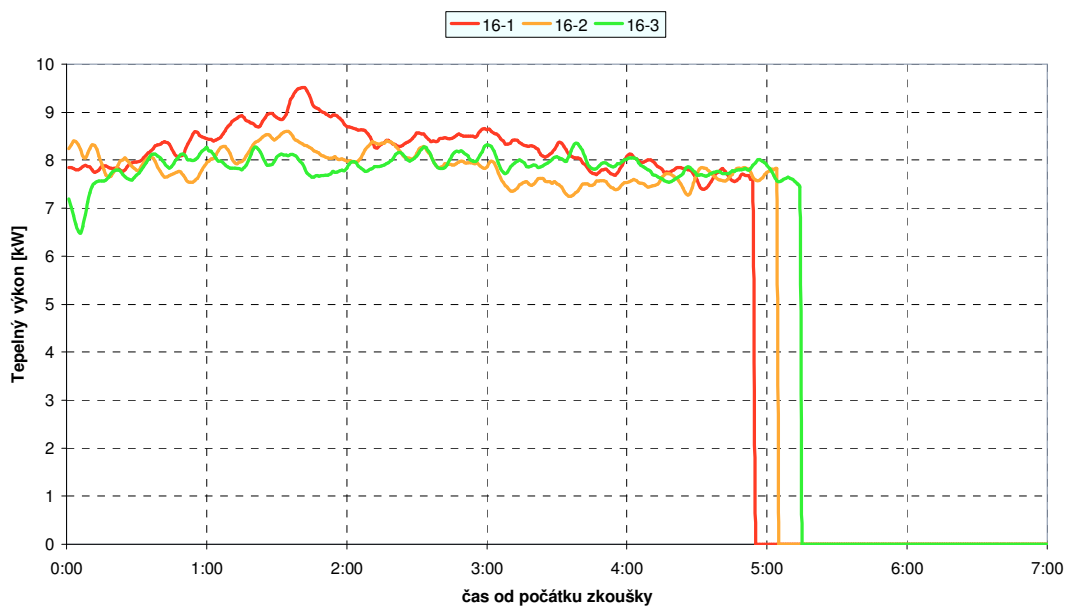
Série 16 byla provedena ve dnech 17, 18 a 19 srpna 2009 na kotli (Ling 25) při spalování hnědého uhlí (HU1) a provozu na cca 30 % jmenovitého výkonu. Kotel byl připojen na měřicí smyčku a provozován tak, aby bylo dosaženo 30 % jmenovitého výkonu kotle. Nastavení kotle během zkoušek bylo následující: podavač zap/vyp – 5/40 s, výkon ventilátoru přivádějícího spalovací vzduch: 7 %. Během měření nedošlo k žádným problémům, které by měly vliv na chod kotle nebo na odběry vzorků spalin. Během každé spalovací zkoušky byly provedeny 3 odběry TZL a 1 dlouhodobý odběr pro stanovení POP. Z průběhu výkonů jednotlivých zkoušek (viz. graf č. 16) je vidět, že provoz kotle byl

během zkoušek ustálený. Nejdůležitější parametry naměřené při experimentech jsou uvedeny v tab. č. 25.

Zařízení		automatický kotel			
Označení paliva		HU1			
Označení experimentu		16-1	16-2	16-3	
Délka experimentu		hh:mm	4:55	5:04	5:14
Spotřeba paliva		kg/h	1,9	1,9	1,9
Tepelná účinnost zařízení (přímá metoda)		%	79,9	76,2	75,6
Teoretické množství suchých spalin		m ³ _N /h	8,9	8,9	9,0
Tepelný výkon	kW	průměr	8,3	7,9	7,9
		medián	8,3	7,9	7,9
		min	7,4	7,3	6,5
		max	9,5	8,6	8,4
		výběrová sm. odch.	0,5	0,3	0,3
Koncentrace kyslíku za zařízením	%	průměr	12,8	13,6	13,6
		medián	12,9	13,6	13,7
		min	10,0	11,2	11,4
		max	17,1	17,3	18,5
		výběrová sm. odch.	0,9	0,9	0,8
Teplota spalin za zařízením	°C	průměr	125	127	129
		medián	125	127	129
		min	119	120	115
		max	134	132	136
		výběrová sm. odch.	3	2	3

tab. č. 25 Vybrané provozní parametry série 16 (Automatický HU1, 30 % jm. výkonu)

automatický kotel palivo HU1



graf č. 16 Průběhy naměřených výkonů série 16 (Automatický HU1, 30 % jm. výkonu)

5 Výsledky

V této části práce je každá sledovaná látka popř. skupina látek krátce představena, jsou prezentovány naměřené výsledné emisní faktory vztahované na energii v palivu, jsou porovnávány zobecněné naměřené EF pro ČR s EF navrhovanými European Environment Agency (EEA) a s EF používanými v ČR pro bilanci (odhad) emisí vytápění domácností,

a potom jsou tyto emisní faktory použity pro výpočet modelové emisní bilance s použitím spotřeb paliv na vytápění domácností v ČR za rok 2006.

Dále jsou porovnány naměřené koncentrace CO, NMVOC a TZL s limitními koncentracemi definovanými normou ČSN EN 303-5.

Případně doplněny dalšími zajímavými závislostmi a poznatky.

5.1 Komentář k formě vyjádření výsledků

5.1.1 Matice měřených kombinací – vzájemné porovnání stanovených EF podle sledovaných parametrů

Pro vyjádření výsledků byl zvolen jednotný formát tabulky pro prezentaci naměřených hodnot. Tabulka přehledně představuje nejen výsledky jednotlivých experimentů, ale také průměrné stanovené hodnoty pro danou konstrukci zařízení, palivo a výkon.

konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo																			
		HU1			HU2			CU			BUK		BIO		ZP						
		ZK 1	ZK 2	ZK 3	ZK 1	ZK 2	ZK 3	ZK 1	ZK 2	ZK 3			ZK 1	ZK 2	ZK 3						
automatický kotel	100	3x	ZK 1	3x	ZK 1	3x	ZK 1	x	ZK 2	x	x	x	3x	ZK 1	x	x	x				
			ZK 2		ZK 2		ZK 2		ZK 2					ZK 2							
			ZK 3		ZK 3		ZK 3		ZK 3					ZK 3							
	60	3x	ZK 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
			ZK 2															ZK 2	ZK 2	ZK 2	
			ZK 3															ZK 3	ZK 3	ZK 3	ZK 3
30	3x	ZK 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
		ZK 2																ZK 2	ZK 2	ZK 2	
		ZK 3																ZK 3	ZK 3	ZK 3	ZK 3
prohořivací kotel	100	pozn. 1	ZK 1	x	3x	ZK 1	3x	ZK 1	ZK 2	ZK 3	x	x	x	x	x	x	x	x			
			ZK 2																ZK 2	ZK 2	
			ZK 3																ZK 3	ZK 3	
odhořivací kotel	100	pozn. 2	ZK 1	x	pozn. 3	ZK 1	3x	ZK 1	ZK 2	ZK 3	x	x	x	x	x	x	x	x			
			ZK 2																ZK 2	ZK 2	
			ZK 3																ZK 3	ZK 3	
zplyňovací kotel	100	3x	ZK 1	x	x	ZK 1	3x	ZK 1	ZK 2	ZK 3	x	x	x	x	x	x	x	x			
			ZK 2																ZK 2	ZK 2	
			ZK 3																ZK 3	ZK 3	
krbová kamna	100	x	x	x	x	3x	ZK 1	ZK 2	ZK 3	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
																			ZK 2	ZK 2	ZK 2
																			ZK 3	ZK 3	ZK 3
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	pozn. 4	ZK 1	-			
																	ZK 2		ZK 2	ZK 2	
																	ZK 3		ZK 3	ZK 3	

tab. č. 26 Matice měřených kombinací palivo, zařízení, výkon

Legenda k tab. č. 26:

x měření této kombinace proměnných nebylo provedeno

ZK1, ZK2, ZK3 zkouška 1, 2 a 3 provedená na dané kombinaci proměnných

3x stanovená hodnota charakteristická pro danou kombinaci, získána jako průměr ze tří provedených zkoušek

Při některých zkouškách došlo k nestandardním jevům nebo jiným anomáliím a ty jsou popsány v poznámkách 1 až 4:

pozn. 1 brána hodnota ze ZK 1, kdy bylo přikládáno palivo na 4 hodiny provozu zařízení, při ZK 2 a ZK 3 byla přikládána dávka každou půlhodinu. Více je uvedeno v kapitole 4.2.3.

pozn. 2 počítáno s průměrem ze ZK 2 a ZK 3. Při zkoušce ZK 1 se vysypalo velké množství paliva přímo do spalovací komory a kotel se choval spíše jako prohořivací. Více je uvedeno v kapitole 4.2.5.

pozn. 3 počítáno s průměrem ZK 1 a ZK 2. Při zkoušce ZK 3 bylo použito palivo se zvýšenou vlhkostí. Více v kapitole 4.2.14.

pozn. 4 byla provedena pouze ZK 1.

Dle hodnot EF v této jednotné tabulce je možno pozorovat vliv paliva, konstrukce zařízení a výkonu přesněji provozu zařízení na jmenovitý a nižší výkon zařízení.

5.1.2 Srovnání experimentálně stanovených emisních faktorů a faktorů používaných v ČR a EU

Pro vzájemné srovnání EF doporučených v EU, používaných v ČR a experimentálně stanovených bylo opět pro všechny sledované škodliviny použito jednotné grafické vyjádření, které je nutné předem generálně okomentovat.

Jako porovnávací EF, doporučené pro státy EU (v příslušných grafech označovány jako EEA) jsou použity hodnoty dle EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009 - Part B - 1. A.4. small combustion [30]. Tento materiál uvádí hodnotu EF a ještě dolní (DM) a horní (HM) mez, které vyjadřují pokrytí 95 % konfidenčního intervalu (pravděpodobnosti pokrytí) hodnot. Tento konfidenční interval je v grafech vyneseno ve formě chybových úseček na sloupci EEA.

Jako porovnávací data jsou použity EF ČHMÚ (v příslušných grafech označovány jako ČHMÚ), které jsou používány pro bilance emisí v ČR z REZZO3 (viz. tab. č. 1). Tyto EF jsou přepočteny z emisních faktorů vztahených na hmotnost paliva (tuny) na EF vztahené na energii v palivu (GJ). Pro přepočet byly použity průměrné výhřevnosti paliv v ČR (hnědé uhlí 18,35; černé uhlí 25,83; dřevo 14,60 MJ/kg).

Pro zobecnění EF naměřených na Výzkumném energetickém centru (v příslušných grafech označovány jako VEC) pro území ČR bylo uvažováno s odhadem zastoupení konstrukcí spalovacích zařízení pro jednotlivé druhy paliv v českých domácnostech. Tento odhad byl proveden na základě údajů Asociace podniků topenářské techniky o prodeji spalovacích zařízení za posledních 10 let. Odhad zastoupení uvádí tab. č. 27.

kostrukce zařízení	fosilní paliva	biomasa
prohořivací	54,8	25,3
odhořivací	39,3	18,1
automatické	5,9	2,0
zplyňovací	0	28,7
krby, kamna	x	25,9

tab. č. 27 Odhad zastoupení spalovacích zařízení v ČR podle instalovaného výkonu v %

Dále jsou doplněny minimální a maximální hodnoty naměřené na daném typu paliva, což vyjadřují vynesené chybové úsečky na sloupci VEC.

5.1.3 Srovnávací modelový odhad emisí z malých spalovacích zdrojů při použití různých EF

Pro srovnání dopadu užití různých EF EEA, ČHMÚ a VEC při aplikaci spotřeby paliv v českých domácnostech jsou pro každou sledovanou znečišťující látku vytvořeny grafy.

Pro porovnání je využit odhad spotřeby tuhých paliv a zemního plynu v domácnostech v roce 2006. Tento odhad je přepočten přes průměrné výhřevnosti jednotlivých paliv na energii v palivech obsaženou v tab. č. 28. Na tuto spotřebu energie jsou aplikovány emisní faktory dle EEA, ČHMÚ a VEC.

		hnědé uhlí	černé uhlí	dřevo	zemní plyn
odhad spotřeby paliv v domácnostech za rok 2006	tis. tun/rok (mil. m ³ /rok)	1270	52,1	602	1510
průměrná výhřevnost paliv	MJ/kg (MJ/m ³)	18,3	25,8	14,6	34,1
energie obsažená ve spotřebovaném palivu	TJ/rok	23300	1350	8790	51300

tab. č. 28 Odhad spotřeby paliv v domácnostech za rok 2006

5.2 Základní znečišťující látky - Oxid uhelnatý (CO)

5.2.1 Základní charakteristika CO

Hořlavý a prudce jedovatý bezbarvý plyn bez zápachu, je hlavním produktem nedokonalého spalování uhlíkatých paliv. Hmotností je srovnatelný se vzduchem. Oxid uhelnatý v atmosféře reaguje fotochemickými reakcemi s jinými látkami, zejména hydroxylovým radikálem. Konečným produktem rozkladu oxidu uhelnatého je oxid uhličitý. Doba setrvání v ovzduší se odhaduje na 36 až 110 dní.

Přírodní pozadřová koncentrace v ovzduší je asi 0,1 až 0,2 mg/m³[35].

5.2.2 Rizika spojená s obsahem CO v ovzduší

Oxid uhelnatý vstupuje vdechováním do krevního oběhu živočichů, kde se váže na krevní barvivo hemoglobin asi 200 krát silněji než kyslík, který má být prostřednictvím hemoglobinu transportován z plic do tkání. Jedovatost je tedy způsobena silnou afinitou k hemoglobinu, s nímž vytváří karboxyhemoglobin (COHb), čímž znemožňuje přenos kyslíku v podobě oxyhemoglobinu. Odstranění COHb z krve trvá mnoho hodin až dní. Příznaky otravy se objevují již při přeměně 10 % hemoglobinu na COHb [35].

Malé koncentrace oxidu uhelnatého mohou působit vážné zdravotní potíže zejména lidem trpícím kardiovaskulárními chorobami, například angina pectoris. Již koncentrace 0,05 %, tj. 500 ppm, či asi 450 mg CO/m³ může zablokovat funkci u 50 % hemoglobinu s následným kolapsem a smrtí [31].

Při úrovních COHb do 10 % se obvykle neprojevují žádné příznaky. V oblasti 10 až 30 % se objevují bolesti hlavy, závratě, slabost, schvácenost, dezorientace a poruchy vidění. Při COHb 30 až 50 % přistupuje dušnost, zrychlený tep a dýchání, synkopa. Při úrovních nad 50 % může nastat kóma, křeče, zástava srdce [32].

5.2.3 Mechanismus vzniku CO

Oxid uhelnatý je základním meziproduktem přeměny uhlíku v palivu na konečný produkt oxid uhličitý (CO₂) při spalovacím procesu. Míra obsahu CO ve spalinách je indikátorem

kvality spalování. Pro dokonalou konverzi CO na CO₂ je důležitý dostatečný přebytek kyslíku, teplota a doba setrvání v reakční zóně. Malá spalovací zařízení nemohou všechny tyto nezbytné podmínky splnit dokonale, protože přikládání palivo je nehomogenní a reakční zóna je velmi prostorově omezena. Koncentrace CO při spalování pevných uhlíkatých paliv v malých zařízeních může nabývat hodnot od několika desítek ppm v kvalitních moderních malých spalovacích zařízeních až po několik tisíc v nevhodně provozovaných zařízeních starých konstrukcí [30].

5.2.4 Experimentálně stanovené EF CO vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF CO [g/GJ]														
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo												
		HU1		HU2		CU		BUK		BIO		ZP		
automatický kotel	100	450	399	553	581	201	319	x	1700	2230	x			
			553		573		175			1510				
			398		507		109			1350				
	60	559	565	x	x	x	x	x	x	x	x			
			564									548		
			1140									910	985	
	30	1010	7860	x	4170	4430	4840	4640	x	x	x			
			4010									3750	3790	5000
			6160									4300	4300	4890
odhořivací kotel	100	4320	6160	x	3280	3130	4170	5010	x	x				
			4650								4000	3440	3820	
			4000								215	5800	3680	
zplyňovací kotel	100	132	215	x	x	x	4310	4530	x	x				
			109								71,7	4710	3700	
			2080								2840	2290		
krbová kamna	100	x	x	x	x	2410	x	x	x	x				
											2080	2840	2290	
											0,346	-	-	
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
											0,346	-	-	
											-	-	-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 29

Stanovené EF CO vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ

5.2.4.1 Porovnání EF podle paliva

Dle tab. č. 29 byly při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF CO v rozsahu od 201 do 1700 g/GJ. Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF CO v rozsahu od 4170 do 7860 g/GJ. Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF CO v rozsahu od 3280 do 4320 g/GJ.

Velikost EF CO na jednom spalovacím zařízení při použití různých paliv souvisí především s vhodností parametrů paliva (granulometrie, vlhkost) pro dané spalovací zařízení. Rozdíly těchto hodnot jsou zhruba jednořádkové nebo menší.

5.2.4.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

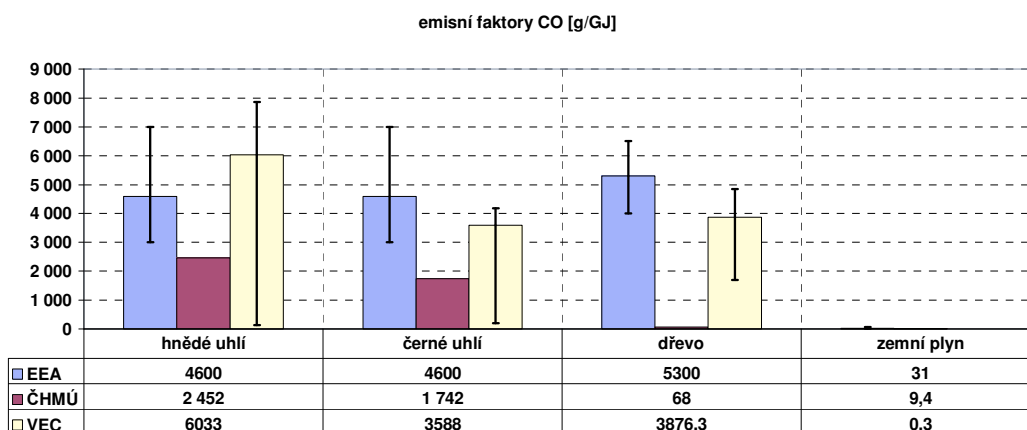
Vliv spalovacího zařízení je možno sledovat porovnáním hodnot při 100% jmenovitém výkonu zařízení v jednom sloupci (viz. tab. č. 29). Vliv spalovacího zařízení pozorovaný při spalování paliva HU1. Minimální hodnoty byly naměřeny při spalování ve zplyňovacím kotli 132 g/GJ, největší byly měřeny v prohořivacím kotli 7860 g/GJ. Tyto rozdíly jsou zhruba dvouřádkové. Druhé porovnání je možno provést s biomasou (paliva BUK a BIO). Minimální hodnota byla naměřena na automatickém kotli 1700 g/GJ, podobné hodnoty byly také stanoveny na krbových kamnech 2410 g/GJ. Maximální hodnota byla naměřena v prohořivacím kotli 4840 g/GJ. Tyto rozdíly jsou relativně nízké (max/min je cca 2 až 3).

V obou případech (spalování uhlí i biomasy) vykazují prohořivací a odhořivací kotle (kotle starších konstrukcí) horší hodnoty než automatické a zplyňovací kotle (kotle moderních konstrukcí).

5.2.4.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Tento vliv byl sledován při spalování paliva HU na automatickém kotli. Jsou porovnávány tři výkonové hladiny a to 100, 60 a 30 % jmenovitého výkonu (viz. tab. č. 29). Z hodnot je zřejmé, že při provozu zařízení na nižší než jmenovitý výkon se EF CO zvyšuje.

5.2.5 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU

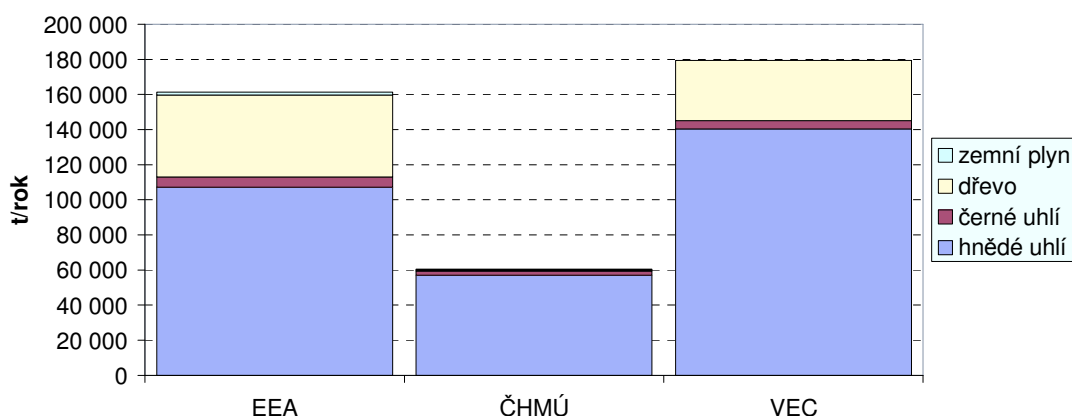


Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 17 Porovnání EF CO doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Z porovnání hodnot EF CO (viz graf č. 17) vyplývá, že hodnoty ČHMÚ jsou oproti hodnotám EEA vždy nižší. Tento trend se projevuje i ve srovnání s naměřenými hodnotami VEC. Vyjma hodnoty EF CO pro zemní plyn, kde hodnota VEC je zhruba o jeden řád nižší. Hodnota VEC pro zemní plyn však vychází pouze z jednoho měření, proto je jeho věrohodnost značně nízká.

Nástin promítání uvedených EF CO do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 18. Z něj je patrné, že největší příspěvek CO přináší do bilance při použití EF EEA a VEC spalování hnědého uhlí a dřeva. Při použití EF ČHMÚ je však příspěvek emisí CO ze dřeva minimální. Celkové množství emisí CO je při užití REF EEA a VEC podobné, při užití EF ČHMÚ zhruba třetinové.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 18 Modelový odhad emisí CO z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

5.2.6 Porovnání naměřených koncentrací s limitními dle ČSN EN 303-5

Norma ČSN EN 303-5 se zabývá mimo jiné také zkoušením kotlů a definuje limitní koncentrace několika základních znečišťujících látek. Spalovací zařízení pak rozděljuje do tří tříd podle dosažených naměřených hodnot. Třída 1 udává nejmírnější podmínky pro splnění a třída 3 je nejpřísnější. Tato norma hovoří o schopnosti zařízení splnit podmínky požadované jednotlivými třídami.

Limitní hodnoty koncentrací pro jednotlivé třídy a typy paliv pro CO jsou uvedeny v tab. č. 30. Experimentálně stanovené koncentrace jsou uvedeny v tab. č. 31.

Mezní hodnoty emisí pro kotle do 50 kW
v $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2

Dodávka paliva	Palivo	CO		
		třída 1	třída 2	třída 3
ruční	biologické	25 000	8 000	5 000
	fosilní			
samočinná	biologické	15 000	5 000	3 000
	fosilní			

tab. č. 30 Limitní koncentrace CO dle normy ČSN EN 303-5

konstrukce zařízení	% jm. výkon	palivo									
		HU1		HU2		CU		BUK	BIO	ZP	
automatický kotel	100	984	872	1240	1300	451	716	x	3670	4830	x
		1210	1280		392		3280				
		871	1130		244		2920				
	60	1220	1240	x	x	x	x	x	x		
		1230	1200								
		2490	1990	x	x	x	x	x	x		
	30	2210	2160	x	x	x	x	x	x		
prohořivací kotel	100	17200	17200	x	9120	9680	11000	x	x	10600	x
		8760	8280			11400					
		8180	9390			11100					
odhořivací kotel	100	9450	13500	x	7170	6840	9510	x	x	11400	x
		10200	7510			8710					
		8740	12700			8400					
zplyňovací kotel	100	288	470	x	x	9830	x	x	x	10300	x
			238							10700	
			157							8440	
krbová kamna	100	x	x	x	x	5480	x	x	x	4750	x
										6470	
										5230	
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	x	0,765	x
										-	
										-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 31 Naměřené koncentrace CO v mg/m³_N při 10 % O₂

Porovnáním limitních koncentrací (viz. tab. č. 30) a stanovených koncentrací (viz. tab. č. 31) lze konstatovat:

- automatický kotel splňuje třídu 3 pro HU1, HU2 a CU. Pro palivo BIO splňuje třídu 2 (< 5000 mg/m³_N při 10 % O₂). Doporučovaným palivem pro tento konkrétní typ kotle je hnědé uhlí ořech 2 nebo dřevěné pelety průměru 6 až 14 mm. Výrobce uvádí, že kotel splňuje požadavky normy ČSN EN 303-5 třída 3 (< 3000 mg/m³_N při 10 % O₂), což odpovídá naměřeným výsledkům vyjma zkoušek prováděných na palivu BIO, které mezi doporučená paliva nepatří.
- prohořivací kotel splňuje třídu 1 (< 25 000 mg/m³_N při 10 % O₂) pro všechna zkoušená paliva, což je v souladu s údaji výrobce.
- odhořivací kotel splňuje třídu 1 (< 25 000 mg/m³_N při 10 % O₂) pro paliva HU1 a BUK. Pro CU splňuje třídu 2 (< 8 000 mg/m³_N při 10 % O₂). Výrobce udává třídu kotle 2 pro doporučené palivo hnědé uhlí, tohoto parametru nebylo dosaženo, neboť naměřena hodnota byla 9 450 mg/m³_N při 10 % O₂.
- zplyňovací kotel splňuje třídu 3 (< 3 000 mg/m³_N při 10 % O₂) pro palivo HU1 a pro palivo BUK splňuje třídu 1 (< 25 000 mg/m³_N při 10 % O₂). Výrobce udává, že kotel splňuje třídu 3 pro doporučená paliva hnědé uhlí a kusové dříví. Pro hnědé uhlí jsou hodnoty v souladu s údaji deklarovanými výrobcem, avšak naměřené hodnoty pro kusové dříví byly značně překročeny, 9 830 mg/m³_N při 10 % O₂.

5.2.7 Diskuse a dílčí závěry

- Množství emisí CO je úzce spjato s kvalitou spalování.
- Spalovací zařízení moderních konstrukcí vykazují nižší emise CO než kotle starších konstrukcí. Nejhorších hodnot emisí CO vykazují zařízení prohořivací konstrukce.
- Pro množství emisí této znečišťující látky je klíčová kvalita spalovacího procesu.
- Každé palivo lze spálit s velice nízkým množstvím vznikajícího CO, ale to je podmíněno vhodným spalovacím zařízením, které je určeno právě na spalování daného typu paliva. Problémem méně jakostních paliv je vysoká pořizovací cena spalovacího zařízení, které dokáže méně jakostní palivo kvalitně spálit.

- Vliv spalovaného paliva na množství emisí CO je přibližně jednořádkový.
- Vliv konstrukce spalovacího zařízení na množství emisí CO je až dvouřádkový
- Vliv provozu zařízení na různých výkonových hladinách na množství emisí CO je menší než jednořádkový, při provozu zařízení na menší než jmenovitý výkon množství emisí CO stoupá.
- Při porovnání naměřených EF VEC s hodnotami EF doporučenými EEA, je nutné konstatovat, že jejich hodnoty jsou přibližně podobné. Emisní faktory ČHMÚ jsou u černého a u hnědého uhlí podceněny přibližně o polovinu a pro dřevo přibližně 50 krát.
- Užití EF EEA a VEC vede k podobným celkovým odhadům množství emisí z domácnosti v ČR, ale při použití EF ČHMÚ je celkové množství přibližně třetinové.
- CO je jedním ze sledovaných parametrů nejen podle ČSN EN 303-5, ale také dle nového připravovaného zákona o ovzduší a programu „Zelená úsporám“ při uvádění nových spalovacích zařízení na trh. Tím se nejen vyvíjí značný tlak na výrobce spalovacích zařízení, ale také přispívá ke zlepšení kvality spalovacího procesu v zařízeních malých výkonů, což povede k pozoruhodnému zlepšení množství emisí spojených s kvalitou spalovacího procesu.

5.3 Základní znečišťující látky - Oxidy dusíku (NO_x)

5.3.1 Základní charakteristika

Oxidy dusíku zahrnují širokou škálu látek, nejčastěji se jedná o oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Do této skupiny patří také oxid dusitý (N_2O_3), tetraoxid dusíku (N_2O_4) a oxid dusičitý (N_2O_5) [35].

- Oxid dusnatý NO je bezbarvý plyn, velmi jedovatý, který při kontaktu s kyslíkem reaguje na oxid dusičitý. Oxid dusnatý má mnoho rolí v těle organismů včetně člověka. Konkrétně způsobuje účinkem na hladké svalstvo cévy tzv. vazodilataci (rozšíření cév), dále erekci penisu a také uvolnění svalstva v trávicí soustavě, což hraje roli ve schopnosti střev posunovat potravu dále. Mimo to dochází k tvorbě oxidu dusnatého i v samotné centrální nervové soustavě, kde má zřejmě jistou roli ve schopnosti učení a vzniku paměti; každopádně zde má NO funkci neurotransmiteru. Oxid dusnatý byl identifikován i v dalších tkáních, jako je srdeční i kosterní svalovina [35].
- Oxid dusičitý NO_2 je hnědočervený, silně jedovatý plyn charakteristického zápachu, který za pokojové teploty dimeruje na N_2O_4 , který je bezbarvý. Oxid dusičitý je posledním meziproduktem při výrobě kyseliny dusičné a snadno se rozpouští ve vodě za vzniku kyseliny dusité a kyseliny dusičné. Oxid dusičitý je pohlcován hlenem dýchacích cest z 80 až 90 procent. Způsobuje záněty dýchacích cest od lehkých forem až po edém plic [35].
- Oxid dusný N_2O , nazývaný také rajský plyn je bezbarvý plyn, slabého zápachu a nasládlé chuti, který byl v dřívějších dobách používán jako narkotikum při chirurgických operacích a dnes se používá jako hnací plyn ve sprejích [35].

5.3.2 Rizika spojená s obsahem NO_x v ovzduší

Souvisí se vznikem kyselých dešťů, přispívá k tvorbě přízemního ozónu a vzniku fotochemického smogu. Je také jedním ze skleníkových plynů.

Oxidy dusíku mohou negativně působit na zdraví člověka, především vdechování vyšších koncentrací dráždí dýchací cesty. Předpokládá se, že se oxidy dusíku váží na krevní barvivo a zhoršují tak přenos kyslíku z plic do tkání. Některé náznaky ukazují, že oxidy dusíku mají určitou roli i při vzniku nádorových onemocnění [35].

5.3.3 Mechanismus vzniku NO_x

Emise oxidů dusíku ze spalování vznikají ze tří hlavních důvodů a dle nich se nazývají palivové, vysokoteplotní a promptní.

- **Palivové NO_x:** hlavním zdrojem těchto oxidů dusíku jsou paliva obsahující dusíkaté látky. Tento dusík je pak během hoření oxidován na oxidy dusíku a odchází společně s dalšími produkty hoření do ovzduší. Tento druh oxidů dusíku může tvořit až 50% z celkové produkce oxidů dusíku při spalování olejů (LTO) a až 80% při spalování uhlí. Emise lze snížit či vyloučit používáním bezdusíkatých paliv [35].
- **Termické NO_x:** vznikají z molekul N₂ obsažených ve vzduchu, který se účastní spalování. Vlivem vysoké teploty je tento atmosférický dusík rozštěpen a s přítomnými atomy kyslíku vznikají oxidy dusíku. Jejich množství je závislé na teplotě spalování a na době zdržení ve spalovacím prostoru. Emise proto lze snížit vhodným uspořádáním spalování [35].
- **Promptní NO_x:** vznikají tak, že molekulární dusík je přeměňován přes meziprodukty na NO na rozhraní plamene radikálovými reakcemi za přítomnosti uhlovodíků. Emise lze snížit obtížně, avšak jejich podíl je obvykle malý [35].

5.3.4 Experimentálně stanovené EF NO_x vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF NO _x vyjádřené jako NO ₂ [g/GJ]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1		HU2		CU		BUK		BIO	ZP
automatický kotel	100	209	203	183	189	232	241	x	230	234	x
			214		180		226			231	
			210		181		229			225	
	60	174	175	x	x	x	x	x	x	x	
			170								
			176								
	30	134	128	x	x	x	x	x	x	x	
			137								
			137								
prohořivací kotel	100	71,8	71,8	x	146	150	65,8	68,3	x	x	
			132			146		64,3			
			132			141		64,8			
			83,2			152		64,8			
odhořivací kotel	100	95,0	90,6	x	137	122	67,8	66,8	x	x	
			99,4			118		71,8			
			105			x		86,5			87,4
			164								90,0
zplyňovací kotel	100	133	130	x	x	x	86,5	82,1	x	x	
			83,6					83,6			
			88,4								
krbová kamna	100	x	x	x	85,2	x	x	x	x		
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	x	14,7	
										-	
										-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

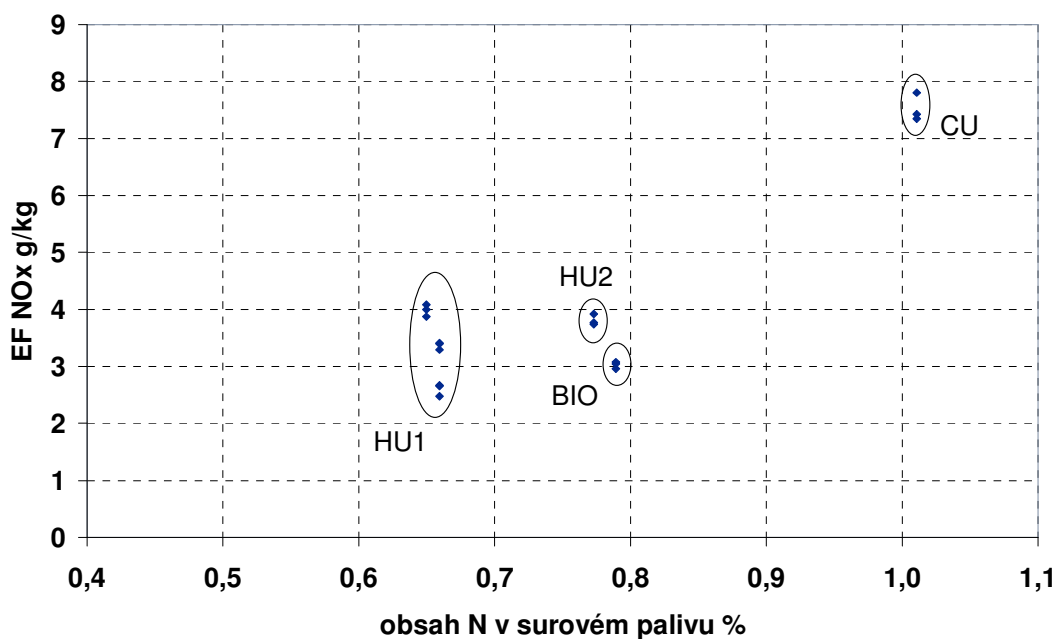
tab. č. 32

Stanovené EF NO_x vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ

5.3.4.1 Porovnání EF podle paliva

Dle tab. č. 32 byly při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF NO_x v rozsahu od 183 do 232 g/GJ. Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF NO_x v rozsahu

od 71,8 do 146 g/GJ. Při zkouškách na odhořívacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF NO_x v rozsahu od 67,8 do 137 g/GJ. Všechny tyto rozsahy jsou relativně nízké a jsou dány především rozdílným obsahem dusíku v palivu. S množstvím obsahu dusíku v palivu roste i obsah NO_x v emisích. Tento fakt demonstruje graf č. 19, ve kterém je na ose x vyneseno obsah dusíku v surovém palivu a na ose y EF NO_x vztažený na hmotnost surového paliva. Pro stanovení závislosti byly použity všechny experimenty provedené na automatickém kotli.



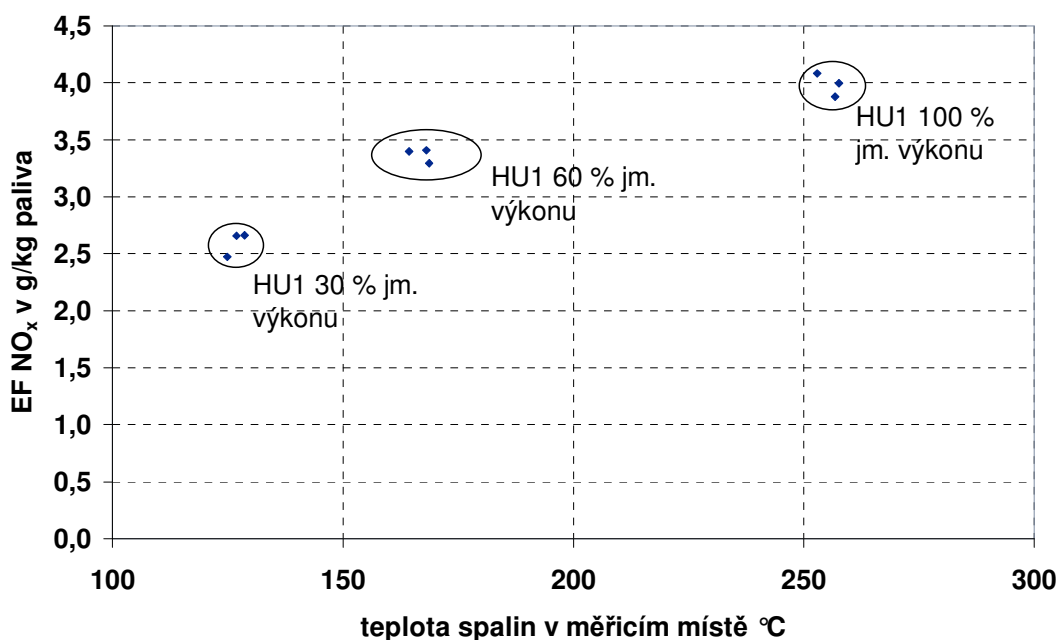
graf č. 19 Trend závislosti obsahu dusíku v palivu na EF NO_x (srovnání zkoušek provedených na automatickém kotli)

5.3.4.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

Dle tab. č. 32 bylo při zkouškách provedených při použití paliva HU1 ve spalovacích zařízeních stanoveny EF NO_x v rozsahu od 71,8 do 209 g/GJ. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF NO_x v rozsahu od 137 do 232 g/GJ. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF NO_x v rozsahu od 65,8 do 86,5 g/GJ. Všechny tyto rozsahy jsou relativně nízké. Nejnižší rozsah hodnot je pozorován na palivu BUK, to je pravděpodobně dáno skutečností, že na automatickém kotli nebyla zkouška s tímto palivem provedena. Automatický kotel vykazuje při všech porovnáních nejvyšší emise NO_x.

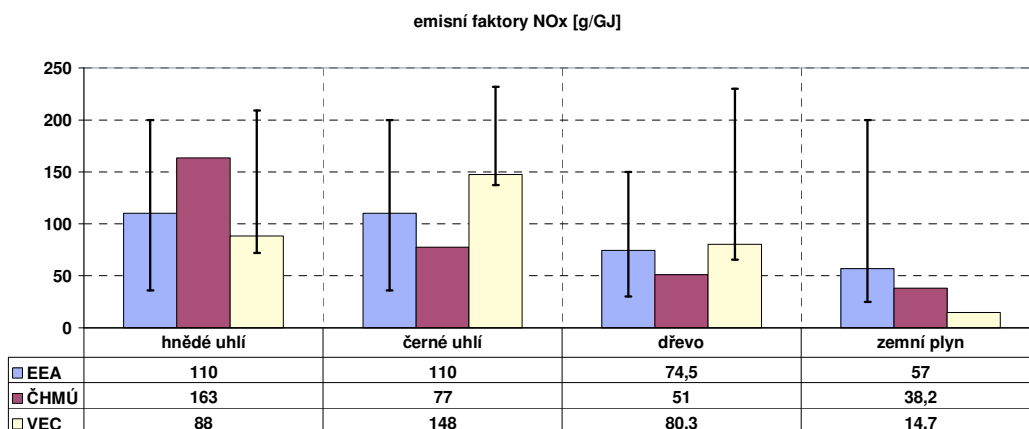
5.3.4.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF NO_x je možno v tab. č. 32 sledovat na automatickém kotli při spalování paliva HU1 a při provozu na jmenovitý a na dvou snížených výkonech kotle. Se snižujícím se výkonem klesají i emise oxidů dusíku. Tento vliv má patrně přímou souvislost s teplotou ve spalovací komoře viz. graf č. 20.



graf č. 20 Trend závislosti teploty spalin na EF NO_x (srovnání zkoušek provedených na automatickém kotli s palivem HU1)

5.3.5 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU

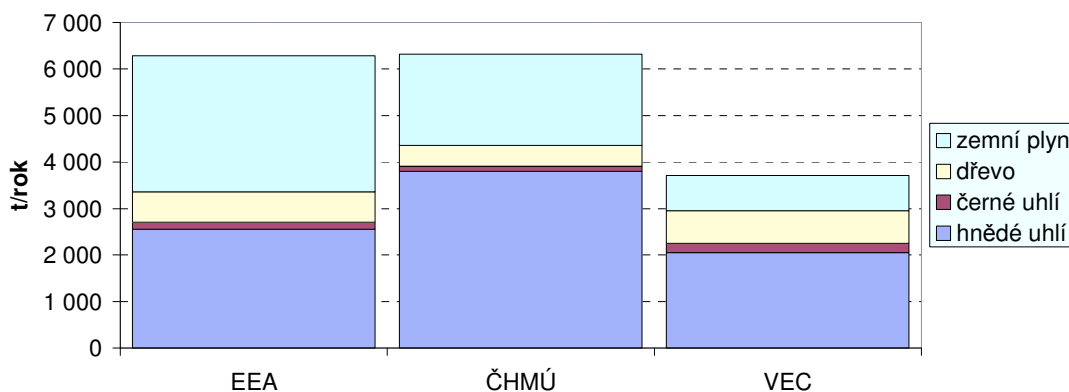


Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 21 Porovnání EF NO_x doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Z porovnání hodnot EF NO_x (viz. graf č. 21) vyplývá, že dle ČHMÚ jsou EF NO_x vyjádřené v g/GJ nejvyšší pro hnědé uhlí, nižší pro černé uhlí a nejnižší pro dřevo (emisní faktor pro dřevo používaný ČHMÚ byl vyhláškou č. 205/2009 Sb. výrazně snížen vůči předchozí používané legislativě, vyhláška č. 356/2002 Sb.). Doporučené EF dle EEA nerozlišují hnědé a černé uhlí, ale říkají že pro dřevo by měl být EF NO_x menší než pro fosilní paliva, což je v souladu s EF stanovenými VEC i s EF používanými ČHMÚ. Pro zemní plyn jsou nejvyšší EF dle EEA, EF ČHMÚ asi o 20 % nižší a hodnota stanovená na VEC je oproti EF EEA přibližně 5 krát nižší.

Nástin promítání uvedených EF NO_x do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 22. Z něj je patrné, že největší příspěvky do bilancí přináší hnědé uhlí a zemní plyn. Celkové množství emisí NO_x je při použití EF EEA a ČHMÚ podobné, při použití EF VEC je přibližně 60 %.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 22 Modelový odhad emisí NO_x z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

5.3.6 Diskuse a dílčí závěry

- U malých spalovacích zdrojů hraje podstatnou roli pro množství emisí NO_x množství dusíku v palivu, teplota spalin a také množství kyslíku ve spalovací komoře.
- Dle porovnání paliv je tedy zřejmé, že nejvyšší emise NO_x vykazuje palivo s nejvyšším obsahem dusíku.
- Dle porovnání spalovacích zařízení vykazuje nejvyšší emise NO_x automatický kotel.
- Dle porovnání provozu zařízení na různých výkonových hladinách byly nejvyšší emise NO_x pozorovány při jmenovitém výkonu kotle a se snižujícím se výkonem klesá i množství emisí NO_x. Tento fakt je úzce spjat s teplotou ve spalovací komoře.
- Užití EF EEA, ČHMÚ vede k podobným celkovým odhadům množství emisí z domácností v ČR. Při použití EF VEC je celkové množství přibližně o 40 % nižší.

5.4 Základní znečišťující látky - Oxid siřičitý (SO₂)

5.4.1 Základní charakteristika

Oxid siřičitý je bezbarvý, štiplavě páchnoucí, jedovatý plyn, který reaguje na povrchu různých tuhých suspendovaných částic. Plyn má hustotu při normálních podmínkách 2,72 kg/m³. Ve vodě se snadno rozpouští za vývoje tepla a vzniku kyseliny siřičité, patří tedy ke kyselinotvorným oxidům. Může být oxidován uvnitř vodních kapiček rozptýlených v ovzduší [45].

5.4.2 Rizika spojená s obsahem SO₂ v ovzduší

Působí dráždivě zejména na horní cesty dýchací, dostavuje se kašel, v těžších případech může vzniknout až edém plic. Menší koncentrace vyvolávají záněty průdušek a astma. Chronická expozice oxidu siřičitému negativně ovlivňuje krevtvorbu, způsobuje rozedmu plic, poškozují srdeční sval, negativně působí na menstruační cyklus.

Značně toxický je oxid siřičitý také pro rostliny, neboť reaguje s chlorofylem a narušuje tak fotosyntézu. V ovzduší pomalu oxiduje vzdušným kyslíkem a za přítomnosti vody tvoří kyselinu sírovou, která je jednou z příčin kyselých dešťů [35].

5.4.3 Mechanismus vzniku SO₂

Obsah SO₂ ve spalínách je při absenci odsiřovacího procesu závislý na obsahu síry v palivu. Technologie spalovacího procesu však může mít vliv na retenci síry do popele [30].

5.4.4 Experimentálně stanovené EF SO₂ vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF SO ₂ [g/GJ]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1			HU2		CU		BUK		BIO
automatický kotel	100	475	469	769	777	198	205	x	104	109	x
			476		749		200			104	
			479		781		189			99,6	
	60	470	481	x	x	x	x	x	x	x	
			460								
			469								
	30	461	452	x	x	x	x	x	x	x	
			469								
			462								
prohořivací kotel	100	356	356	x	287	357	114	114	x	x	
			333			256		111			
			356			247		117			
odhořivací kotel	100	404	457	x	253	260	105	134	x	x	
			409			245		90,4			
			400			426		91,0			
zplyňovací kotel	100	375	411	x	x	57,6	57,6	43,0	x	x	
			350					79,8			
			364					50,0			
krbová kamna	100	x	x	x	x	31,7	31,7	25,7	x	x	
								36,7			
								32,6			
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	x	5,50	
										-	
										-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 33

Stanovené EF SO₂ vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ

Hodnoty EF SO₂ při spalování paliva BUK a BIO mohou být potencionálně zkresleny v závislosti na možných interferencích těkavých organických polutantů na infračervený detektor SO₂.

5.4.4.1 Porovnání EF podle paliva

Dle tab. č. 33 byly při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF SO₂ v rozsahu od 104 do 769 g/GJ. Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF SO₂ v rozsahu od 114 do 356 g/GJ. Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF SO₂ v rozsahu od 105 do 404 g/GJ. Všechny tyto rozsahy jsou relativně nízké a jsou dány především rozdílným obsahem síry v palivu. S množstvím obsahu síry v palivu roste i obsah SO₂ v emisích.

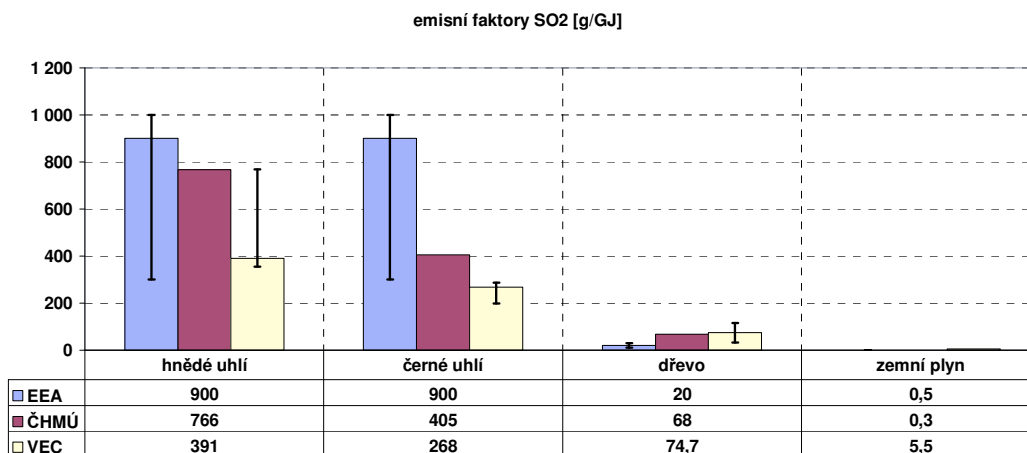
5.4.4.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

Vliv zařízení na velikost EF SO₂ je daný schopností konstrukce zařízení zadržet síru v popelu. Z naměřených dat není možno jednoznačně vysledovat zařízení, které je schopno síru nejlépe zadržet.

5.4.4.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Zde je nutno konstatovat, že vliv výkonu zařízení na velikost EF SO₂ nebyl pozorován.

5.4.5 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU



Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 23 Porovnání EF SO₂ doporučovaných dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Porovnání EF vztažených na energii v palivu (viz. graf č. 23) není pro vzájemné porovnání hodnot EEA, ČHMÚ a VEC nejvhodnější, protože předpokládají rozdílné obsahy síry v palivu. EEA předpokládá průměrný obsah síry kolem 1,2 %, ČHMÚ předpokládá obsah síry pro hnědé uhlí cca 0,75 %, pro černé uhlí 0,55 %. V experimentálních palivech bylo nalezeno v HU1 0,62 % síry, v HU2 0,91 %, v CU 0,67 %.

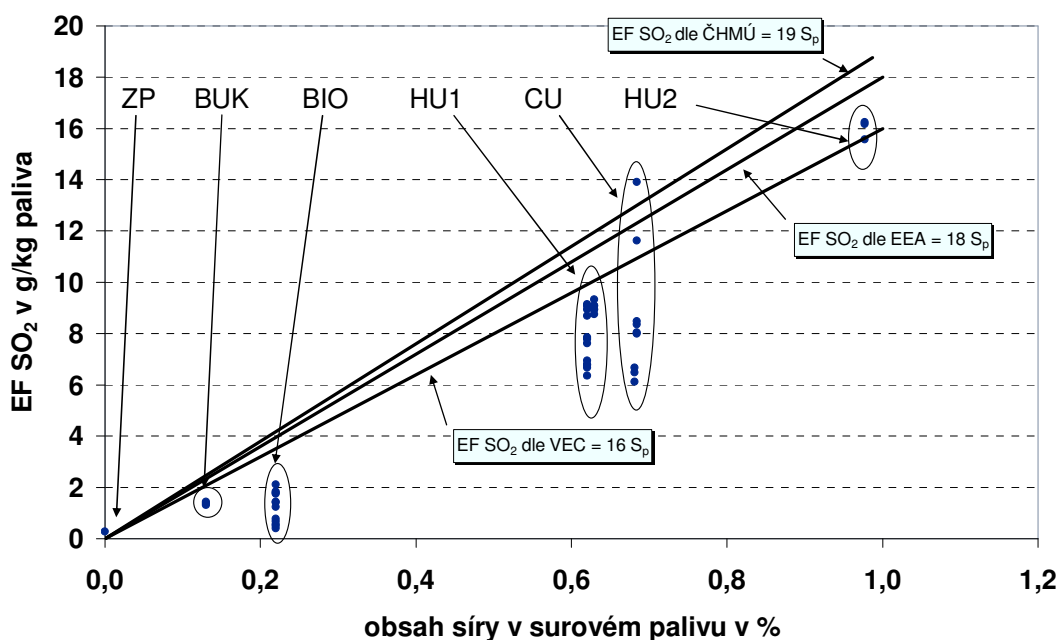
Vhodnější je spíše srovnání bilančních výpočtů emisí SO₂ v souvislosti s obsahem síry v palivu.

Spálením 1 kg síry vznikne 1,998 kg SO₂. Pokud je toto tvrzení převedeno na bilančního vztahu, tak při nulové retenci síry v popelu bude platit vztah **19,98** krát obsah síry v surovém palivu.

ČHMÚ předpokládá pro fosilní paliva hodnotu **19** krát obsah síry v surovém palivu v %, což odpovídá retenci síry do popela kolem 5 %.

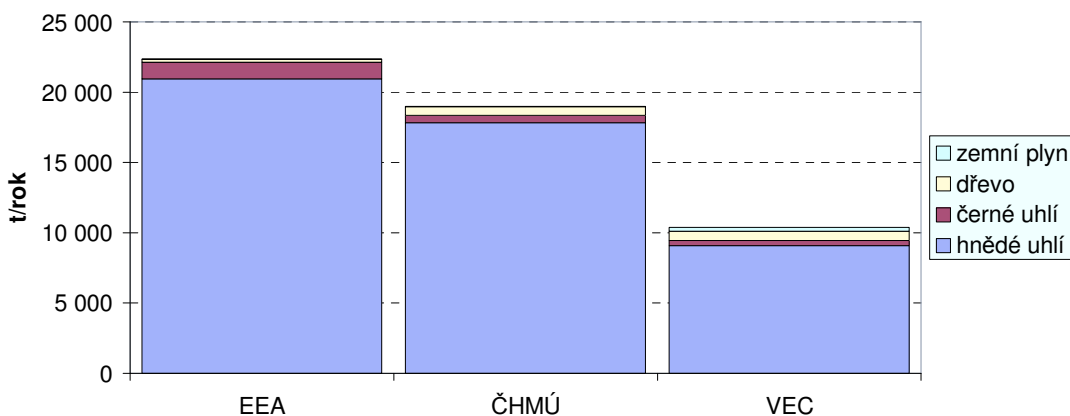
EF dle EEA předpokládá pro fosilní paliva průměrný obsah síry 1,2 %, průměrnou výhřevnost 24 MJ/kg a dále průměrnou retenci síry do popela okolo 10 %, což po přepočtu na EF vztažený na hmotnost paliva odpovídá hodnotě **18** krát obsah síry v surovém palivu v %.

Dle stanovených experimentálních dat VEC vyplývá, že EF je přibližně **16** krát obsah síry v palivu v %, což odpovídá retenci do popela přibližně 20 % (viz. graf č. 24).



graf č. 24 Trend závislosti obsahu síry v palivu na $EF SO_2$ (srovnání všech provedených experimentů)

Nástin promítání $EF SO_2$ (viz. graf č. 23) do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 25. Z něj je patrné, že největší příspěvek do bilancí přináší spalování hnědého uhlí. Celkové množství emisí SO_2 je při použití $EF EEA$ a $ČHMÚ$ přibližně podobné, při použití $EF VEC$ je oproti předchozím dvěma cca poloviční.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 25 Modelový odhad emisí SO_2 z domácností v ČR za rok 2006 při užití $EF EEA$, $ČHMÚ$ a VEC

5.4.6 Diskuse a dílčí závěry

- Množství emisí SO_2 je úzce spjato s obsahem síry v palivu.
- Použitou konstrukcí spalovacího zařízení lze částečně množství emisí SO_2 ovlivnit retencí síry v popelu.

- Vzájemné porovnání EF EEA, ČHMÚ a VEC ukázalo, že EF EEA počítají s retencí síry v popelu cca 10 %, EF ČHMÚ cca s retencí 5 % a experimenty VEC odhadují retenci kolem 20 %.

5.5 Základní znečišťující látky - Nemetanové těkavé organické látky (NMVOC)

5.5.1 Základní charakteristika

Nemetanové těkavé organické sloučeniny jsou těkavé chemické látky (mimo metan), které je možno definovat jako sloučeniny uhlíku s výjimkou CO, CO₂, H₂CO₃, karbidů kovů, uhličitánů kovů a uhličitanu amonného. Za těkavé látky označujeme takové látky, které vykazují tlak par vyšší než 133,3 Pa při 20°C, což zhruba odpovídá jejich teplotě varu pod 150°C. Jsou převážně bezbarvé, některé silně zapáchají (aromáty), jiné jsou bez zápachu. Látky NMVOC tvoří obecně následující chemické skupiny: alkoholy, aldehydy, alkany, aromáty, ketony a halogenované deriváty těchto látek. Některé jsou známé pod triviálními označeními „ředidla“, „rozpuštědla“ a pod [35].

5.5.2 Rizika spojená s obsahem NMVOC v ovzduší

Jedná se o širokou škálu různorodých látek. Proto jsou i jejich zdravotní dopady velmi různorodé. Můžeme zmínit jak negativní vlivy spojené s přímým působením na zdraví člověka a živočichů, tak další rizika spojená s dlouhodobějším vdechováním některých látek jako je podráždění smyslových orgánů, bolest hlavy, ztráta koordinace, poškození jater, ledvin nebo centrálního nervového systému [35].

5.5.3 Mechanismus vzniku NMVOC při spalovacím procesu

NMVOC jsou všechny meziprodukty při oxidaci paliva. Mohou se adsorbovat na tuhé částice, kondenzovat a tvořit částice [30]. Vznik NMVOC je stejně jako vznik CO závislý na kvalitě spalovacího procesu (nedostatek kyslíku, nízká teplota a krátká doba setrvání v reakční zóně). Tedy v případě malých spalovacích zařízení může být NMVOC obsažen ve spalínách ve značném množství. Dále může být množství NMVOC značně ovlivněno provozem zařízení na nízkých výkonech. Možnost omezení emisí NMVOC je dostupná cestou použití pokročilých technologií, které jsou obvykle charakterizovány lepší účinností spalovacího procesu [30].

5.5.4 Experimentálně stanovené EF NMVOC vztahžené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF NMVOC [g/GJ]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1		HU2		CU		BUK	BIO		ZP
automatický kotel	100	14,5	7,38	11,5	13,0	6,15	11,2	x	86,6	127	x
			29,5		13,6		4,61			71,2	
			6,76		7,92		2,59			61,6	
	60	18,7	33,0	x	x	x	x	x	x	x	
			12,4								
			10,8								
	30	44,5	58,6	x	x	x	x	x	x	x	
			34,5								
			40,5								
prohořivací kotel	100	2990	2990	x	1880	4740	892	x	x	899	
			867			356				819	
			833			543				956	
			910			697				1060	
odhořivací kotel	100	103	*nest	x	713	729	824	x	x	685	
			103			1930				730	
			2,05							217	
			9,01							678	
zplyňovací kotel	100	4,24	2,05	x	x	427	x	x	x	386	
			9,01							103	
			1,67							128	
										128	
krbová kamna	100	x	x	x	120	x	x	x	x		
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	0,503		
									-		
									-		

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 34 Stanovené EF NMVOC vztahžené na energii obsaženou v palivu G/GJ

5.5.4.1 Porovnání EF podle paliva

Dle tab. č. 34 byly při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF NMVOC v rozsahu od 6,15 do 86,6 g/GJ. Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF NMVOC v rozsahu od 892 do 2990 g/GJ. Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF NMVOC v rozsahu od 103 do 824 g/GJ. Všechny tyto rozsahy jsou značně široké, avšak dle předpokladu zde není možno nalézt konkrétní vliv paliva. Jde zde spíše o kombinaci vhodnosti spalovaného paliva pro danou konstrukci zařízení.

5.5.4.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

Dle tab. č. 34 byly při spalování paliva HU1 v různých spalovacích zařízeních stanoveny EF NMVOC v rozsahu od 4,24 do 2990 g/GJ. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF NMVOC v rozsahu od 6,15 do 1880 g/GJ. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF NMVOC v rozsahu od 120 do 892 g/GJ. Všechny tyto rozsahy jsou značně široké a opět zde platí, že kvalita spalovacího procesu je závislá na kombinaci vhodnosti spalovaného paliva pro danou konstrukci zařízení. Avšak na příkladu HU1, kde se stanovené hodnoty pohybovaly od jednotek do tisíců g/GJ je možno konstatovat, že vliv konstrukce zařízení je na množství emisí NMVOC dominantnější než typ spalovaného paliva.

Ve všech případech platí, že prohořivací a odhořivací konstrukce spalovacích zařízení (staré konstrukce) vykazují řádově horší emise NMVOC než automatické a zplyňovací konstrukce spalovacích zařízení (moderní konstrukce).

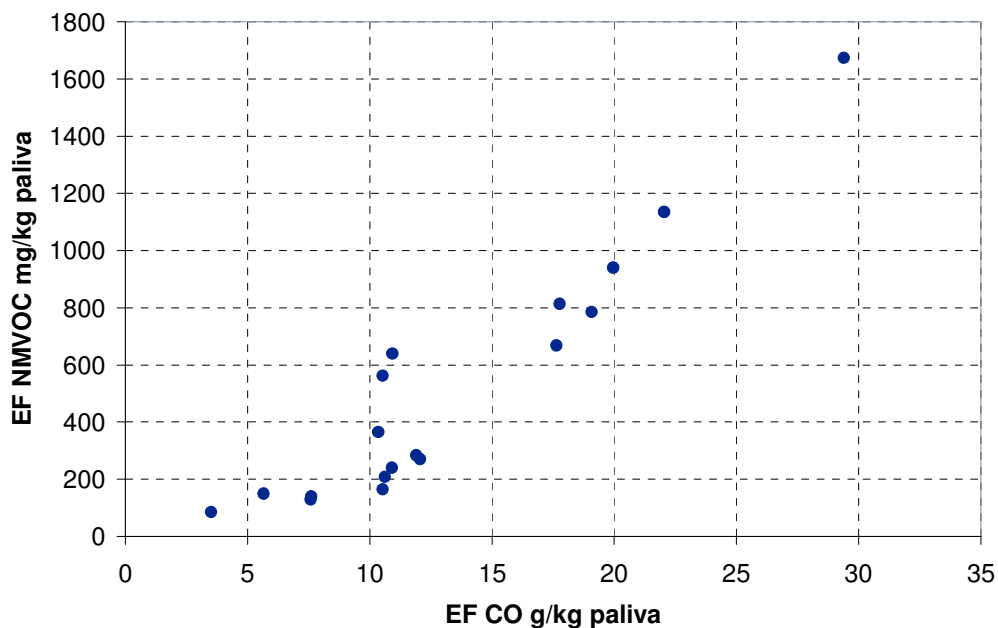
5.5.4.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF NMVOC je možno sledovat v tab. č. 34 na automatickém kotli při spalování paliva HU1 při provozu na jmenovitý výkon a na dvou

snížených výkonech kotle. Se snižujícím se výkonem roste množství emisí NMVOC v rozsahu od 14,5 g/GJ při jmenovitém výkonu do 44,5 g/GJ při 30 % jmenovitého výkonu. Tento vliv má přímou souvislost s klesající kvalitou spalovacího procesu.

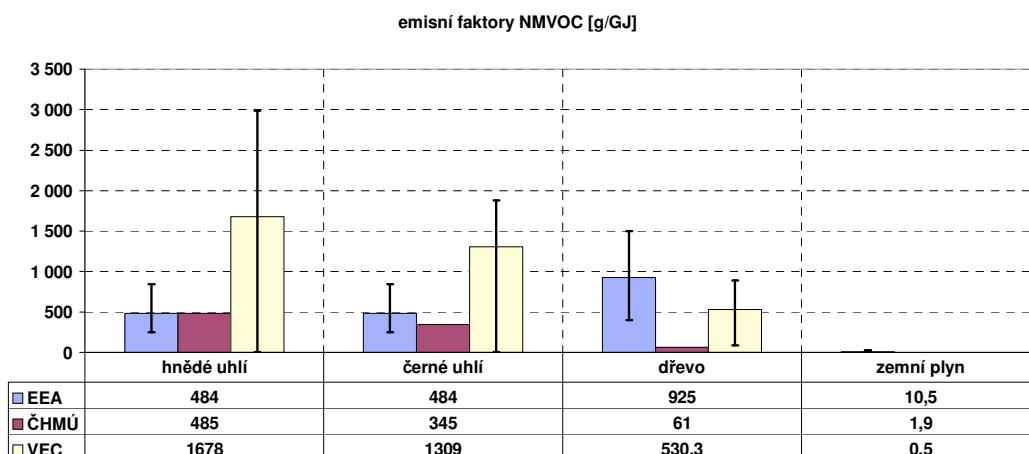
5.5.5 Vztah množství emisí CO a NMVOC

Stejně jako emise CO jsou také emise NMVOC úzce spjaty s kvalitou spalovacího procesu. Toto tvrzení lze snadno prokázat grafickou závislostí vynesemím emisí CO na osu x a emisí NMVOC osu y (viz. graf č. 26).



graf č. 26 Trend závislosti emisí CO na emisích NMVOC (data z experimentů na automatickém kotli)

5.5.6 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU



Legenda: viz. kapitola 5.1.2

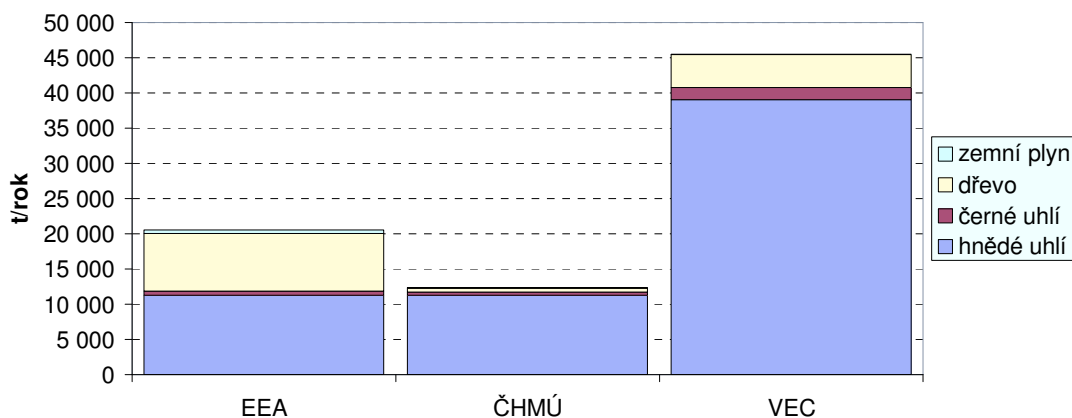
graf č. 27 Porovnání EF NMVOC doporučených EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Pro fosilní paliva jsou EF EEA a ČHMÚ přibližně podobné avšak EF VEC jsou přibližně trojnásobné, přičemž rozdíly mezi naměřenými hodnotami jsou značné (viz. graf č. 27).

Pro dřevo navrhuje EEA EF přibližně 10 krát větší než ČHMÚ. Dle experimentálních dat VEC je hodnota EF přibližně v aritmetickém průměru mezi EEA a ČHMÚ.

Ze Srovnání experimentálních dat EF VEC pro různá paliva je patrné, že nejvyšší EF NMVOC je pro hnědé uhlí, nižší je pro černé uhlí a nejnižší je pro dřevo.

Nástin promítání uvedených EF NMVOC do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 28. Z něj je patrné, že největší příspěvek do bilancí přináší spalování hnědé uhlí a dřeva. Celkové množství emisí NMVOC je při použití EF EEA a ČHMÚ výrazně nižší než při použití EF VEC. Bilance stanovená z EF ČHMÚ postrádá příspěvek emisí NMVOC ze spalování dřeva.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 28 Modelový odhad emisí NMVOC z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

5.5.7 Porovnání naměřených koncentrací NMVOC s normou ČSN EN 303-5

Mezní hodnoty emisí pro kotle do 50 kW
v $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2

Dodávka paliva	Palivo	OCG		
		třída 1	třída 2	třída 3
ruční	biologické	2 000	300	150
	fosilní			
samočinná	biologické	1 750	200	100
	fosilní			

tab. č. 35 Limitní koncentrace NMVOC dle normy, ČSN EN 303-5

konstrukce zařízení	% jm. výkon	palivo						
		HU1	HU2	CU	BUK	BIO	ZP	
automatický kotel	100	31,8	25,7	13,8	x	187	x	
		16,1	28,9	25,2		275		
		64,4	30,4	10,3		154		
	60	41,0	x	x	x	x	x	
		72,3						
		27,1						
	30	97,4	x	x	x	x	x	
		23,6						
		128						
prohořivací kotel	100	6530	x	4100	2030	x	x	
		1890		10300	2050			
		1820		777	1870			
		1990		1190	2180			
odhořivací kotel	100	225	x	1560	1880	x	x	
		1990		1520	2410			
		225		1590	1560			
zplyňovací kotel	100	9,27	x	x	973	x	x	
		4,48			494			
		19,7			1550			
		3,64			880			
krbová kamna	100	x	x	x	273	x	x	
					235			
					293			
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	1,11	
							-	
							-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 36 Naměřené koncentrace NMVOC $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2

- Automatický kotel splňuje třídu 3 ($< 100 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) pro HU1, HU2 a CU. Pro palivo BIO splňuje třídu 2 ($< 300 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$). Výrobce uvádí, že kotel splňuje požadavky normy ČSN EN 303-5 třída 3, což je v souladu s naměřenými hodnotami pro HU1, HU2 a CU. V nesouladu pro palivo BIO, ale toto palivo není doporučeným palivem pro použitý kotel.
- Prohořivací kotel nedosahuje ani emisních limitů na třídu 1 ($< 2000 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) pro žádné zkoušené palivo. Výrobce uvádí, že kotel splňuje požadavky normy ČSN EN 303-5 třída 1, což je v souladu s naměřenými hodnotami pro všechna zkoušená paliva.
- Odhořivací kotel splňuje emisní limity pro třídu 2 ($< 300 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) pro palivo HU1 pro paliva BUK a CU splňuje třídu 1 ($< 2000 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$). Výrobce uvádí, že kotel splňuje požadavky normy ČSN EN 303-5 třída 2, což je v souladu pro palivo HU1, ale není v souladu s naměřenými hodnotami pro paliva CU a BUK.
- Zplyňovací kotel splňuje emisní limity pro třídu 3 ($< 150 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) pro palivo HU1 a pro palivo BUK splňuje limity pouze pro třídu 1 ($< 150 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$). Výrobce uvádí, že kotel splňuje požadavky normy ČSN EN 303-5 třída 3, což je v souladu s naměřenými hodnotami pro palivo HU1. Ale není v souladu pro palivo BUK, které však pro použitý kotel není doporučeným palivem.

5.5.8 Diskuse a dílčí závěry

- Emise NMVOC jsou stejně jako emise CO úzce spjaty s kvalitou spalovacího procesu.
- Na množství emisí NMVOC není možno nalézt konkrétní vliv paliva. Jde zde spíše o kombinaci vhodnosti spalovaného paliva pro danou konstrukci zařízení.
- Vliv konstrukce zařízení na množství emisí NMVOC je mnohem dominantnější než vliv typu spalovaného paliva.
- Prohořivací a odhořivací konstrukce spalovacích zařízení (zařízení starých konstrukcí) vykazují řádově horší emise NMVOC než automatické a zplyňovací konstrukce spalovacích zařízení (zařízení moderních konstrukcí).

- Z výsledků zkoušek na automatickém kotli je možno konstatovat, že za podobných podmínek je množství emisí CO a NMVOC přímo úměrné.
- NMVOC jsou jedním ze sledovaných parametrů nejen podle ČSN EN 303-5, ale také dle nového připravovaného zákona o ovzduší a programu „Zelená úsporám“ při uvádění nových spalovacích zařízení na trh. Tím se nejen vyvíjí značný tlak na výrobce spalovacích zařízení, ale také přispívá ke zlepšení kvality spalovacího procesu v zařízeních malých výkonů, což povede k pozoruhodnému zlepšení množství emisí spojených s kvalitou spalovacího procesu.
- Užití EF EEA a ČHMÚ vede k podobným celkovým odhadům množství emisí NMVOC z domácnosti v ČR. Při použití EF VEC je toto množství emisí dramaticky vyšší.

5.6 Tuhé znečišťující látky (TZL)

5.6.1 Základní charakteristika

Tuhé znečišťující látky jsou všude přítomnou složkou atmosféry Země. Jsou definovány jako soubor tuhých, kapalných nebo směsných částic o velikosti v rozsahu 1 nm – 100 μm. Významně se podílí na důležitých atmosférických dějích, jako je vznik srážek a teplotní bilance Země. Z hlediska zdravotního působení atmosférického aerosolu na člověka byly definovány velikostní skupiny aerosolu označované jako PM_x (z anglického Particulate Matter), které obsahují částice o velikosti menší než x μm. Běžně se rozlišují celkové tuhé částice (TZL), PM₁₀ a PM_{2,5} [35].

5.6.2 Rizika spojená s obsahem TZL v ovzduší

Částice atmosférického aerosolu se usazují v dýchacích cestách živočichů. Místo zachytu závisí na velikosti částic. Větší částice se zachycují na chloupkách v nose a nezpůsobují větší potíže. Částice menší než 10 μm (PM₁₀) se mohou usazovat v průduškách a způsobovat zdravotní problémy. Částice menší než 1 μm mohou vstupovat přímo do plicních sklípků, proto jsou tyto částice nejnebezpečnější. Částice navíc často obsahují adsorbované karcinogenní sloučeniny.

Inhalace PM₁₀ poškozuje hlavně kardiovaskulární a plicní systém. Dlouhodobá expozice snižuje délku dožití a zvyšuje kojeneckou úmrtnost. Může způsobovat chronickou bronchitidu a chronické plicní choroby. Toxicky působí chemické látky obsažené v aerosolu (sířany, amonné ionty...). V důsledku adsorpce organických látek s mutagenními a karcinogenními účinky může expozice PM₁₀ způsobovat rakovinu plic [35].

5.6.3 Mechanismus vzniku tuhých látek

TZL, PM₁₀ a PM_{2,5} jsou částice diferencované podle velikosti zrn obsažených ve spalinách, vznikajících při spalování zejména pevných fosilních paliv a biomasy. Mohou být definovány jako uhlík, kouř, saze, popílek (pevné nespalitelné látky obsažené v palivu). Emitované částice lze rozdělit do dvou skupin produktů:

- První skupina je formována v prvních fázích po přiložení paliva tj. při sušení a hoření prchavé hořlaviny v důsledku nedokonalého spalování paliv. Je tvořena především sazemi a organickými látkami, z plynných prekurzorů přes krystalizační a kondenzační

procesy. Stejně jako produkty alifatických, aromatických radikálových reakcí v zóně hořících plynů v přítomnosti vodíkových a kyslíkatých sloučenin [30].

- Druhá skupina je tvořena částicemi popela uvolňujícího se ve fázích hoření fixního uhlíku. Tyto látky jsou tvořeny minerálními složkami obsaženými v palivu. Tyto minerální látky jsou tvořeny z oxidů a solí (S, Cl) Ca, Mg, Si, Fe, K, Na, P, těžkých kovů a nespáleného uhlíku [30].

5.6.4 Experimentálně stanovené EF TZL vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF TZL [g/GJ]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1			HU2		CU		BUK		BIO
automatický kotel	100	46,6	44,0	36,0	36,3	53,8	61,0	x	86,9	88,3	x
			51,8		36,6		55,1			88,8	
			44,1		35,2		45,4			83,7	
	60	24,6	24,6	x	x	x	x	x	x	x	
			23,9								
			25,2								
30	34,7	38,9	x	x	x	x	x	x	x		
		31,8									
		33,5									
prohořivací kotel	100	1990	1990	x	274	439	99,6	106	x	x	
			511			140		96,5			
			549			244		95,8			
odhořivací kotel	100	256	174	x	240	219	95,2	96,8	x	x	
			290			260		92,1			
			223			511		96,8			
zplyňovací kotel	100	16,8	14,5	x	x	58,4	48,6	x	x	x	
			20,0								77,0
			16,0								49,5
krbová kamna	100	x	x	x	x	43,8	37,8	x	x	x	
							44,2				
							49,5				
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	0,482	0,482	
										-	
										-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 37

Stanovené EF TZL vztažené na energii obsaženou v palivu G/GJ

V rámci experimentů použitých pro tuto dizertační práci byly stanovovány pouze celkové emise TZL. Nicméně podle nízkých rychlostí spalin v komíně je možno usuzovat, že výrazné množství celkových TZL bude spadat také do kategorie PM₁₀.

5.6.4.1 Porovnání EF podle paliva

Dle tab. č. 37 byly při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF TZL v rozsahu od 36,0 do 86,9 g/GJ. Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF TZL v rozsahu od 99,6 do 1990 g/GJ. Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF TZL v rozsahu od 95,2 do 256 g/GJ. Teoreticky by měl mít obsah popela v palivu roli při tvorbě emisí TZL. Tento vliv se však nemohl projevit, protože množství tuhých látek formovaných v důsledku nedokonalého spalování tuhých paliv daleko převýšil potenciální úlet popeloviny z paliva. Z těchto důvodů nelze jednoznačně označit některé palivo nálepkou horší nebo lepší z hlediska tvorby emisí TZL.

5.6.4.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

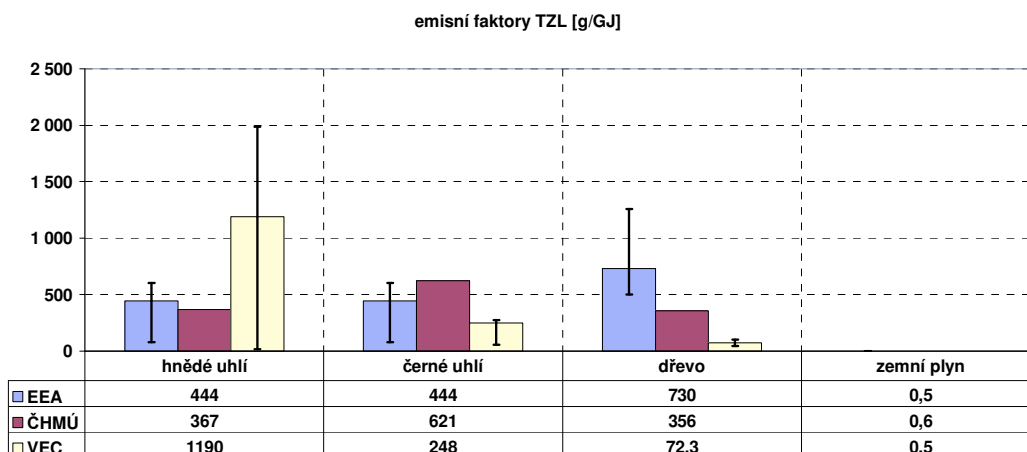
Dle tab. č. 37 byly při zkouškách provedených při použití paliva HU1 na různých spalovacích zařízeních stanoveny EF TZL v rozsahu od 16,8 do 1990 g/GJ. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF TZL v rozsahu od 53,8 do 274 g/GJ. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF TZL

v rozsahu od 43,8 do 99,6 g/GJ. Ze všech těchto porovnání vycházejí podle očekávání hůře starší konstrukce spalovacích zařízení (prohořivací a odhořivací) oproti novým konstrukcím spalovacích zařízení (zplyňovací a automatické kotle). Tento trend opět naznačuje dominantnější vliv konstrukce spalovacího zařízení oproti vlastnostem paliva, neboť (jak již bylo řečeno v předešlém odstavci) množství tuhých látek formovaných v důsledku nedokonalého spalování tuhých paliv daleko převýšil potenciační úlet popeloviny z paliva.

5.6.4.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF TZL je možno v tab. č. 37 sledovat na automatické kotli při spalování paliva HU1 a při provozu na jmenovitý a na dvou snížených výkonech kotle. Z naměřených výsledků nelze vypožorovat žádný trend, neboť nejnižší hodnota EF TZL byla naměřena při 60 % výkonu kotle, střední při 30 % a nejvyšší při 100 % výkonu kotle.

5.6.5 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU

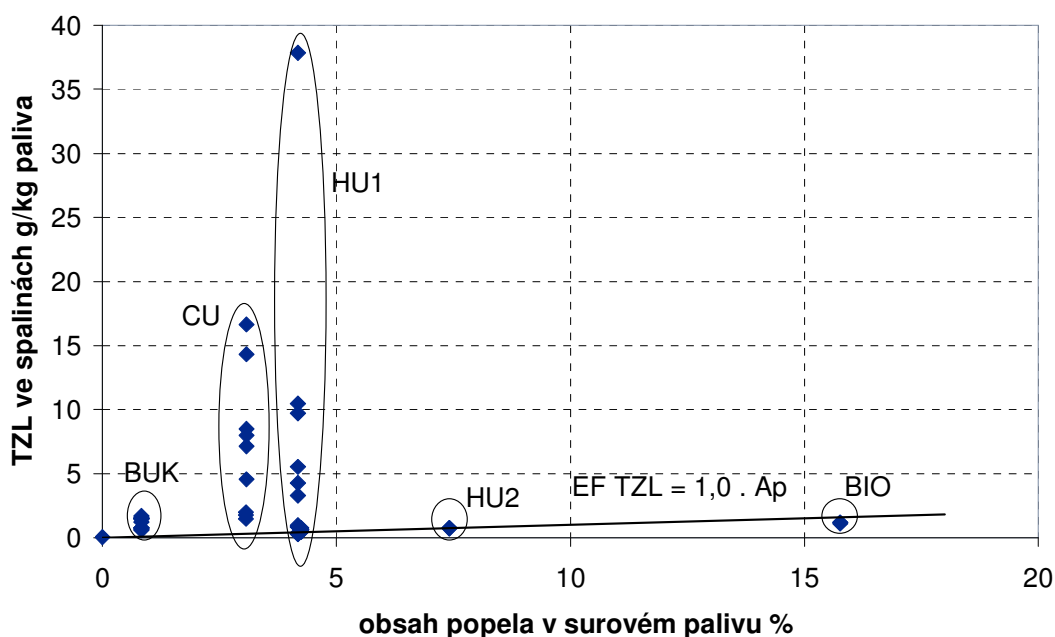


Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 29 Porovnání EF TZL doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

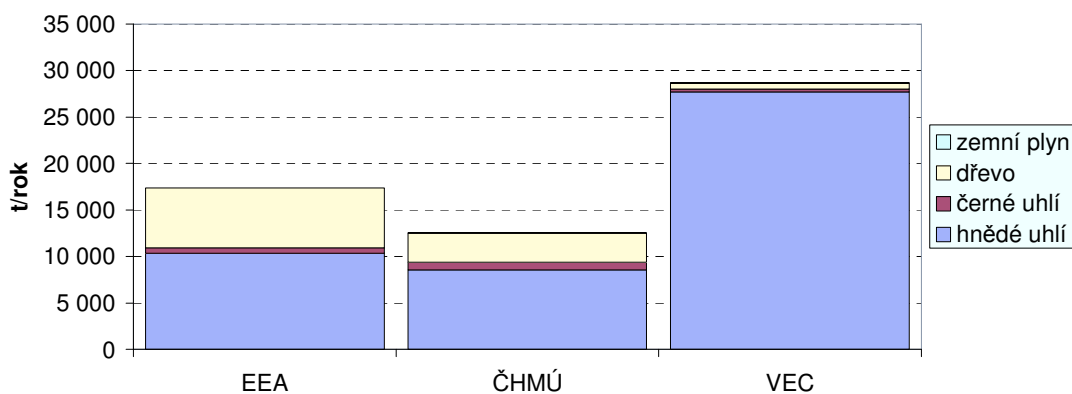
EF TZL pro fosilní paliva jsou dle EEA a ČHMÚ přibližně podobné. Pro dřevo je již EF dle EEA přibližně dvojnásobný oproti EF ČHMÚ. EF TZL experimentálně stanovený VEC pro hnědé uhlí je přibližně 3 krát větší než EF EEA a ČHMÚ. Pro černé uhlí je EF VEC oproti EF EEA a ČHMÚ poloviční. A pro dřevo je EF TZL oproti EF EEA asi 10 krát menší a proti EF ČHMÚ přibližně 5 krát menší.

Dle EF TZL používaných ČHMÚ je obsah TZL pro fosilní paliva závislý na obsahu popeloviny v palivu. EF TZL vztažené na hmotnost paliva deklarují, že 10 % popeloviny v palivu přechází v emisích do ovzduší ve formě TZL (viz. graf č. 30). Dle naměřených experimentálních dat bylo zjištěno, že daleko větší vliv má na tvorbu emisí TZL kvalita spalovacího procesu než obsah popeloviny v palivu. Tento jev byl nejpatrnější při zkoušce na prohořivacím kotli při spalování paliva HU1. Podmínky zkoušky názorně ilustruje obr. č. 11, obr. č. 12 a obr. č. 13.



graf č. 30 Trend závislosti obsahu popela v palivu na EF TZL (srovnání všech provedených experimentů)

Nástin promítání uvedených EF TZL do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 31. Z něj je patrné, že největší příspěvek do bilancí přináší spalování hnědého uhlí. Při použití EF VEC je příspěvek dřeva oproti ostatním relativně nízký, to je především dáno nízkými měřeními emisí TZL na nejpočetněji zastoupených spalovacích zařízeních v ČR. Naopak vysoký příspěvek emisí TZL při spalování hnědého uhlí je dán velmi vysokým množstvím emisí TZL při použití hnědého uhlí v odhořivacích konstrukcích kotlů, které jsou podle odhadů nejčastěji používaným spalovacím zařízením v ČR pro hnědé uhlí.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 31 Modelový odhad emisí TZL z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

5.6.6 Porovnání výsledků s normou ČSN EN 303-5

Mezní hodnoty emisí pro kotle do 50 kW
v $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2

Dodávka paliva	Palivo	prach		
		třída 1	třída 2	třída 3
ruční	biologické	200	180	150
	fosilní	180	150	125
samočinná	biologické	200	180	150
	fosilní	180	150	125

tab. č. 38 Limitní koncentrace TZL dle normy, ČSN EN 303-5

konstrukce zařízení	% jm. výkon	palivo												
		HU1		HU2		CU		BUK		BIO		ZP		
automatický kotel	100	102	96,1	80,4	81,1	121	137	x	188	191	x			
			113				81,7					124		192
			96,4				78,6					102		181
	60	53,8	54,0	x	x	x	x	x	x	x				
			52,2											
			55,1											
	30	76,1	85,1	x	x	x	x	x	x	x				
			69,7											
			73,4											
prohořivací kotel	100	4340	x	599	959	227	243	x	x					
					1120					306		220		
					1200					534		218		
odhořivací kotel	100	560	x	523	478	217	221	x	x					
					633					568		210		
					487					1120		221		
zplyňovací kotel	100	36,7	x	x	x	133	111	x	x					
							31,7				175		113	
							43,6				86,2		101	
krbová kamna	100	x	x	x	x	99,9	113	x	x					
											101		113	
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	1,07	-				

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 39 Naměřené koncentrace TZL $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2

- automatický kotel splňuje třídu 3 ($< 150 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro biomasu popř. $< 125 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro fosilní paliva) pro paliva HU1, HU2 a CU. Pro palivo BIO splňuje třídu 1 ($< 200 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro biomasu popř. $< 180 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro fosilní paliva). Výrobce uvádí, že kotel splňuje požadavky normy ČSN EN 303-5 třída 3, což je pro TZL v souladu s naměřenými hodnotami pro HU1, HU2 a CU. V nesouladu pro palivo BIO, ale toto palivo není doporučeným palivem pro použitý kotel.
- Prohořivací kotel nedosahuje emisních limitů ani na třídu 1 ($< 200 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro biomasu popř. $< 180 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro fosilní paliva) pro žádné zkoušené palivo.
- Odhořivací kotel také nedosahuje emisních limitů ani na třídu 1 ($< 200 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro biomasu popř. $< 180 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro fosilní paliva) pro žádné zkoušené palivo.
- Zplyňovací kotel splňuje třídu 3 ($< 150 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro biomasu popř. $< 125 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro fosilní paliva) pro palivo HU1 a pro palivo BUK splňuje třídu 2 ($< 180 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro biomasu popř. $< 150 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ pro fosilní paliva).

5.6.7 Diskuse a dílčí závěry

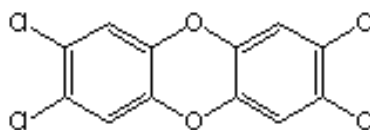
- Vliv konstrukce zařízení na množství emisí TZL je dominantnější než vliv typu spalovaného paliva.

- Prohořivací a odhořivací konstrukce spalovacích zařízení (zařízení starých konstrukcí) vykazují řádově horší emise TZL než automatické a zplyňovací konstrukce spalovacích zařízení (zařízení moderních konstrukcí).
- TZL jsou jedním ze sledovaných parametrů nejen podle ČSN EN 303-5, ale také dle nového připravovaného zákona o ovzduší a programu „Zelená úsporám“ při uvádění nových spalovacích zařízení na trh. Tím se nejen vyvíjí značný tlak na výrobce spalovacích zařízení, ale také přispívá ke zlepšení kvality spalovacího procesu v zařízeních malých výkonů, což povede k pozoruhodnému zlepšení množství emisí spojených s kvalitou spalovacího procesu.
- Dle EF používaných ČHMÚ je množství emisí TZL závislé na obsahu popele v palivu. Tento předpoklad nebyl naměřenými experimentálními daty potvrzen, protože množství TZL formovaných v důsledku nedokonalého spalování tuhých paliv daleko převýšil potencionální úlet popeloviny z paliva.
- Užití EF VEC vede nejvyšším celkovým odhadům množství emisí TZL z domácností v ČR. Při použití EF EEA je toto množství emisí přibližně poloviční a při užití EF ČHMÚ je množství emisí nejnižší.

5.7 Perzistentní organické polutanty (POP) - Dioxiny a furany (PCDD/F)

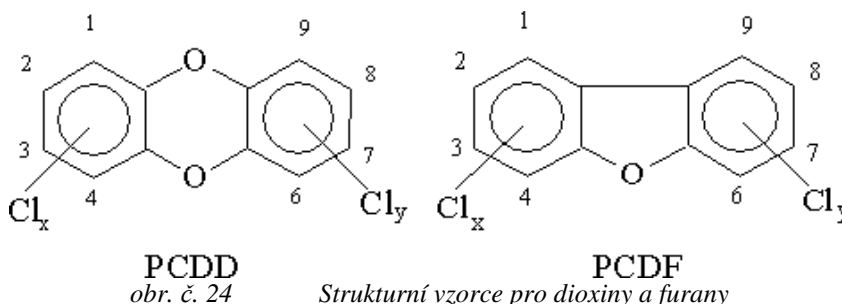
5.7.1 Základní charakteristika

Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany jsou chemické sloučeniny obsahující ve svých molekulách atomy uhlíku, vodíku, kyslíku a chloru. Je možné identifikovat stovky různých struktur těchto látek. Některé z nich jsou vysoce toxické již při nízkých koncentracích. Nejdůležitější látkou této široké skupiny je 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-p-dioxin označovaný zkráceně 2,3,7,8-TCDD. Jedná se o jednu z nejnebezpečnějších chemických látek vůbec. Jeho strukturální vzorec ukazuje obr. č. 23 a obr. č. 24. Je to bílá krystalická látka o molekulové hmotnosti 321,97 g/mol, jejíž teplota varu je 500°C a tání 295°C. Rozpustnost ve vodě činí 0,2 µg/l. Jedná se o látku rozpustnou v organických rozpouštědlech patřících do skupiny těkavých organických látek (VOC). PCDD a PCDF zařazujeme také do kategorie perzistentních organických polutantů (POP) [35].



obr. č. 23

Strukturální vzorec 2,3,7,8-tetrachlordibenzodioxinu



PCDD

obr. č. 24

PCDF

Strukturální vzorce pro dioxiny a furany

5.7.2 Vyjadřování PCDD/F

Pro vyjádření množství PCDD/F je užíván systém ekvivalentu toxicity (TEQ) používá 2,3,7,8,-TCDD jako standardu, k němuž se vztahuje toxicita ostatních sloučenin pomocí ekvivalentů toxicity. Tento postup vychází z předpokladu, že PCDD/F a látky podobné dioxinům působí na prostředí stejnými mechanismy jako zvolený standard. Tyto toxické vlivy se posuzují na základě studií subchronické toxicity a některých biochemických vlastností těchto látek. Toxický potenciál určitého kongeneru je určen pomocí faktoru ekvivalentu toxicity (TEF), který popisuje individuální toxicitu daného kongeneru vztahenou k toxicitě 2,3,7,8,-TCDD. Při výpočtu TEQ se obsah každého z kongeneru vynásobí příslušnou hodnotou TEF. Vyjádří-li se obsah všech kongenerů pomocí ekvivalentů 2,3,7,8,-TCDD, lze je snadno sečíst a výsledná hodnota TEQ pak představuje celkovou toxicitu dané směsi. Přestože stále přetrvává určitá nejistota ohledně toxicity PCDD/F, byla sestavena tabulka (tab. č. 40) mezinárodních faktorů ekvivalentu toxicity (I-TEF). Všechny ostatní neuvedené kongenery PCDD/F mají nulovou hodnotu TEQ [12].

seznam 17ti sledovaných kongenerů PCDD/F	faktor I-TEF
2,3,7,8-tetrachlordibenzodioxin (TCDD)	1
1,2,3,7,8-pentachlordibenzodioxin (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8-hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9-hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,6,7,8-hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8-heptachlordibenzodioxin (HpCDD)	0,01
oktachlordibenzodioxin (OCDD)	0,001
2,3,7,8-tetrachlordibenzofuran (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8-pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8-pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8-hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,7,8,9-hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,6,7,8-hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
2,3,4,6,7,8-hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,4,6,7,8-heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
1,2,3,4,7,8,9-heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
oktachlordibenzofuran (OCDF)	0,001

tab. č. 40 Mezinárodní faktory ekvivalentů toxicity PCDD/F

5.7.3 Rizika spojená s obsahem PCDD/F v ovzduší

Jedná se o skupinu velice nebezpečných látek pro životní prostředí, život organismů i zdraví člověka.

V případě, kdy se PCDD nebo PCDF dostanou do životního prostředí, mohou zde existovat jak v plynné fázi, tak adsorbované na malých částicích. Dále se mohou ukládat do zemin a na vegetaci. Vzhledem k tomu, že se v naprosté většině případů jedná o látky ve vodě téměř nerozpustné, jsou dioxiny vázané v půdě velice odolné proti vymývání a dalšímu transportu. V půdách a sedimentech degradují velice pomalu a mohou zde setrvávat po velmi dlouhou dobu. Značné riziko představuje spad dioxinů z ovzduší na vegetaci, především na krmné traviny. Zde přítomné dioxiny jsou následně požitý dobyt看kem, a tím vneseny do potravního řetězce. Jedná se potom o kontaminace masa a mléka konzumovaného člověkem. Dioxiny se také usazují v sedimentech na dně vodních

ploch a potravním řetězcem se dostávají až k velkým rybám konzumovaným člověkem [35].

U pokusných zvířat exponovaných dioxiny byla pozorována celá řada toxikologických projevů. Od poruch růstu, poškození imunitního systému, zvýšeného výskytu onemocnění rakovinou až po poškození reprodukčních funkcí.

Jak již bylo zmíněno, dioxiny jsou velmi stabilní látky, odolávající degradaci po velmi dlouhou dobu. Proto mohou být v ovzduší transportovány na velmi dlouhé vzdálenosti v řádech tisíců kilometrů od místa jejich vzniku. Procesy v atmosféře přispívají k jejich transportu z teplejších oblastí planety do oblastí s nízkými teplotami, jako je Arktida, kde byly stopy těchto nebezpečných látek nalezeny v místních živočiších. Vzhledem k těmto vlastnostem představují i velmi malá množství dioxinů vypuštěná do životního prostředí značné nebezpečí pro globální ekosystém [35].

Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany jsou obecně látky velmi nebezpečné pro zdraví člověka. Do organismu mohou být vdechnuty nebo požitý s kontaminovanými potravinami. Nebezpečí těchto látek spočívá v tom, že jsou nebezpečné i ve stopových koncentracích. Konkrétní ohrožení zdraví člověka se projevuje nevolností, bolestí hlavy, zvracením, poškozením jater, podrážděním kůže a očí. Mezi mnohem závažnější rizika však patří extrémní zvýšení pravděpodobnosti onemocnění rakovinou a riziko poškození zdravého vývoje plodu. Konkrétně 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-p-dioxin je považován za vůbec nejtoxičtější člověkem připravenou látku s extrémně nízkou smrtelnou dávkou.

Je ale nutné zdůraznit, že běžně se vyskytující koncentrace dioxinů v životním prostředí jsou tak nízké, že nehrozí bezprostřední akutní ohrožení lidského zdraví [35].

5.7.4 Mechanismus vzniku PCDD/F

PCDD/F se tvoří ve stopových množstvích ve spalovacích procesech. Množství emisí dioxinů a furanů je vysoce závislé na podmínkách, za kterých probíhá ochlazování plyných produktů spalování a na množství k reakcím dostupného uhlíku, chloru, katalyzátorů a kyslíku, jež jsou nezbytnými pro tvorbu PCDD/F [30]. K formování dochází prostřednictvím dvou základních mechanismů:

- Takzvaná de novo syntéza, v níž PCDD / PCDF jsou tvořeny z neextrahovatelných uhlíkatých (C) struktur, které jsou zásadně odlišné od konečných produktů (PCDD/F) [6].
- Prekurzory formování/reakcí přes arylové struktury odvozené buď z nedokonalé aromatické oxidace nebo cyklizace (tvorba kruhové struktury) uhlovodíkových fragmentů [6].

Mechanismy spojené se syntézou PCDD/F mohou být homogenní (Všechny molekuly reagují v plynné fázi, nebo všechny v pevné fázi) nebo heterogenní (reakce se uskutečňuje mezi molekulami plynné fáze a povrchu pevné látky) [6].

PCDD/F mohou být rozloženy při spalování v dostatečných teplotách s odpovídající dobou zdržení a míchání ve spalovací (reakční) zóně. K dobré spalovací praxi patří přítomnost tzv. "3 T" - teplota, turbulence a time (doba zdržení). Rychlé ochlazení spalin po ukončení spalovacího procesu je nezbytné k zabránění reformování PCDD/F [6].

Faktory ovlivňující tvorbu PCDD/F při spalovacích procesech [6]:

Technologie: K formaci PCDD/F může dojít buď špatným spalováním nebo při pomalém ochlazování vzniklých odpadních plynů.

Teplota: K formaci PCDD/F dochází v zónách po ukončení spalovacího procesu. K reformacím dochází obecně při teplotách v rozmezí 200 až 650 °C. K intenzivnějším reformacím dochází v rozmezí teplot 200 až 450 °C. K nejintenzivnějším reformacím dochází při teplotách kolem 300°C.

Kovy: Přítomnost kovů (měď, železo, zinek, hliník, chrom, mangan) působí katalyticky na reformaci PCDD/F

Síra a dusík: Naopak obsah síry a dusíku v palivu inhibuje tvorbu PCDD/F, ale může vést k tvorbě jiných nebezpečných sloučenin.

Chlor: Přítomnost chloru v jakékoli organické, anorganické nebo elementární formě je pro tvorbu PCDD/F zásadní nutnou podmínkou.

5.7.5 Experimentálně stanovené EF PCDD/F vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF suma TEQ PCDD/F [ng/GJp]												
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo										
		HU1	HU2	CU	BUK	BIO	ZP					
automatický kotel	100	3,88	5,73	63,0	109	2200	x	x	918	1290	x	
			3,01		54,0					2850		805
			2,91		25,8					1880		663
	60	12,8	18,7	x	x	x	x	x	x	x		
			7,83									
			11,9									
30	35,2	53,1	x	x	x	x	x	x	x			
		24,3										
		28,1										
prohořivací kotel	100	60,5	60,5	x	136	11,6	x	x	x	x		
			75,6								57,2	11,0
			45,7								188	12,1
odhořivací kotel	100	16,9	54,2	x	329	24,7	x	x	x	x		
			17,7								248	24,5
			16,1								411	23,0
zplyňovací kotel	100	3,16	3,41	x	x	7,70	x	x	x	x		
			2,44								6,50	8,43
			3,62								8,16	8,16
krbová kamna	100	x	x	x	x	10,1	x	x	x	x		
											11,2	
											8,34	
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	x	2,51		
											-	
											-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 41 Stanovené EF TEQ PCDD/F vztažené na energii obsaženou v palivu ng_{TEQ}/GJ

5.7.5.1 Porovnání EF podle paliva

Dle tab. č. 41 byly při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF TEQ PCDD/F v rozsahu od 3,88 do 2200 ng_{TEQ}/GJ . Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF PCDD/F v rozsahu od 11,6 do 136 ng_{TEQ}/GJ . Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF PCDD/F v rozsahu od 16,9 do 329 ng_{TEQ}/GJ . Vliv paliva pro tvorbu PCDD/F je značný, naměřené hodnoty EF se na jednom zařízení pohybují v rozsahu jednotek až tisíců ng_{TEQ}/GJ . Palivo, respektive některé jeho složky jsou významným faktorem pro vznik PCDD/F.

5.7.5.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

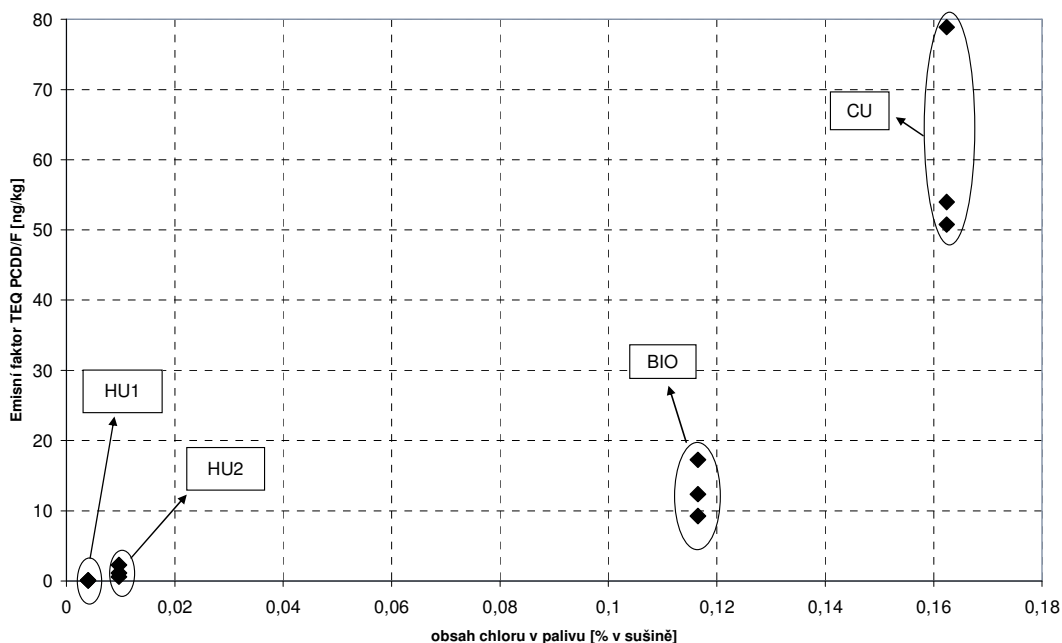
Dle tab. č. 41 byly při spalování paliva HU1 v různých spalovacích zařízeních stanoveny EF TEQ PCDD/F v rozsahu od 3,16 do 60,5 ng_{TEQ}/GJ. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF TEQ PCDD/F v rozsahu od 136 do 2200 ng_{TEQ}/GJ. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF TEQ PCDD/F v rozsahu od 7,70 do 24,7 ng_{TEQ}/GJ. Stanovené hodnoty EF při použití jednoho paliva se mění v řádech jednotek až desítek (případně stovek až tisíců) ng_{TEQ}/GJ. Vliv spalovacího zařízení je menší než vliv použitého paliva.

5.7.5.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF TEQ PCDD/F je možno sledovat v tab. č. 41 na automatickém kotli při spalování paliva HU1 při provozu na jmenovitý výkon a na dvou snížených výkonech kotle. Se snižujícím se výkonem roste množství emisí TEQ PCDD/F v rozsahu od 3,88 ng_{TEQ}/GJ při jmenovitém výkonu, do 35,2 ng_{TEQ}/GJ při 30 % jmenovitého výkonu. Z hodnot je zřejmé, že při provozu zařízení na nižší než jmenovitý výkon se EF PCDD/F zvyšuje, a to v rozsahu asi jednoho řádu.

5.7.6 Vliv množství TEQ PCDD/F na obsah chloru v palivu

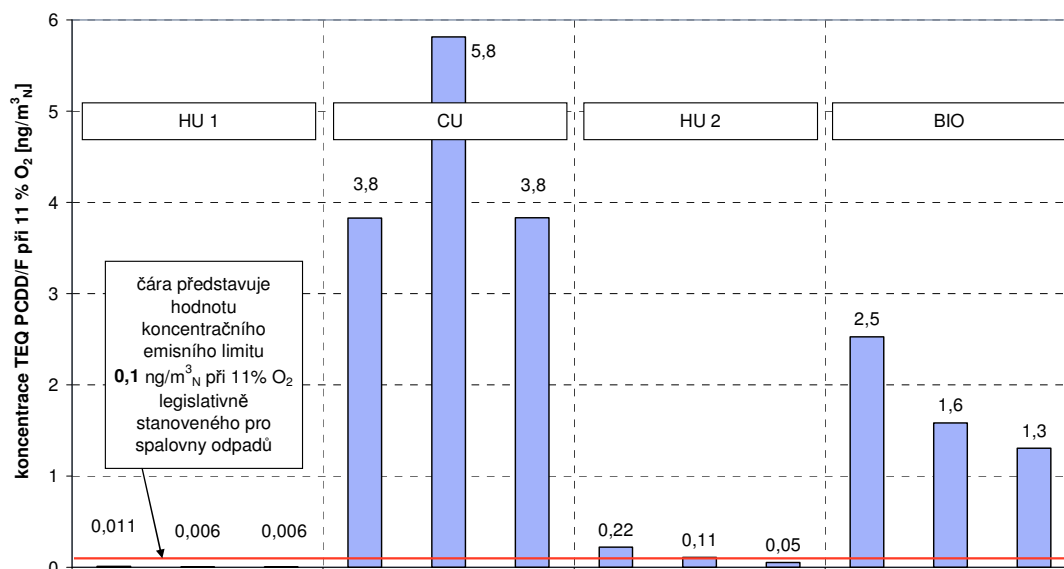
Jak již bylo řečeno v kapitole 5.7.4 je pro tvorbu PCDD/F důležité množství chloru v palivu. Tento vliv byl pozorován při spalování různých paliv v automatickém kotli (viz. graf č. 32). EF TEQ PCDD/F stanovené pro paliva HU1 a HU2 s nízkým obsahem chloru jsou nejnižší, palivo BIO obsahovalo více chloru a tedy EF TEQ PCDD/F jsou vyšší. Nejvyšší EF byly stanoveny pro palivo CU, které obsahovalo chloru nejvíce.



graf č. 32

Vliv množství TEQ PCDD/F na obsah chloru v palivu

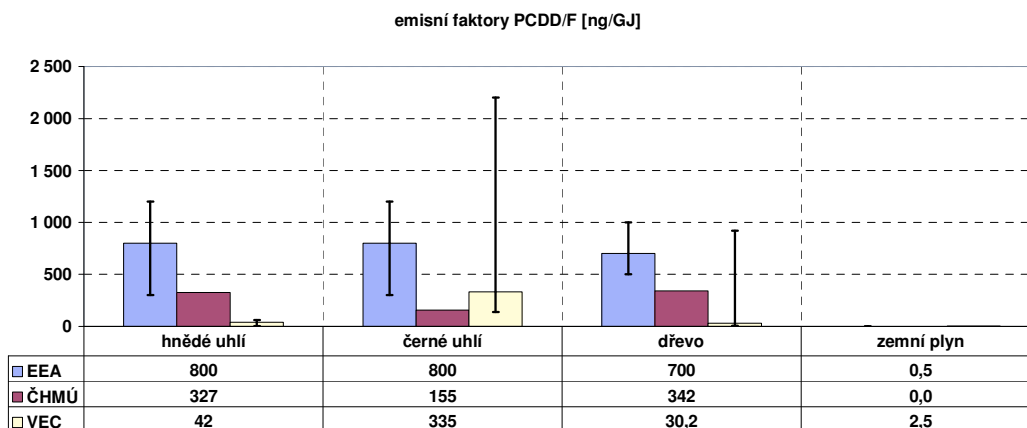
5.7.7 Porovnání naměřených koncentrací TEQ PCDD/F s legislativně stanovenou limitní hodnotou 0,1 ng_{TEQ}/m³_N při 11 % O₂



graf č. 33 Stanovené koncentrace TEQ PCDD/F na automatickém kotli při spalování různých typů paliv a srovnání s limitní koncentrací legislativně stanovenou pro spalovny odpadů

Koncentrace TEQ PCDD/F naměřená při spalování HU1 a HU2 je cca na úrovni emisního limitu stanoveného zákonem pro spalovny odpadů [37]. Koncentrace TEQ PCDD/F u paliva BIO je zhruba 20 krát vyšší než je tento limit. Nejhůře v tomto porovnání vychází palivo CU, kde je naměřená koncentrace cca 40 krát vyšší než je emisní limit pro spalovny.

5.7.8 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU



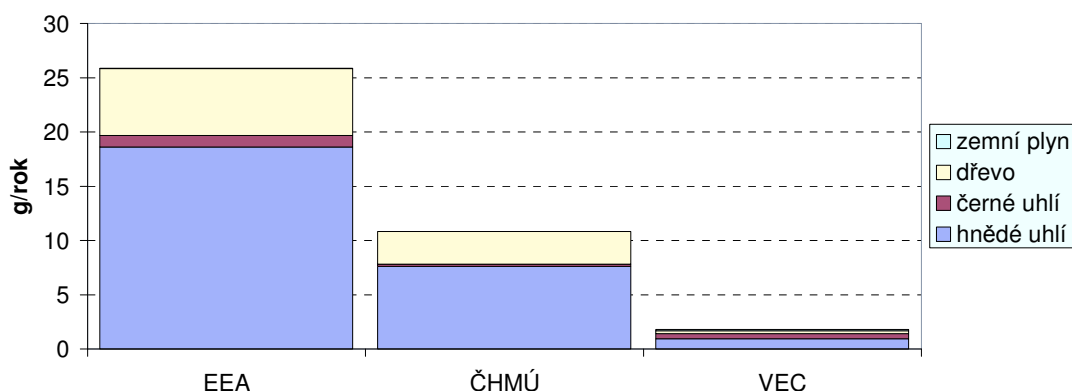
Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 34 Porovnání EF TEQ PCDD/F doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Pro tuhá paliva (bez biomasy) jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 300 do 1200 ng_{TEQ}/GJ se stěžejní hodnotou 800 ng_{TEQ}/GJ. ČHMÚ užívá pro hnědé uhlí v přepočtu hodnotu 327 ng_{TEQ}/GJ. Dle VEC byla stanovena hodnota EF o velikosti 41,7 ng_{TEQ}/GJ. Pro černé uhlí užívá ČHMÚ hodnotu po přepočtu 155 ng_{TEQ}/GJ. Dle VEC byla stanovena

hodnota 334 ng_{TEQ}/GJ. Pro biomasu (dřevo) jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 500 do 1000 ng_{TEQ}/GJ se stěžejní hodnotou 700 ng_{TEQ}/GJ. ČHMÚ užívá hodnotu v přepočtu 342 ng_{TEQ}/GJ. Dle VEC byla stanovena hodnota EF o velikosti 30,6 ng_{TEQ}/GJ. Pro zemní plyn jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 0,3 do 1,0 ng_{TEQ}/GJ se stěžejní hodnotou 0,5 ng_{TEQ}/GJ. Dle VEC byla stanovena hodnota 2,51 ng_{TEQ}/GJ. Z porovnání hodnot EF PCDD/F (viz graf č. 34) vyplývá, že hodnoty používané ČHMÚ jsou oproti doporučených hodnotám EEA nižší. Pro zemní plyn nemá ČHMÚ stanoven EF žádný. Ze srovnání EF ČHMÚ a hodnot EF stanovených na VEC vyplývá, že pro hnědé uhlí a dřevo je EF zřejmě přeceněn a pro černé uhlí naopak podceněn. K těmto závěrům je však nutné podotknout, že množství emisí TEQ PCDD/F je značně závislé na obsahu chloru v palivu. Při srovnání obsahu chloru v experimentálních vzorcích hnědého uhlí a hodnot uváděných v katalogu uhlí (viz tab. č. 8) vyplývá, že v experimentálních vzorcích byla tato hodnota zhruba 10 krát nižší.

Nástin promítání uvedených EF TEQ PCDD/F do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 35. Celkové množství emisí TEQ PCDD/F je při použití EF EEA nejvyšší, při použití EF ČHMÚ je přibližně poloviční vůči použití EF EEA a při použití EF VEC je nejmenší asi desetinové oproti použití EF EEA. Odhad množství emisí TEQ PCDD/F při použití EF VEC je relativně velice nízké díky nízkým stanoveným EF pro hnědé uhlí, které je nejpoužívanějším tuhým palivem v ČR.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 35

Modelový odhad emisí TEQ PCDD/F z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

5.7.9 Diskuse a dílčí závěry

- Množství emisí TEQ PCDD/F je více spjato s vlastnostmi paliva než s kvalitou spalování, tedy vlivem konstrukce spalovacího zařízení.
- Jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících tvorbu emisí PCDD/F je obsah chloru v palivu. Se zvyšujícím se obsahem chloru v palivu se úměrně zvyšuje i potenciál tvorby PCDD/F.
- Malé zdroje mohou a pravděpodobně emitují daleko vyšší koncentrace TEQ PCDD/F než je legislativně stanovená koncentrační úroveň pro spalovny odpadů.
- EF používané v ČR pro hnědé uhlí jsou možná značně nadhodnoceny. Pro ověření tohoto tvrzení jsou potřebné lepší informace o obsahu chloru v českém hnědém uhlí a případně další experimentální data.
- EF používané v ČR pro černé uhlí jsou pravděpodobně podceněny.

- Dle získaných experimentálních dat je množství emisí PCDD/F při spalování čistého dřeva značně nižší než předpokládají bilanční modely v ČR.
- Užití EF EEA, ČHMÚ a VEC vede k velmi rozdílným odhadům celkového množství emisí TEQ PCDD/F z domácností v ČR.

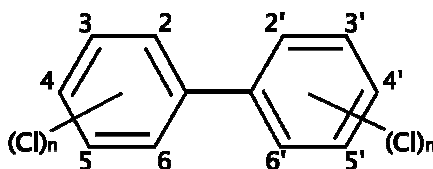
5.8 Perzistentní organické polutanty - Polychlorované bifenyly (PCB)

5.8.1 Základní charakteristika

Polychlorované bifenyly jsou chlorované aromatické sloučeniny podobné PCDD/F, které zahrnují teoreticky 209 jednotlivých sloučenin (tzv. kongenerů), které se liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi i toxicitou. Rozdíl spočívá ve stupni chlorace a umístění atomů chloru na aromatických jádrech. Struktura PCB je uvedena na obr. č. 25. V komerčních směsích se ale vyskytuje pouze 130 kongenerů. Jednotlivé kongenery jsou bezbarvé krystaly bez zápachu, avšak komerční směsi PCB jsou kapaliny. Hustota směsí závisí na stupni chlorace, s růstem obsahu chloru se hustota zvyšuje. Všechny však mají hustotu vyšší než voda (přibližně 1440 kg/m³). Společnou vlastností všech kongenerů je jejich nízká rozpustnost ve vodě (0,7 mg/l) a velmi nízká tenze par (<1 Pa). Jsou rozpustné ve většině organických rozpouštědlech a v tucích. Jsou také chemicky i fyzikálně stálé (i za teplot okolo 300°C) a nekorozivní [35].

Tyto látky byly vyráběny člověkem. V prostředí se přirozeně nevyskytují. Byly objeveny na přelomu 19. a 20. století a od 30. let 20. století se používají v průmyslu.

V 70. letech bylo zjištěno, že PCB se v prostředí nerozkládají a hromadí se v potravních řetězcích. Mohou ohrožovat životní prostředí i lidské zdraví. Proto se od jejich výroby postupně upustilo [35]. Celkově jsou PCB vyjadřovány jako toxický ekvivalent TEQ 2,3,7,8,-TCDD.



obr. č. 25

Obecná struktura molekuly PCB

5.8.2 Vyjadřování PCB

PCB jsou stejně jako PCDD/F vyjadřovány pomocí TEQ. Tabulka používaných mezinárodních faktorů ekvivalentu toxicity (I-TEF) je uvedena v tab. č. 42. Hodnoty I-TEF jsou stejně jako u PCDD/F vztaženy ke standardu 2,3,7,8,-TCDD [19].

Kód UIPAC	seznam kongenerů PCB s I-TEF	I-TEF
77	3,3',4,4'-tetraCB	0,0005
81	3,4,4',5-tetraCB	0
126	3,3',4,4',5-pentaCB	0,1
169	3,3',4,4',5,5'-hexaCB	0,01
105	2,3,3',4,4'-pentaCB	0,0001
114	2,3,4,4',5-pentaCB	0,0005
118	2,3',4,4',5-pentaCB	0,0001
123	2',3,4,4',5-pentaCB	0,0001
156	2,3,3',4,4',5-hexaCB	0,0005
157	2,3,3',4,4',5'-hexaCB	0,0005
167	2,3',4,4',5,5'-hexaCB	0,00001
189	2,3,3',4,4',5,5'-heptaCB	0,0001
170	- di-ortho PCB	0,0001
180	- di-ortho PCB	0,00001

UIPAC International Union of Pure and Applied Chemistry

tab. č. 42

Mezinárodní faktory ekvivalentů toxicity PCB

Přestože jsou stanoveny mezinárodní faktory ekvivalentu toxicity pro PCB nejsou pro emisní bilance využívány a počítá se se sumou PCB. Pro možnost porovnání

5.8.3 Rizika spojená s obsahem PCB v ovzduší

PCB mohou vstupovat do těla inhalačně a především orálně (kontaminovanou potravou). Potraviny (ryby, ptáci, hospodářská zvířata) mohou být kontaminovány PCB. Další možností je přímá kontaminace potravin nebo migrace kontaminantu z obalu [35].

PCB se koncentrují v játrech, tukových tkáních a mateřském mléce. Mohou také procházet placentou. Koncentrace v jednotlivých orgánech závisí na obsahu tuku. Výjimkou je mozek, který obsahuje méně PCB, než by odpovídalo obsahu tuku v něm. Zvýšené koncentrace se mohou vyskytovat i v kůži. Stálost v orgánech se u jednotlivých kongenerů liší. Vyšší perzistence však nemusí vždy znamenat vyšší toxicitu. Rozdíly v toxicitě mohou být způsobeny vznikem specifických meziproductů a metabolitů [35].

Expozice PCB ovlivňuje mozek, oči, srdce, imunitní systém, játra, ledviny, reprodukční systém a štítnou žlázu. Expozice těhotných žen může způsobovat snížení porodní váhy a neurologické poruchy dětí. Chronické inhalační expozice ovlivňují dýchací ústrojí (kašel), trávicí trakt (anorexie, ztráty hmotnosti, zvracení, bolesti břicha), játra, kůži (chlorakné, vyrážky) a oči. Expozice PCB může způsobovat rakovinu jater. Akutní expozice způsobují poškození kůže, poruchy sluchu a zraku a křeče [35].

5.8.4 Mechanismus vzniku PCB

PCB také vznikají podobně jako dioxiny jako nezamýšlené vedlejší produkty v řadě průmyslových výrob a při termických procesech (například v hutnictví, při spalování odpadů, v chemické výrobě různých sloučenin chlóru anebo ve spalovacích motorech automobilů při spalování olovnatého benzínu atd.) [38].

Množství emisí PCB a PCDD/F ve spalinách je ve velmi úzké korelační vazbě [46].

Problémem při zneškodňování PCB je, že během jejich spalování při teplotách pod 1200°C z nich vznikají PCDD/F, které jsou ještě toxičtější než původní látky. Likvidace PCB je proto spojena s nutností využívání zcela speciálních technologických postupů [35].

5.8.5 Experimentálně stanovené EF TEQ PCB a EF sumy PCB vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF suma TEQ PCB [ng/GJp]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1	HU2		CU		BUK	BIO		ZP	
automatický kotel	100	0,234	0,255	5,60	9,95	184	146	x	31,2	41,3	x
			0,257		4,42		263			30,6	
			0,190		2,43		143			21,8	
	60	0,972	1,10	x	x	x	x	x			
			0,692								
			1,13								
30	1,16	1,63	x	x	x	x	x				
		0,992									
		0,858									
prohořivací kotel	100	2,26	2,26	x	4,86	2,61	1,30	1,33	x	x	
			3,04	6,55		1,03					
			2,27	5,41		1,52					
odhořivací kotel	100	0,575	1,25	x	9,89	7,73	1,37	1,39	x	x	
			0,557	12,1		1,12					
			0,594	4,47		1,59					
zplyňovací kotel	100	0,229	0,251	x	x	0,420	0,448	x	x		
			0,211		0,413						
			0,226		0,400						
krbová kamna	100	x	x	x	x	0,617	0,606	x	x		
			0,560								
			0,685								
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	0,103	0,103		
									-	-	
									-	-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 43 Stanovené EF TEQ PCB vztažené na energii obsaženou v palivu NG/GJ

Experimentálně stanovené EF suma PCB [μg/GJp]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1	HU2		CU		BUK	BIO		ZP	
automatický kotel	100	0,452	0,490	0,821	1,38	16,1	13,2	x	3,11	3,87	x
			0,411		0,684		22,3			2,80	
			0,456		0,403		12,8			2,67	
	60	4,10	2,98	x	x	x	x	x			
			3,88								
			5,43								
30	3,58	3,57	x	x	x	x	x				
		4,44									
		2,75									
prohořivací kotel	100	2,78	2,78	x	2,12	2,17	2,16	2,53	x	x	
			3,75	1,91		1,68					
			3,43	2,30		2,26					
odhořivací kotel	100	1,27	1,65	x	3,98	4,38	4,35	6,26	x	x	
			1,34	3,59		2,54					
			1,19	4,97		4,25					
zplyňovací kotel	100	0,509	0,470	x	x	0,737	0,652	x	x		
			0,371		0,533						
			0,688		1,03						
krbová kamna	100	x	x	x	x	1,14	1,45	x	x		
			0,920								
			1,05								
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	0,277	0,277		
									-	-	
									-	-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 44 Stanovené EF sumy PCB vztažené na energii obsaženou v palivu μG/GJ

Porovnání dle paliva, konstrukce zařízení a provozu zařízení bude pro EF TEQ PCB (viz. tab. č. 43) a EF sumy PCB (viz. tab. č. 44) podobné, proto je toto porovnání provedeno pouze pro sumy PCB, které jsou používány pro bilance PCB.

5.8.5.1 Porovnání EF podle paliva

Při zkouškách provedených na automatickém kotli byly při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF sumy PCB v rozsahu od 0,452 do 16,1 μg/GJ (viz. tab. č. 44). Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF sumy PCB v rozsahu od 2,16 do 2,78 μg/GJ. Při zkouškách

na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF PCB v rozsahu od 1,27 do 4,35 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Vliv paliva pro tvorbu PCB se v největší míře projevil pouze při spalování různých paliv v automatickém kotli, na ostatních spalovacích zařízeních byly rozdíly mnohem menší.

5.8.5.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

Dle tab. č. 44 byly při spalování paliva HU1 v různých spalovacích zařízeních stanoveny EF PCB v rozsahu od 0,452 do 2,78 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF PCB v rozsahu od 2,12 do 16,1 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF PCB v rozsahu od 0,737 do 4,35 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Stanovené hodnoty EF PCB při použití jednoho paliva se mění v řádech desetin až desítek $\mu\text{g}/\text{GJ}$.

5.8.5.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF PCB je možno sledovat v tab. č. 44 na automatickém kotli při spalování paliva HU1 při provozu na jmenovitý výkon a na dvou snížených výkonech kotle. Z naměřených výsledků nelze vypozařovat žádný trend, neboť nejnižší hodnota EF PCB byla naměřena při 100 % výkonu kotle, střední při 30 % a nejvyšší při 60 % výkonu kotle.

5.8.6 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU

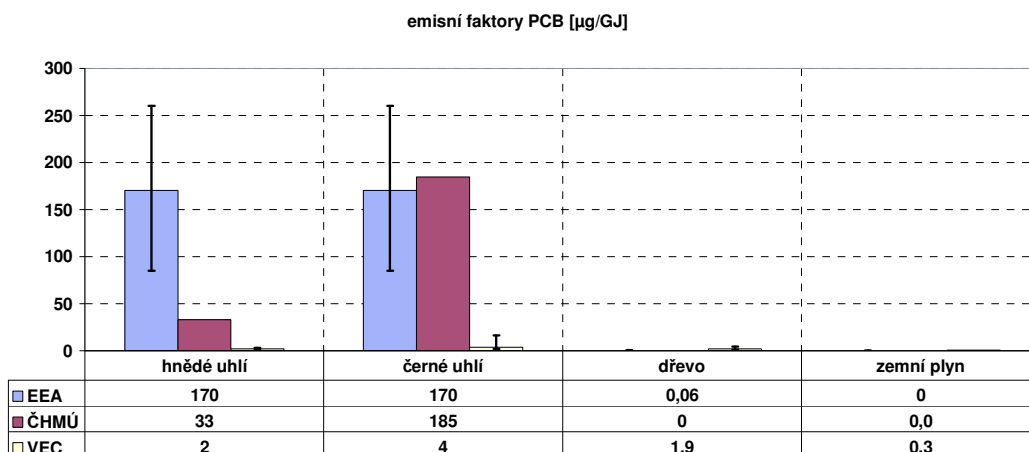
Data VEC jsou v této kapitole vyjádřena jako suma 14ti kongenerů PCB.

Pro tuhá paliva (bez biomasy) jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 85 do 260 $\mu\text{g}/\text{GJ}$ se střední hodnotou 170 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. ČHMÚ užívá pro hnědé uhlí v přepočtu hodnotu 32,9 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Dle VEC byla stanovena hodnota EF o velikosti 2,06 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Pro černé uhlí užívá ČHMÚ hodnotu po přepočtu 185 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Dle VEC byla stanovena hodnota 3,69 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Pro biomasu (dřevo) jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 0,0120 do 0,300 $\mu\text{g}/\text{GJ}$ se střední hodnotou 0,0600 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. ČHMÚ nemá EF PCB pro biomasu stanoven. Dle VEC byla stanovena hodnota EF o velikosti 1,9 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Pro zemní plyn není dle EEA ani dle ČHMÚ EF stanoven. Dle VEC byla pro zemní plyn stanovena hodnota 0,277 $\mu\text{g}/\text{GJ}$.

Z porovnání hodnot EF PCB (viz. graf č. 36) vyplývá, že hodnoty EF PCB stanovené na VEC jsou asi o dva řády nižší než EF dle EEA a než EF dle ČHMÚ pro černé uhlí. Hodnota dle ČHMÚ pro hnědé uhlí je oproti hodnotě stanovené na VEC přibližně o jeden řád vyšší.

Hodnoty EF VEC stanovené pro hnědé uhlí, černé uhlí a biomasu jsou přibližně podobné. Avšak EF dle EEA pro fosilní paliva a pro biomasu jsou rozdílné více než o 4 řády.

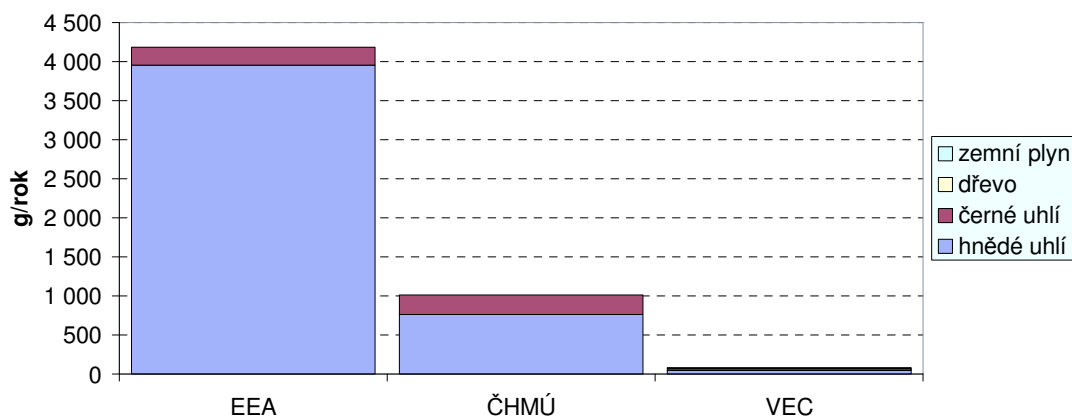
K těmto závěrům je však nutné podotknout, že množství emisí PCB je značně závislé na obsahu chloru v palivu. Při srovnání obsahu chloru v experimentálních vzorcích hnědému uhlí a hodnot uváděných v katalogu uhlí (viz tab. č. 8) vyplývá, že v experimentálních vzorcích byla tato hodnota zhruba 10 krát nižší.



Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 36 Porovnání EF PCB doporučených dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Nástin promítání uvedených EF sumy PCB do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 37. Celkové množství emisí sumy PCB je při použití EF EEA nejvyšší, při použití EF ČHMÚ je přibližně čtvrtinové vůči použití EF EEA a při použití EF VEC je nejmenší asi 40 krát nižší oproti použití EF EEA. Všechny EF VEC, vyjma EF pro černé uhlí, byly stanoveny podstatně nižší než EF EEA a ČHMÚ. Díky faktu, že černé uhlí je v ČR spíše minoritním palivem, je celkový odhad emisí PCB z domácností v ČR vycházející z EF VEC velmi nízký.

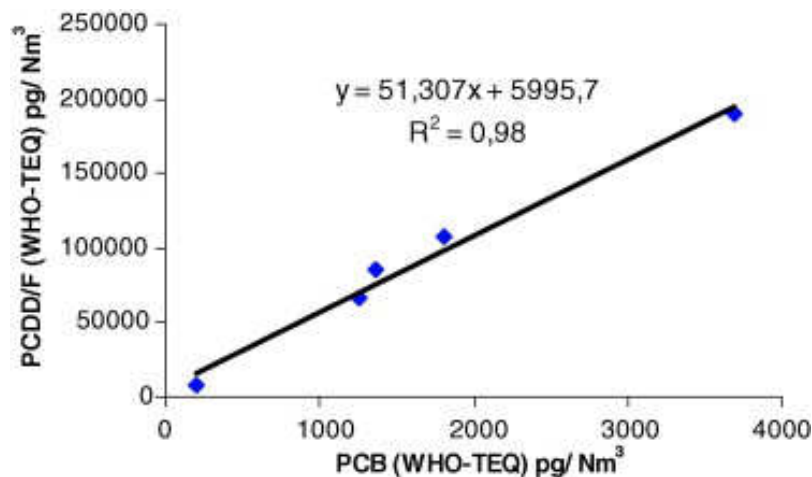


Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 37 Modelový odhad emisí PCB z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

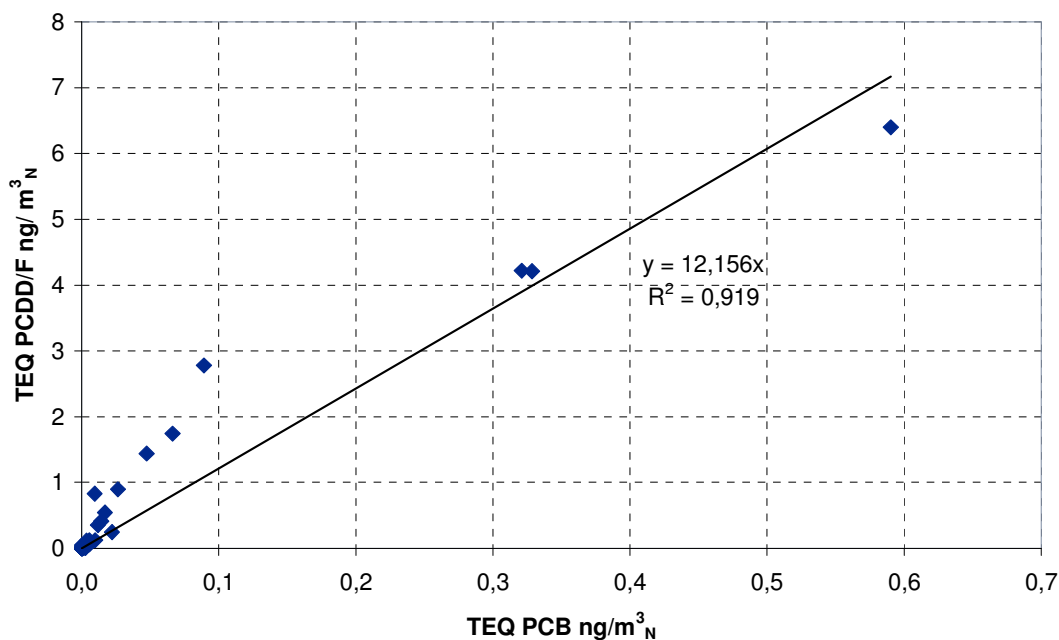
5.8.7 Vztah mezi PCB a PCDD/F

Dle Pandelova et al., 2009 [46] je poměr mezi TEQ PCDD/F a TEQ PCB přibližně 50:1, přičemž stanovené koncentrace TEQ PCB byly v rozsahu až $4 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{N}}$ viz. graf č. 38.



graf č. 38 Vztah mezi PCB a PCDD/F dle Pandelova et al., 2009

Dle dat experimentálně stanovených na VEC byl vytvořen graf závislosti koncentrace TEQ PCB na koncentraci TEQ PCDD/F viz. graf č. 39. Experimentální data VEC pro TEQ PCB jsou v rozsahu přibližně do $0,6 \text{ ng/m}^3_{\text{N}}$, což jsou hodnoty více než 4 krát menší než porovnávaná data. Dle VEC je však poměr mezi TEQ PCDD/F a TEQ PCB asi 12:1. V případě, že bychom z experimentálních dat VEC vyloučili 3 nejvyšší naměřené hodnoty byl by tento poměr přibližně 30:1.



graf č. 39 Vztah mezi koncentrací TEQ PCB a koncentrací TEQ PCDD/F stanovený z experimentů na VEC

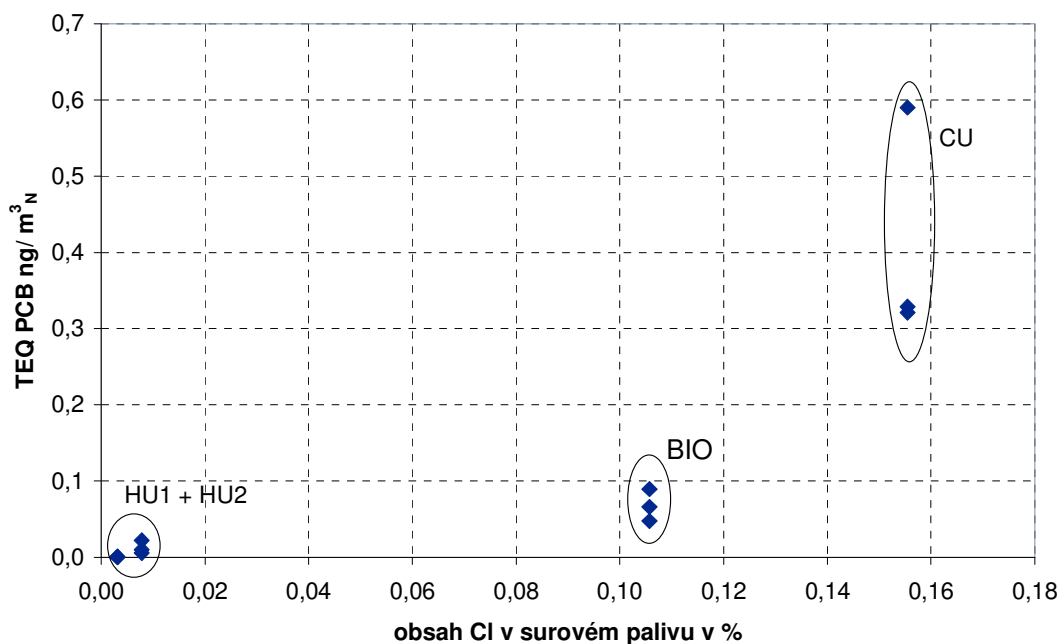
5.8.8 Srovnání naměřených koncentrací PCB s obecným emisním limitem TEQ PCB

Obecný emisní limit pro TEQ PCB má dle vyhlášky 205/2009Sb. hodnotu $0,2 \text{ mg}_{\text{TEQ}}/\text{m}^3_{\text{N}}$. Tato hodnota je ve srovnání s naměřenými experimentálními daty, které byly stanoveny v rozsahu od $0,5$ do $400 \text{ pg/m}^3_{\text{N}}$, asi 500 000 krát větší. Je zřejmé, že se do vyhlášky

vloudila chyba, neboť obecný emisní limit pro TEQ PCDD/F dle stejné vyhlášky je $0,1 \text{ ng}_{\text{TEQ}}/\text{m}^3_{\text{N}}$ což je 2 000 000 krát nižší hodnota, která je vztahována přes toxické ekvivalenty ke stejné látce 2,3,7,8,-TCDD.

5.8.9 Vztah mezi obsahem chloru v palivu a množstvím emisí TEQ PCB

Tvorba emisí PCB stejně jako tvorba emisí PCDD/F je závislá na obsahu chloru v palivu. Závislost obsahu chloru v palivu na množství TEQ PCB ve spalinách při zkouškách na automatickém kotli zobrazuje graf č. 40.



graf č. 40 Vztah mezi koncentrací TEQ PCB a obsahem chloru v surovém palivu

5.8.10 Diskuse a dílčí závěry

- Jelikož molekuly sledovaných kongenerů PCB jsou podobné molekulám PCDD/F lze tedy usuzovat, že mechanismy jejich tvorby budou podobné jako u PCDD/F. A tedy množství PCB v emisích bude korelovat s obsahem PCDD/F v emisích. Naměřená experimentální data tento vztah potvrdila.
- Množství emisí PCB je spjato s vlastnostmi paliva, zejména je pro jejich tvorbu důležitý obsah chloru ve spalovaném palivu.
- Dle experimentálních dat lze konstatovat, že kvalita spalovacího procesu může ovlivnit produkované množství emisí PCB v rozsahu cca jednoho až dvou řádů.
- Dle EEA by měl být diametrální rozdíl v množství produkovaných PCB při spalování biomasy a fosilních paliv a to přibližně 3000 krát. Tato skutečnost však nebyla z naměřených dat VEC pozorována.
- Dle ČHMÚ jsou EF PCB pro černé uhlí asi 5 krát vyšší než pro uhlí hnědé. Z experimentů tento rozdíl nebyl jednoznačně pozorován. Na některých zařízeních byly rozdíly vyšší, na jiných nižší.
- Užití EF EEA, ČHMÚ a VEC vede k velmi rozdílným odhadům celkového množství emisí sumy PCB z domácností v ČR.

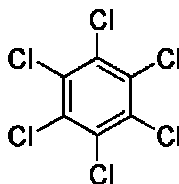
- Legislativně stanovený obecný koncentrační limit TEQ PCB je minimálně z hlediska spalovacích procesů neúměrně vysoký a oproti naměřeným koncentracím je asi 500 000 krát vyšší.

5.9 Perzistentní organické polutanty - Hexachlorbenzen (HCB)

5.9.1 Základní charakteristika

Hexachlorbenzen (HCB) je za normálních podmínek bílá krystalická látka nepříjemného zápachu. Rozpustnost ve vodě při 25°C je 6,2 mg/l. HCB je velmi dobře rozpustný v organických rozpouštědlech, tucích a olejích.

Chlorbenzen je aromatická organická sloučenina se sumárním vzorcem C_6H_5Cl . Tato bezbarvá hořlavá kapalina je běžně používaným rozpouštědlem a také meziproduktem pro výrobu dalších chemikálií [35].



obr. č. 26 Molekula HCB

5.9.2 Rizika spojená s obsahem HCB v ovzduší

HCB je obecně látka velmi nebezpečná pro životní prostředí. Hlavní nebezpečnost této látky spočívá v její stabilitě a schopnosti bioakumulace. Tím rozumíme fakt, že je nesnadno odbouratelná a šíří se potravním řetězcem směrem k jeho vrcholu, tzn. od nižších živočichů k velkým predátorům. Vysoké koncentrace hexachlorbenzenu byly naměřeny například ve velkých dravých mořských rybách a velkých vodních savcích.

U experimentálních zvířat vystavených vysokým dávkám HCB byla pozorována široká škála projevů poškození zdraví. Projevilo se i poškození reprodukčních schopností a rapidní zvýšení počtu poškozených mláďat.

Těkavost HCB, společně s vysokou stabilitou a schopností bioakumulace, dovoluje jeho transport na velice dlouhé vzdálenosti. Díky tomu je téměř všudypřítomný a je možno jeho stopová množství zaznamenat ve všech složkách životního prostředí, a to i na velmi odlehlých lokalitách. Přítomnost této látky byla prokázána dokonce ve vzduchu, vodě a zvířatech i v Arktickém regionu. HCB je klasifikován jako POP [35].

Význam HCB tkví v jeho důležitosti jako meziprojektu k tvorbě PCDD/F a PCB. Tam, kde vznikají PCDD/F, tam také vzniká HCB [30].

5.9.3 Experimentálně stanovené EF HCB vztažené na množství energie v palivu

Experimentálně stanovené EF HCB [$\mu\text{g}/\text{GJp}$]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1	HU2	CU	BUK	BIO	ZP				
automatický kotel	100	0,676	0,745	0,822	0,834	22,8	12,7	x	3,27	4,22	x
			0,727		1,04		18,9			2,80	
			0,557		0,596		36,8			2,80	
	60	510	600	x	x	x	x	x	x	x	
			360								
			569								
	30	1040	1060	x	x	x	x	x	x	x	
			1010								
			1070								
prohořivací kotel	100	*nest	*nest	x	2450	3270	2,40	x	2,32	x	
			*nest			2480			2,10		
			*nest			1600			2,79		
odhořivací kotel	100	0,852	4,31	x	1080	1160	0,575	x	0,329	x	
			0,784			1000			1,05		
			0,921			1740			0,342		
			*nest						2,55		
zplyňovací kotel	100	0,524	*nest	x	x	x	1,80	x	1,85	x	
			*nest						1,02		
			0,524						2,66		
krbová kamna	100	x	x	x	x	2,58	x	x	2,48	x	
									2,58		
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	0,733	0,733	
									-	-	
									-	-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 45 Stanovené EF HCB vztažené na energii obsaženou v palivu $\mu\text{g}/\text{GJ}$

Překvapivé jsou EF HCB při zkouškách na automatickém kotli při 60 a 30 % jmenovitého výkonu. Dalším překvapením jsou EF HCB stanovené při všech zkouškách na CU. Otázka co způsobilo tak vysoké množství HCB u obou zmíněných případů se prozatím nepodařilo objasnit.

5.9.3.1 Porovnání EF podle paliva

Při zkouškách provedených na automatickém kotli byly při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO stanoveny EF HCB v rozsahu od 0,676 do 22,8 $\mu\text{g}/\text{GJ}$ (viz. tab. č. 45). Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF HCB v rozsahu od 2,40 do 2450 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF HCB v rozsahu od 0,575 do 1080 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Vliv paliva pro tvorbu HCB je velmi výrazný v rozsazích jednotek až tisíců $\mu\text{g}/\text{GJ}$.

5.9.3.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

Dle tab. č. 45 byly při spalování paliva HU1 v různých spalovacích zařízeních stanoveny EF HCB v rozsahu od 0,524 do 0,852 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF HCB v rozsahu od 22,8 do 2450 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF HCB v rozsahu od 0,575 do 2,58 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Stanovené hodnoty EF HCB při použití jednoho paliva se mění v řádech desetin až desítek $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Vliv spalovacího zařízení se pro EF HCB při spalování HU1 a BUK téměř neprojevil. Pro CU byl pozorován rozsah od desítek po tisíce $\mu\text{g}/\text{GJ}$.

5.9.3.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF HCB je možno sledovat v tab. č. 45 na automatickém kotli při spalování paliva HU1 při provozu na jmenovitý výkon a na dvou snížených výkonech kotle. Z naměřených výsledků je patrné, že se snižujícím se výkonem zařízení rostou množství emisí HCB. Pozoruhodné je, že snižování výkonu zařízení má dle

naměřených dat větší vliv než konstrukce spalovacího zařízení. Tento jev však nejsem schopen na základě dostupných údajů posoudit.

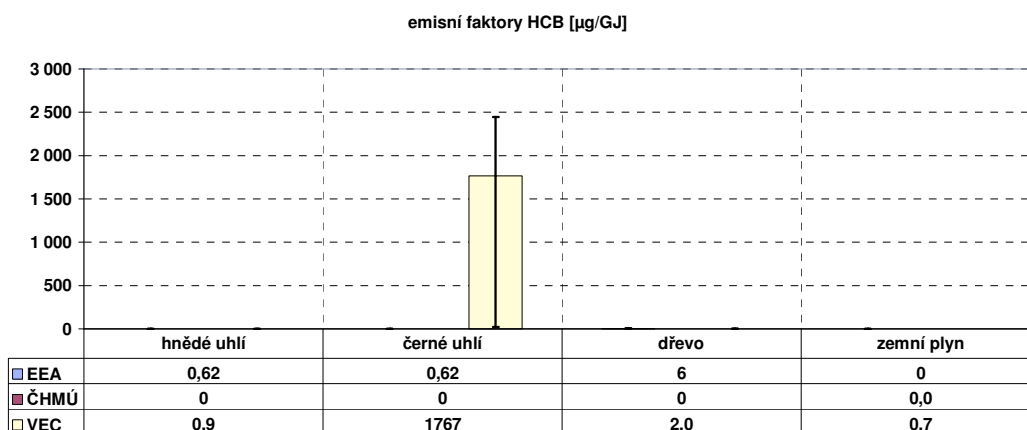
5.9.4 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU

ČHMÚ nemá EF HCB v současnosti vůbec stanoveny. Hodnota VEC pro hnědé uhlí byla odhadnuta, protože nejsou k dispozici naměřené hodnoty HCB pro prohořivací kotel, který je v současnosti zastoupen pro spalování fosilních paliv více než z 50 % instalovaného výkonu.

EEA má nastaveny pro fosilní paliva desetinové hodnoty EF HCB oproti biomase. Dle VEC jsou jak u černého uhlí, tak u hnědého uhlí v určitých případech pozorována velmi vysoká množství HCB. Důvod takto vysokých pozorovaných emisí HCB se prozatím nepodařilo věrohodně vysvětlit. Velice zajímavá je skutečnost, že vysoké hodnoty byly pozorovány opakovaně. Proto není možno se domnívat, že se jedná o odlehlé hodnoty, způsobené např. kontaminací vzorku.

Pro tuhá paliva (bez biomasy) jsou dle EEA navrhovány EF HCB v rozsahu od 0,31 do 1,2 $\mu\text{g}/\text{GJ}$ se střední hodnotou 0,62 $\mu\text{g}/\text{GJ}$.

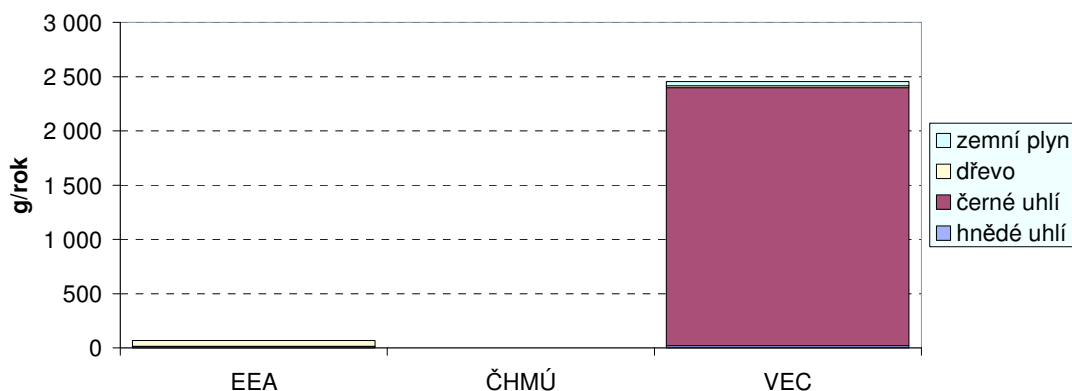
Dle VEC byla hodnota pro černé uhlí stanovena ve výši 1767 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Pro biomasu (dřevo) jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 3 do 9 $\mu\text{g}/\text{GJ}$ se střední hodnotou 6 $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Pro zemní plyn EEA nenavrhuje žádné EF HCB. Pro zemní plyn je k dispozici pouze jediná hodnota stanovená na VEC o velikosti 0,7 $\mu\text{g}/\text{GJ}$.



Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 41 Porovnání EF HCB doporučených dle EEA a stanovených VEC

Nástin promítání uvedených EF HCB do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 42. Celkové množství emisí HCB je při použití EF VEC extrémně vysoké v porovnání s množstvím emisí HCB při použití EF EEA. Množství HCB při použití EF VEC je dáno velmi vysokým EF pro černé uhlí. Ani fakt, že černé uhlí je minoritní palivo nedokázal extrémní velikost EF vyvážit.

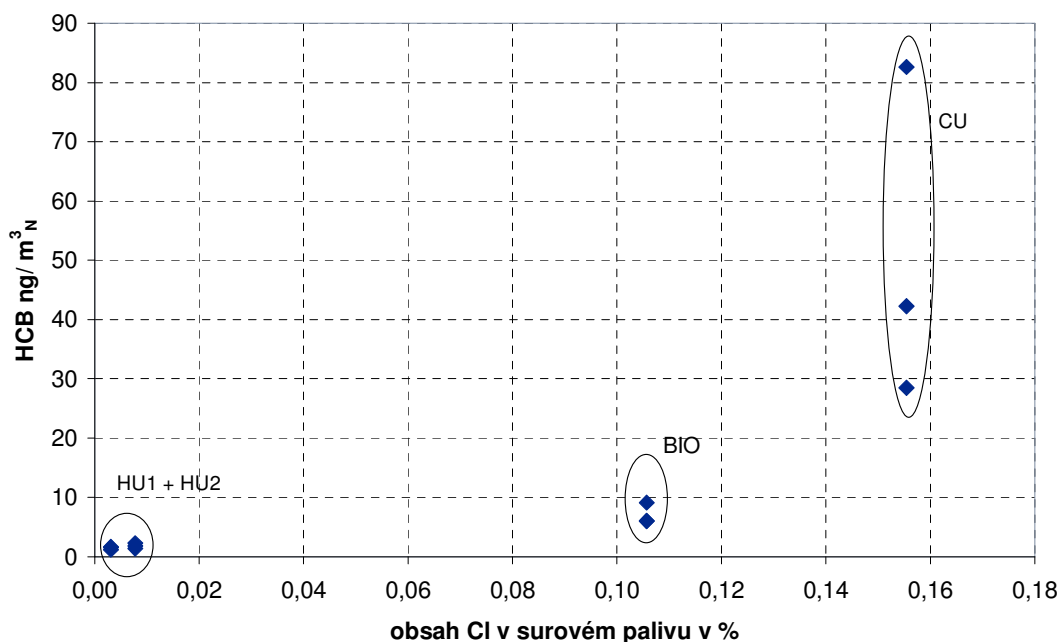


Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 42 Modelový odhad emisí HCB z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA a VEC

5.9.5 Vztah mezi obsahem chloru v palivu a množstvím emisí HCB

Tvorba emisí HCB stejně jako tvorba emisí PCB a PCDD/F je závislá na obsahu chloru v palivu. HCB je jedním z meziproduktů vzniku PCB a PCDD/F. Závislost obsahu chloru v palivu na množství HCB ve spalinách při zkouškách na automatickém kotli zobrazuje graf č. 43.



graf č. 43 Vztah mezi koncentrací HCB a obsahem chloru v surovém palivu

5.9.6 Diskuse a dílčí závěry

- Množství emisí HCB je více spjato s vlastnostmi paliva než s kvalitou spalování, tedy vlivem konstrukce spalovacího zařízení.
- Jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících tvorbu emisí HCB je obsah chloru v palivu. Se zvyšujícím se obsahem chloru v palivu se úměrně zvyšuje i potenciál tvorby HCB.
- Dostupné EF HCB se pohybují v desetinách $\mu\text{g}/\text{GJ}$. Při experimentech se však vyskytlo několik případů, kdy EF HCB dosahovaly hodnot až několika tisíců $\mu\text{g}/\text{GJ}$.

- Vysokého množství emisí HCB bylo překvapivě také docíleno snížením výkonu na automatickém kotli při spalování paliva HU1.
- Užití EF EEA a VEC vede k velmi rozdílným odhadům celkového množství emisí sumy PCB z domácností v ČR, hlavně díky extrémě vysokému EF VEC pro černé uhlí.

5.10 Perzistentní organické polutanty - Polyaromatické uhlovodíky (PAU)

5.10.1 Základní charakteristika

Skupina polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) představuje velmi širokou škálu různých látek vyznačujících se tím, že ve své molekule obsahují kondenzovaná aromatická jádra a nenesou žádné heteroatomy ani substituenty. Do skupiny PAU náleží například následující látky: naftalen, acenaftalen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren, benz(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, dibenzo(a,h)an-tracen, indeno(1,2,3-c,d)pyren a benzo(ghi)perylene. Čisté sloučeniny jsou bílé nebo nažloutlé krystalické pevné látky. Jsou velmi málo rozpustné ve vodě, ale snadno se rozpouštějí v tucích a olejích [35].

Benzo(a)pyren (sumární vzorec $C_{20}H_{12}$) je polycyklický aromatický uhlovodík s pěti benzenovými kruhy. Je silně karcinogenní a mutagenní. Za běžných podmínek jde o žlutě zbarvenou krystalickou pevnou látku. Benzo(a)pyren je produktem nedokonalého spalování při teplotách 300 až 600°C [39].

Benzo(a)pyren se nachází v uhelném dehtu, v automobilových výfukových plynech (zvláště ze vznětových motorů), v každém kouři vzniklém při spalování organických materiálů (včetně listů tabáku při kouření) a v grilovaných potravinách.

5.10.2 Rizika spojená s obsahem PAU v ovzduší

Celá řada látek ze skupiny polycyklických aromatických uhlovodíků představuje závažné zdravotní riziko pro člověka. Jejich nebezpečí spočívá především v karcinogenitě a ohrožení zdravého vývoje plodu [35].

Vezměme dále za konkrétní příklad benzo(a)pyren. Tato látka může být vdechnuta a prostupuje do organismu i pokožkou. Expozice může vést k následujícím rizikům pro zdraví člověka:

- ohrožení zdravého vývoje plodu;
- riziko onemocnění rakovinou;
- podráždění až popálení kůže;
- Opakované expozice způsobují ztenčení a popraskání pokožky [35].

PAU jsou podle dnes již neplatné přílohy č. 1 vyhl. č. 356/2002 Sb. zařazeny do skupiny 3 mezi persistentní organické látky (POP). Uvedena je jednak suma PAU, jednak deset konkrétních látek, mezi které patří fluoranten, pyren, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, benzo(ghi)pyren, indeno(1,2,3-c,d)pyren, benzo(a)antracen a dibenzo(a)antracen. Platí obecný emisní limit $0,2 \text{ mg/m}^3$ pro celkovou hmotnostní koncentraci těchto látek.

Vyhláška č. 356/2002 Sb. byla zrušena vyhláškou č. 205/2009Sb., ta však stanovuje obecný emisní limit $0,2 \text{ mg/m}^3$ pro celkovou hmotnostní koncentraci těchto látek, ale jednotlivé PAU zahrnované do sumy již nestanovuje.

Pro účely bilancí dle „Nomenclature For Reporting - UNECE nomenclature for reporting of air pollutants” (NFR) jsou sledovány pouze 4 PAU a to:

- benzo(a)pyren,
- benzo(b)fluoranten,
- benzo(k)fluoranten a
- indeno(1,2,3-c,d)pyren.

Proto jsou v této práci diskutovány pouze výsledky těchto 4 PAU.

5.10.3 Mechanismus vzniku PAU

PAU podobně jako CO vznikají při nedokonalém spalování. Emise PAU závisí na teplotě, době setrvání plynů a na dostupnosti kyslíku v reakční zóně.

Bylo zjištěno, že kotle starých konstrukcí s ručním přikládáním paliva produkují mnohonásobně vyšší množství PAU než kotle moderních konstrukcí s automatickým podáváním paliva[30].

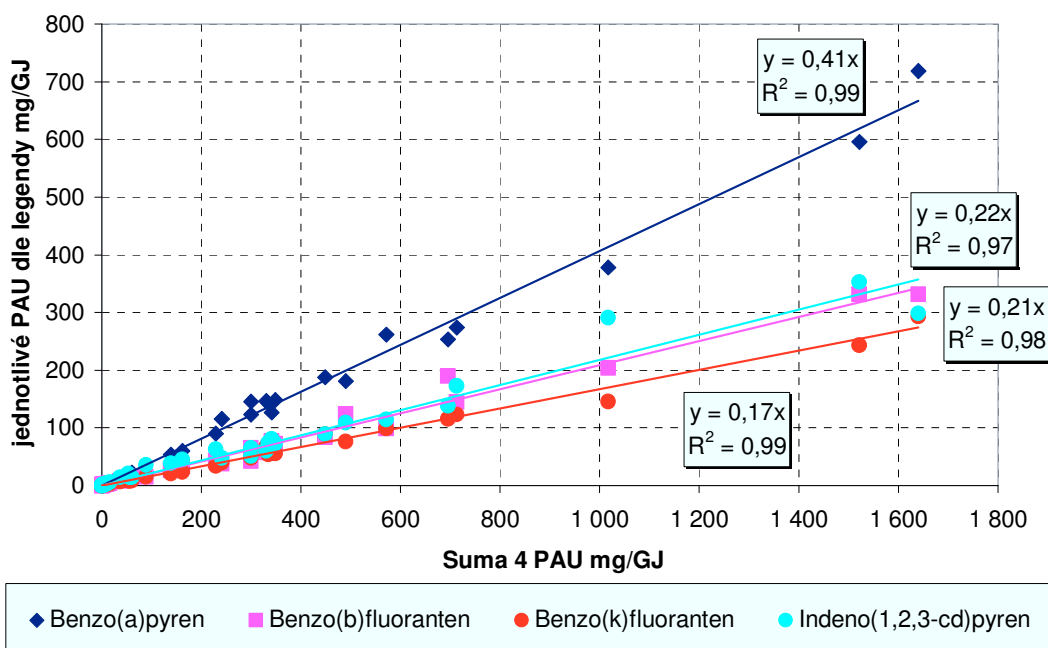
Mechanismus vzniku PAU zahrnuje dva kroky – pyrolyzu a pyrosyntezu. Jestliže je směs organických látek obsahujících uhlík a vodík vystavena teplotám vyšších než 700°C , tzn. podmínkám pyrolýzy, resp. podmínkám nedokonalého spalování, dochází k tvorbě nestabilních menších molekul (prekurzorů PAU) a v přítomnosti atomů O,N,S aj. též k tvorbě příslušných heterocyklických analogů. Tyto fragmenty, vesměs radikály, se rekombinují při vysokých teplotách (500 až 800°C) za vzniku poměrně stabilních aromatických uhlovodíků. Vysoce reaktivní fragmenty se stabilizují uzavřením kruhu, kondenzací, dehydrogenací, Diels-alderovými reakcemi, rozšířením kruhu a jinými způsoby za vzniku různorodých polycyklických systémů. Výsledek pyrosyntézy je funkcí mnoha proměnných, v neposlední řadě je dán též přítomností redukční atmosféry uvnitř plamene, kde řetězová radikálová propagace dosahuje většího rozsahu a dochází tak k tvorbě složitých molekul PAU. Tvorba těchto velkých molekul je podporována přítomností radikálů vyšší molekulové hmotnosti.

Dokonalá pyrolýza a spalování uhlíkatých paliv vede k rozbití velkých organických sloučenin na menší a v konečné fázi na CO_2 . Dokonalá konverze paliva na finálové produkty je však možná jen vzácně. Většina spalovacích procesů je ve větší či menší míře spojena se vznikem organických sloučenin o vyšší molekulové hmotnosti, často cyklických. Existují tři procesy vedoucí k tvorbě organických látek ze spalování uhlíkatých paliv. Všechny tyto mechanismy jsou rovnocenné, intenzita jejich uplatnění je však závislá na podmínkách spalování a typu paliva. Jsou to:

- emise beze změn – PAU obsažené v palivu jsou uvolněny do emisí
- adice menších aromatických sloučenin – jednodušší cyklické uhlovodíky obsažené v palivu nebo vzniklé pyrolyticky jsou adovány (zánik vícenásobných vazeb a nahrazení vazbami jednoduchými).
- cyklizace malých uhlíkatých molekul – cyklizace uhlíkatých řetězců a následná adice [40].

5.10.4 Perzistentní organické polutanty - Polyaromatické uhlovodíky (PAU) – suma 4 sledovaných PAU

Bylo zjištěno, že emise sledovaných PAU jsou vůči sobě v podobných vzájemných poměrech. Vážené poměrové rozdělení 4 sledovaných PAU v emisích vyjádřené jako EF vztahovaný k energii v palivu je přibližně konstantní viz. graf č. 44. Z grafu je možno vyčíst, že benzo(a)pyren je zastoupen cca 41 % a ostatní 3 PAU jsou v emisích zastoupeny přibližně podobně v rozmezí 17 až 22 %. Graf byl vytvořen ze všech experimentálních dat a je vidět, že koeficienty spolehlivosti R^2 jsou velmi blízké 1. Nejnižší spolehlivost je pozorována u Indeno(1,2,3-c,d)pyrenu přibližně 96 %.



graf č. 44 Vážené poměrové rozdělení PAU dle experimentálních dat VEC

Vzhledem k faktu, že poměrové zastoupení sledovaných PAU je stálé, a porovnání vlivu paliva, konstrukce zařízení a provozu zařízení by bylo pro všechny sledované PAU velmi podobné, bude z těchto hledisek zkoumána pouze suma sledovaných PAU.

Experimentálně stanovené EF suma 4 PAU [mg/GJp]											
konstrukce zařízení	% jm. výkonu	palivo									
		HU1			HU2		CU		BUK		BIO
automatický kotel	100	1,20	2,04	1,39	1,65	2,15	4,67	x	10,2	16,4	x
			1,07		1,68		1,42			7,41	
			0,475		0,830		0,374			6,94	
	60	1,96	2,04	x	x	x	x	x	x	x	x
			2,47								
			1,38								
	30	59,7	89,2	x	x	x	x	x	x	x	x
			36,5								
			53,4								
prohořivací kotel	100	1640	1640	x	690	1020	328	349	x	x	
			241			341		300			
			572			713		335			
odhořivací kotel	100	315	449	x	593	490	177	230	x	x	
			299			695		162			
			330			1520		139			
zplyňovací kotel	100	2,48	3,92	x	x	x	57,4	55,4	x	x	
			1,76					60,8			
			1,76					56,2			
krbová kamna	100	x	x	x	x	9,65	11,5	x	x	x	
							6,99				
							10,4				
plynový kotel	100	x	x	x	x	x	x	x	0,0653	0,0653	
										-	
										-	

Legenda: viz. kapitola 5.1.1

tab. č. 46 Stanovené EF sumy sledovaných PAU vztažené na energii obsaženou v palivu MG/GJ

5.10.4.1 Porovnání EF podle paliva

Při zkouškách provedených na automatickém kotli při použití paliv HU1, HU2, CU, BIO byly stanoveny EF sumy 4 PAU v rozsahu od 1,20 do 10,2 mg/GJ (viz. tab. č. 46). Při zkouškách na prohořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF sumy 4 PAU v rozsahu od 328 do 1640 mg/GJ. Při zkouškách na odhořivacím kotli byly při použití paliv HU1, CU a BUK naměřeny EF sumy 4 PAU v rozsahu od 177 do 593 g/GJ.

Tyto hodnoty jsou zhruba v rozsahu jednoho řádu, a není zde možno nalézt konkrétní vliv paliva. Jde zde spíše o kombinaci vhodnosti spalovaného paliva pro danou konstrukci zařízení.

5.10.4.2 Porovnání EF podle druhu zařízení

Dle tab. č. 46 byly při spalování paliva HU1 v různých spalovacích zařízeních stanoveny EF sumy 4 PAU v rozsahu od 1,20 do 1640 mg/GJ. Při zkouškách s palivem CU byly na různých zařízeních naměřeny EF sumy 4 PAU v rozsahu od 2,15 do 690 mg/GJ. Při zkouškách s palivem BUK byly na různých zařízeních naměřeny EF sumy 4 PAU v rozsahu od 9,65 do 328 mg/GJ.

Všechny tyto rozsahy jsou značně široké a opět platí, že kvalita spalovacího procesu je závislá na kombinaci vhodnosti spalovaného paliva pro danou konstrukci zařízení. Avšak na příkladu HU1, kde se stanovené hodnoty pohybovaly od jednotek do tisíců mg/GJ je možno konstatovat, že vliv konstrukce zařízení je na množství emisí sumy 4 PAU dominantnější než typ spalovaného paliva.

Ve všech případech platí, že prohořivací a odhořivací konstrukce spalovacích zařízení (staré konstrukce) vykazují řádově vyšší množství emisí sumy 4 PAU než automatické a zplyňovací konstrukce spalovacích zařízení (moderní konstrukce).

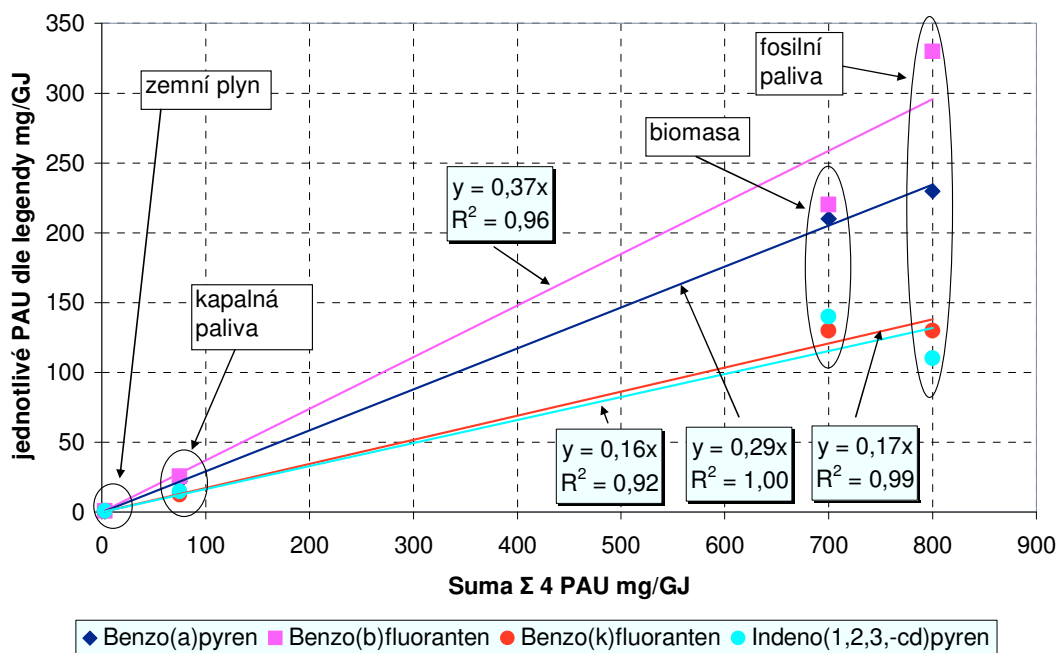
5.10.4.3 Porovnání EF podle výkonu zařízení

Vliv provozu spalovacího zařízení na velikost EF sumy 4 PAU je možno sledovat v tab. č. 46 na automatickém kotli při spalování paliva HUI při provozu na jmenovitý výkon a na dvou snížených výkonech kotle. Se snižujícím se výkonem roste množství emisí sumy 4 PAU v rozsahu od 1,20 mg/GJ při jmenovitém výkonu do 59,7 mg/GJ při 30 % jmenovitého výkonu. Tento vliv má přímou souvislost s klesající kvalitou spalovacího procesu.

5.10.5 Porovnání naměřených EF, EF používaných v ČR a EU

Podobná poměrová analýza jako u experimentálně naměřených dat byla provedena i s EF navrhovanými EEA a s EF ČHMÚ.

Vážené poměrové rozdělení EF EEA jednotlivých sledovaných PAU zobrazuje graf č. 45. Z něj je možno vyčíst, že EEA přibližně předpokládá, že benzo(b)fluoranten zabírá největší podíl PAU cca 37 %, druhý je benzo(a)pyren s s podílem 29 %, třetí je benzo(k)fluoranten s podílem kolem 17 % a na poslední indeno(1,2,3-cd)pyren zbývá podíl asi 16 %. Koeficienty spolehlivosti R^2 pro benzo(b)fluoranten a indeno(1,2,3-cd)pyren jsou však nižší než u naměřených experimentálních dat VEC.

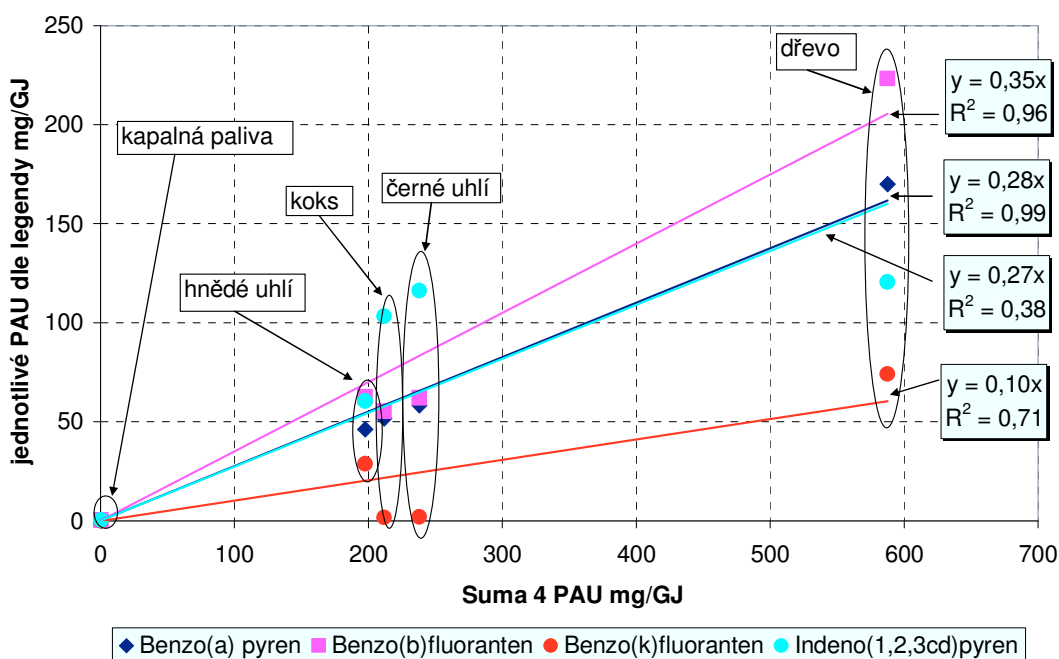


graf č. 45 Vážené poměrové rozdělení PAU dle EEA

Vážené poměrové rozdělení EF ČHMÚ jednotlivých sledovaných PAU zobrazuje graf č. 46. Z něj je možno vyčíst, že ČHMÚ přibližně předpokládá, že

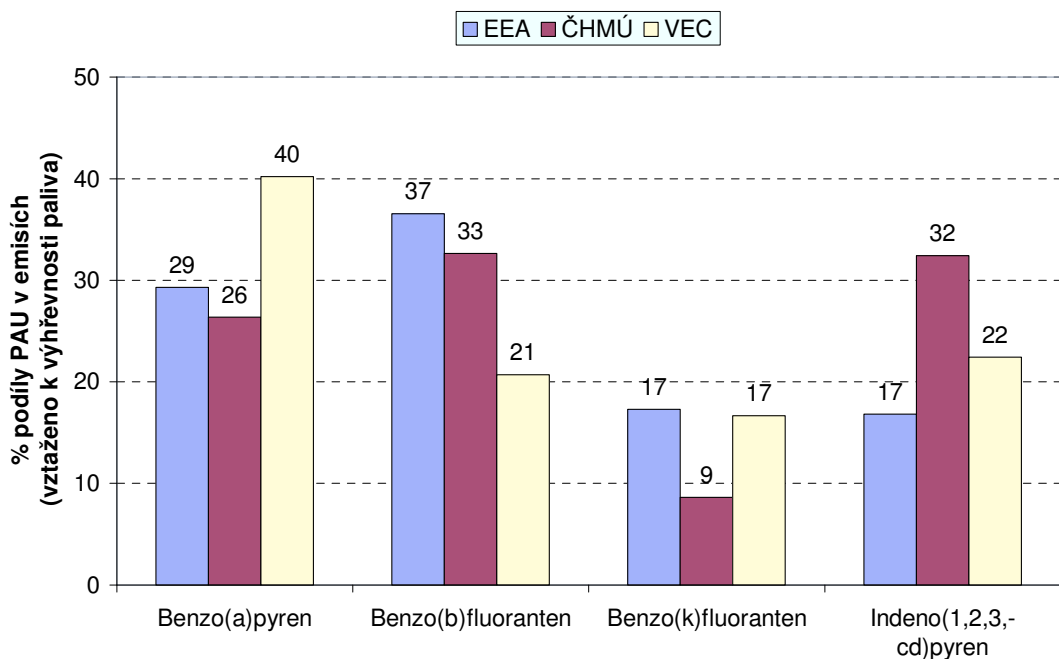
benzo(b)fluoranten zabírá podíl 35 %, přibližně kolem 27 % zabírá benzo(a)pyren a indeno(1,2,3-cd)pyren a nejmenší podíl připadá benzo(k)fluorantenu a to přibližně 10 %. Koeficienty spolehlivosti R^2 jsou vyjma benzo(a)pyrenu benzo(b)fluorantenu o hodně nižší ve srovnání s experimentálními daty VEC i s daty EF dle EEA. Velmi problematickým se

jeví indeno(1,2,3,-cd)pyren, neboť pro koks a černé uhlí jsou jeho podíly velmi vysoké a pro dřevo je jeho podíl dosti nízký.



graf č. 46 Vážené poměrové rozdělení PAU dle ČHMÚ

Shrnutí těchto poznatků uvádí graf č. 47. Dle EEA je dominantním PAU v emisích benzo(b)fluoranten a benzo(a)pyren. Dle ČHMÚ jsou benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranten a indeno(1,2,3,-cd)pyren zastoupeny v emisích přibližně stejně a to kolem 30 %. Dle experimentálních dat VEC je dominantním PAU benzo(a)pyren a ostatní 3 jsou zastoupeny přibližně stejně.



graf č. 47 Vážené poměrové rozdělení PAU dle EEA, ČHMÚ a VEC

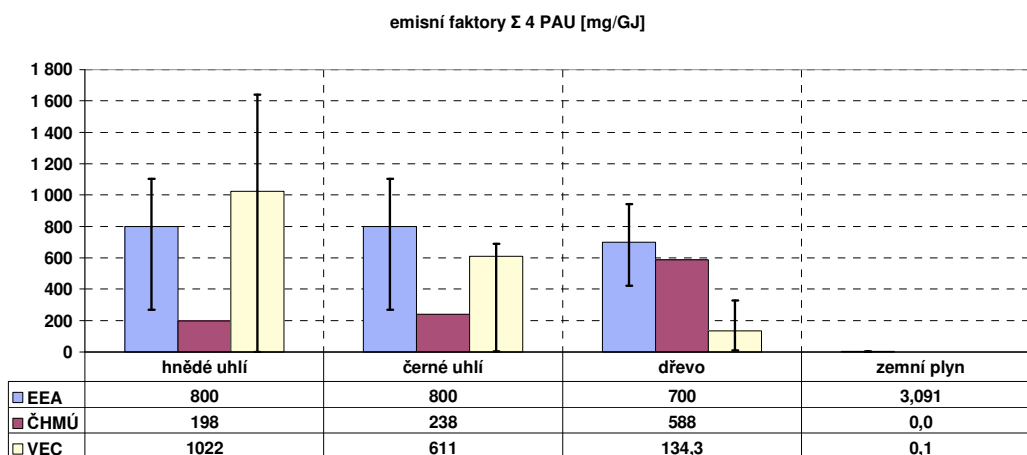
Pro tuhá paliva (bez biomasy) jsou dle EEA navrhovány EF suma 4 PAU v rozsahu od 270 do 1100 mg/GJ se stěžejní hodnotou 800 mg/GJ. Součet EF 4 PAU dle ČHMÚ pro hnědé uhlí nabývá v přepočtu hodnotu 198 mg/GJ. Dle VEC byla stanovena hodnota EF o velikosti 1020 mg/GJ, přičemž na hnědém uhlí byly naměřeny minimální a maximální hodnoty v rozsahu od 1,20 do 1640 mg/GJ.

Pro černé uhlí nabývá součet EF 4 PAU dle ČHMÚ hodnotu po přepočtu 238 mg/GJ. Dle VEC byla stanovena hodnota 611 mg/GJ s rozsahem hodnot od mimima po maximum v rozsahu 2,15 až 690 mg/GJ.

Pro biomasu (dřevo) jsou dle EEA navrhovány EF v rozsahu od 420 do 940 mg/GJ se stěžejní hodnotou 700 mg/GJ. Dle ČHMÚ je součet EF sumy 4 PAU po přepočtu 134 mg/GJ. Dle VEC byla stanovena hodnota EF o velikosti 134 mg/GJ v rozsahu od 9,65 do 328 mg/GJ.

Pro zemní plyn jsou dle EEA doporučovány hodnoty v rozsahu od 1,03 do 3,09 mg/GJ. ČHMÚ nemá EF PAU pro zemní plyn stanoveny. Dle VEC byla pro zemní plyn stanovena hodnota 0,0653 mg/GJ.

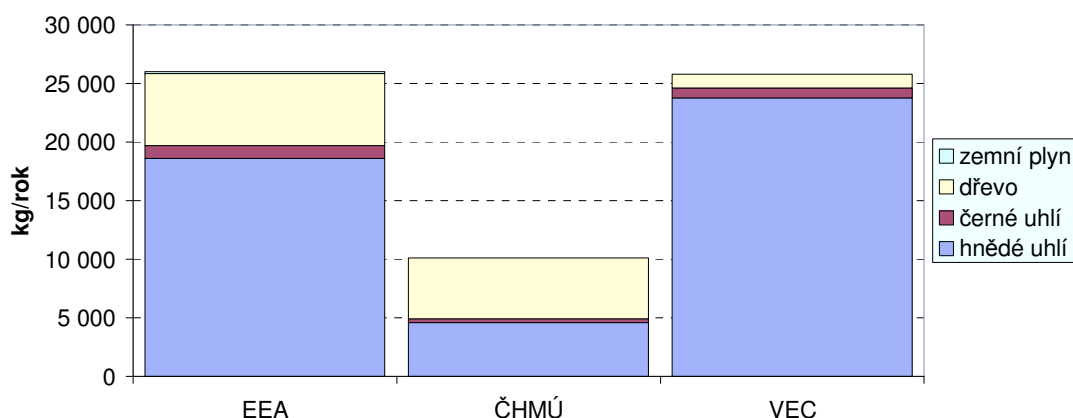
Hodnoty EF sumy 4 PAU pro hnědé uhlí používané ČHMÚ jsou značně podceněny ve srovnání s naměřenými hodnotami dle VEC i ve srovnání s EF dle EEA. Stejná je situace pro černé uhlí. Pro dřevo jsou hodnoty EF dle EEA podobné jako užívané EF dle ČHMÚ, ale EF experimentálně stanovené na VEC jsou výrazně nižší. EF pro zemní plyn jsou o několik řádů nižší v porovnání s EF tuhých paliv.



Legenda: viz. kapitola 5.1.2

graf č. 48 Porovnání EF sumy 4 PAU doporučovaných dle EEA, používaných ČHMÚ a stanovených VEC

Nástin promítání uvedených EF sumy 4 PAU do celkové bilance emisí z domácností v ČR uvádí graf č. 49. Celkové množství emisí sumy 4 PAU je při použití EF EEA a VEC přibližně stejné, jen příspěvky jednotlivých druhů paliv jsou rozdílné. Při použití EF EEA je příspěvek hnědého uhlí nižší než je příspěvek při použití EF VEC a příspěvek dřeva při použití EF EEA je vyšší v porovnání s příspěvkem při použití EF VEC. Celkové množství emisí sumy 4 PAU při použití EF ČHMÚ je v porovnání s ostatními modely přibližně třetinový.



Legenda: viz. kapitola 5.1.3

graf č. 49 Modelový odhad emisí sumy 4 PAU z domácností v ČR za rok 2006 při užití EF EEA, ČHMÚ a VEC

5.10.6 Diskuse a dílčí závěry

- Zařízení starších konstrukcí produkují větší množství PAU než zařízení moderních konstrukcí.
- Dle experimentálních dat lze konstatovat, že kvalita spalovacího procesu značně ovlivňuje množství emisí PAU.
- Dle experimentálních dat VEC bylo zjištěno, že vážené podíly zastoupení jednotlivých sledovaných PAU jsou přibližně stejné pro všechna experimentální data. Největší podíl připadá na benzo(a)pyren cca 40 %, ostatní PAU se o zbývajících 60 % dělí přibližně rovným dílem.
- Stejná analýza pro zjištění podílů sledovaných PAU v emisích byla provedena i z dostupných EF EEA a ČHMÚ. Dle EEA je dominantním PAU v emisích benzo(b)fluoranten a benzo(a)pyren. Dle ČHMÚ jsou benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranten a indeno(1,2,3,-cd)pyren zastoupeny v emisích přibližně stejně a to kolem 30 %. Dle experimentálních dat VEC je dominantním PAU benzo(a)pyren a ostatní 3 jsou zastoupeny přibližně stejně.
- Dle EEA produkují fosilní i biologická paliva podobné množství PAU, dle pozorování na VEC je možno konstatovat, že největší množství PAU je produkováno při spalování hnědého uhlí, při spalování černého uhlí je toto množství nižší a při spalování dřeva je množství PAU nejnižší.
- Užití EF EEA a VEC pro modelový odhad emisí PAU vede k podobným hodnotám celkového množství emisí sumy PCB z domácností v ČR. Stejný modelový odhad při užití EF ČHMÚ dává celkové emise PAU zhruba třetinové.

6 Závěr

6.1 Vliv paliva, konstrukce a výkonu zařízení

Zhodnocení míry vlivu paliva, zařízení a provozního výkonu zařízení pro sledované škodliviny je uvedeno v tab. č. 47. Hodnoty jsou udány jako největší pozorovaný poměr mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou při sledování daného vlivu.

Škodlivina	Vliv paliva	Vliv zařízení	Vliv výkonu zařízení	Nejvýznamnější vliv
CO	9 x	60 x	2 x	Zařízení
NO _x	2 x	3 x	2 x	zařízení
SO _x	7 x	7 x	1 x	Palivo
NMVOC	14 x	704 x	3 x	Zařízení
TZL	20 x	118 x	2 x	Zařízení
PCB	37 x	8 x	9 x	Palivo
PCDD/F	450 x	300 x	6 x	Palivo
HCB	1 900 x	107 x	1550 x	Palivo
Σ 4 PAU	9 x	1373 x	50 x	Zařízení

tab. č. 47 Celkové zhodnocení vlivu paliva, konstrukce zařízení a provozního výkonu pro všechny sledované škodliviny

Množství škodlivin, jejichž vznik závisí především na kvalitě spalování, tzn. CO, NO_x, NMVOC, TZL a PAU je závislé především **na konstrukci zařízení**, ve kterém je palivo spáleno.

Škodliviny, jejichž vznik závisí především **na parametrech použitého paliva**, jsou SO₂, PCB, PCDD/F, HCB. Pro vznik SO₂ je stěžejním parametrem obsah spalitelné síry v palivu. Pro vznik PCB, PCDD/F a HCB je stěžejní obsah chloru v palivu.

Vliv výkonu zařízení na vznik škodlivin je většinou méně výrazný oproti vlivu paliva nebo vlivu zařízení. Přesto vliv výkonu zařízení je do značné míry podobný s vlivem zařízení. Tento předpoklad však dramaticky popírají výsledky stanovené pro HCB.

6.2 Odpovědi na položené otázky

V této chvíli je čas připomenout si otázky položené na samém začátku této práce a formulovat na ně odpovědi.

- *Je vůbec možné věrohodně stanovit bilanci (odhad) emisí znečišťujících látek z malých spalovacích zdrojů?*

Možné to je a k věrohodné bilanci vedou pravděpodobně jen dvě cesty. Jedna je značně nereálná, protože předpokládá měření každého malého zdroje. A druhá, reálnější, měřit pouze nejčastější kombinace paliva a spalovacího zařízení a mít k dispozici přesné statistické údaje o počtech a typech konstrukcí spalovacích zařízení a spotřebách paliv. Tato cesta s sebou nese vyšší nejistotu než přímé měření, ale je mnohem dostupněji realizovatelná.

- *Jsou emisní faktory v současné době používané pro odhad množství emisí z malých spalovacích zdrojů v ČR věrohodné?*

Věrohodnost emisních faktorů v současné době používaných pro stanovení emisí z domácností byla konfrontována s emisními faktory doporučovanými v emission inventory guidebook 2009 a s emisními faktory stanovenými z experimentálních měření. Obecně lze říci, že v některých případech byla pozorována relativní shoda, v některých případech byly pozorovány i řádové rozdíly mezi emisními faktory. Tato práce nedokáže přesně odpovědět na položenou otázku, ale navrhuje cestu, jak jejich věrohodnost zvyšovat.

Pro návrh EF z naměřených experimentálních dat je velmi důležité uvažovat skladbu používaných konstrukcí spalovacích zařízení v ČR. Tyto statistické údaje jsou velmi důležité zejména pro stanovování škodlivin jejichž vznik závisí na kvalitě spalování tzn. CO, NO_x, NMVOC, TZL, PAU.

Skladba spalovacích zařízení uvažovaná v této práci byla odhadnuta dle informací o prodeji kotlů, krbů a topidel do 50kW v ČR od roku 1999 do 2009. Tuto statistiku poskytla Asociace prodejců topenářské techniky. Tento odhad je jediným v současnosti dosažitelným vodítkem. Přesnější informace budou možná k dispozici po dalším Sčítání lidu, domů a bytů v roce 2011.

6.3 Možnosti snižování emisí z malých spalovacích zdrojů

6.3.1 Potenciál zlepšování kvality paliv

Palivová základna fosilních paliv pro malá spalovací zařízení je v ČR víceméně stabilní a zásadní změny nelze očekávat. Zvýšený podíl využívání ušlechtilých paliv a plynu naráží na jejich dostupnost a cenu.

6.3.2 Potenciál zlepšování kvality spalovacího procesu

Spalování tuhých paliv v nových typech spalovacích zařízení (automatické, zplyňovací) produkuje méně znečišťujících látek než spalování stejných paliv v zařízeních starých konstrukcí (prohořivací, odhořivací). Nevýhodou nových typů konstrukcí spalovacích zařízení je jejich vysoká pořizovací cena a nebo vyšší provozní (palivové) náklady.

Kvalita spalovacího procesu se snižuje při provozu zařízení na nižší než jmenovitý výkon a tím roste množství emisí znečišťujících látek. Řešení těchto problémů výrazně pozitivně ovlivňují instalace akumulčních nádob, které umožní provoz spalovacích zařízení při jmenovitém výkonu a tím také ke snížení množství emisí znečišťujících látek. Rozšířené používání akumulčních nádob však také naráží na značné investiční náklady.

V dřívějších dobách byly konstrukce spalovacích zařízení navrhovány s ohledem na maximální jednoduchost a nízké pořizovací a provozní náklady. Tak vznikly dnes již klasické prohořivací a odhořivací konstrukce spalovacích zařízení. Z dnešního pohledu již maximální jednoduchost zařízení není jediným kritériem. Začínají se prosazovat nároky na vysokou účinnost spalovacího procesu, nároky na minimalizaci množství emisí a nároky na komfort obsluhy zařízení. Uspokojení těchto nároků je realizovatelné, avšak značně drahé.

6.3.3 Problematika provozní kázně obsluhy malých spalovacích zařízení

Provozní kázeň u starších typů konstrukcí spalovacích zařízení je značným problémem. V těchto zařízeních je možné pálit téměř jakékoli palivo, včetně spalitelných domovních odpadů. Dalším provozním neduhem je provozování spalovacích zařízení s nedostatečným přívodem spalovacího vzduchu, které sice prodlouží dobu hoření paliva, ale také způsobí zvýšení množství emisí a snížení účinnosti spalování

Moderní kotle jsou vůči provozní kázni obsluhy odolnější, neboť je možné je provozovat pouze na určité konkrétně specifikované druhy paliv a vlastní spalovací proces je často

řízen automatikou. Těmito opatřeními je zvýšen jednak komfort obsluhy, ale také minimalizovány možnosti nevhodných zásahů do spalovacího procesu.

6.4 Využití výsledků této práce

Výsledné hodnoty emisních faktorů uvedené v této disertační práci budou podkladem pro příští aktualizaci emisních faktorů používaných ČHMÚ pro národní inventury emisí ČR. Tato skutečnost je doložena oficiálním dopisem od ČHMÚ, úseku ochrany čistoty ovzduší viz. obr. č. 27.



ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

ÚSEK OCHRANY ČISTOTY OVZDUŠÍ

Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4, tel.: 244 032 400, fax: 244 032 425

PEZ 18/2010

Váš dopis značíte/dne

Naše značka *P104M-091* Vyžuje / linka

V Praze dne

Machálek / 2429

25. června 2010

Prohlášení uživatele výsledků řešení projektu č. SP/1a2/116/07 „Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory“

Český hydrometeorologický ústav je v souladu s § 5, odst. 1 nařízení vlády č. 351/2002 Sb. právníkou osobou, pověřenou zajištěním emisní inventury pro znečišťující látky, pro které jsou v příloze č. 1 k tomuto nařízení stanoveny emisní stropy. Zároveň vykonává funkci Národního kontaktního místa pro vedení, zpracování a předávání emisních inventur podle mezinárodních závazků k Úmluvě o dálkovém znečišťování ovzduší přecházejícím hranice států (CLRTAP).

Součástí prováděných emisních inventur je také bilance emisí z vytápění domácností, která je prováděna výhradně s využitím emisních faktorů, charakteristických pro spalování různých druhů paliv. Pro zpřesnění prováděných inventur je v současnosti připravována úprava používané metodiky. Součástí úprav by měla být také aktualizace používaných emisních faktorů základních znečišťujících látek, částic PM10 a PM2.5, těžkých kovů a persistentních organických látek, jejichž výzkumem se zabývá výše uvedený projekt.

Leaderem řešitelského týmu projektu (počátek řešení v r. 2007) ustanovil profesor Pavel Noskovič, ředitel Výzkumného energetického centra VŠB-TU Ostrava, vedoucího zkušebny Výzkumného energetického centra Jiřího Horáka. Základní členové týmu jsou:

- za VŠB-TU Ostrava: František Hopan, Kamil Krpec, Milan Dej
- za ZÚ Ostrava: Tomáš Ouelka, Tomáš Tomšej
- za AV ČR: Michal Šyc, Vladimír Pekárek

Český hydrometeorologický ústav předpokládá, že získané výstupy budou zpracovány do národní inventury emisí jako příspěvek ke zvýšení její přesnosti, reprezentativnosti a důvěryhodnosti.

S pozdravem


RNDr. Jan Macoun, Ph.D.
náměstek ředitele pro ÚOČO

obr. č. 27

Prohlášení uživatele výsledků řešení projektu č. SP/1a2/116/07

Použitá literatura:

- [1] HERČÍK M., Ochrana životního prostředí a legislativa, Vysoká škola podnikání, Ostrava 2004
- [2] MACHÁLEK P., MACHART J., *Emisní bilance vytápění bytů malými zdroji od roku 2001, ČHMÚ 2003*, [cit. 2010-08-1] Dostupné na [www: <http://www.chmi.cz/uoco/emise/embil/metodika_rezzo3.pdf>](http://www.chmi.cz/uoco/emise/embil/metodika_rezzo3.pdf)
- [3] NV 351/2002 Sb. kterým se stanoví závazné emisní stropy pro některé látky znečišťující ovzduší a způsob přípravy a provádění emisních inventur a emisních projekcí
- [4] příloha č. 2 NV 205/2009 Sb. - Vyhláška o zjišťování emisí ze stacionárních zdrojů a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší - pro hlavní znečišťující látky
- [5] *Katalog uhlí Severočeské Doly a.s.*, [cit. 2010-08-1] Dostupné na [www: <http://www.sdas.cz/files/sdas/Kataloguhli2009/Katalog_SD_2009.pdf>](http://www.sdas.cz/files/sdas/Kataloguhli2009/Katalog_SD_2009.pdf)
- [6] *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*, [cit. 2010-08-1] Dostupné na [www: <http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/en/Toolkit_2005_En.pdf>](http://www.pops.int/documents/guidance/toolkit/en/Toolkit_2005_En.pdf)
- [7] US EPA Method 5G Determination of particulate matter emissions from wood heaters (dilution tunnel sampling location), [cit. 2010-08-1] Dostupné na [www: <http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05g.pdf >](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05g.pdf)
- [8] AS NZS 4012-1999 Domestic solid fuel burning appliance - Method for determination of power output and efficiency
- [9] CEN/TC 295/WG5 27.9.2006 (15.10.2008) Residential solid fuel burning appliances Test Method, Preliminary draft of TS on particulate emission test method
- [10] ČSN ISO 10396:1998 Stacionární zdroje emisí - Odběr vzorků pro automatizované stanovení koncentrací plyných složek
- [11] ČSN ISO 9096:1998 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí - Manuální gravimetrická metoda
- [12] ČSN EN 1948-1:2006 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace PCDD/PCDF a dioxinům podobných PCB - Část 1: Vzorkování PCDD/PCDF
- [13] ČSN EN 15058:2007 Stacionární zdroje emisí - Stanovení oxidu uhelnatého (CO) - Referenční metoda - Nedisperzní infračervená spektrometrie
- [14] ČSN ISO 10849:1998 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace emisí oxidů dusíku - Charakteristiky automatizovaných měřicích metod
- [15] ČSN ISO 7935:1998 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace emisí oxidu siřičitého - Charakteristiky automatizovaných měřicích metod
- [16] ČSN EN 12619:2000 Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hodnot hmotnostní koncentrace celkového plyného organického uhlíku ve spalinách - Kontinuální metoda využívající plamenového ionizačního detektoru
- [17] ČSN EN 1948-2:2007 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace PCDD/PCDF a dioxinům podobných PCB - Část 2: Extrakce a čištění PCDD/PCDF
- [18] ČSN EN 1948-3:2007 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace PCDD/PCDF a dioxinům podobných PCB - Část 3: Identifikace a stanovení PCDD/PCDF

- [19] ČSN EN 1948-4:2008 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace PCDD/PCDF a dioxinům podobných PCB - Část 4: Vzorování a analýza dioxinům podobných PCB
- [20] Zákon č. 309/1991 Sb. o ochraně ovzduší před znečišťujícími látkami
- [21] *Národní program snižování emisí České republiky*, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <http://www.mzp.cz/cz/narodni_program_snizovani_emisi>
- [22] *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007 Group 2: Non-industrial combustion plants*, , [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5/B216v2.pdf> >
- [23] Quass U, Fermann N, Broker G. *Chemosphere*, 54:1319, 2004
- [24] Viadrus hercules U26, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <[http://viadrus.cz/web/structure/kotle-na-tuha-paliva-80.html?do\[loadData\]=1&itemKey=cz_10](http://viadrus.cz/web/structure/kotle-na-tuha-paliva-80.html?do[loadData]=1&itemKey=cz_10) >
- [25] Dakon DOR 32, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.dakon.cz/cs/DOR.html>>
- [26] Atmos C20 S, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.atmos.cz/czech/kotle-002-zplynovaci-kotle-na-uhli-drevo>>
- [27] Benekov Ling 25, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://benekov.cz/cs/produkty/benekov-l-25>>
- [28] Romotop krbová kamna ETNA, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.romotop.cz/krbove-kamna-storch/etna>>
- [29] Viadrus plynový kotel G27 ECO GL (kotel se již nevyrábí, odkaz na novější model kotle) , [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <[http://viadrus.cz/web/structure/stacionarni-kotle-70.html?do\[loadData\]=1&itemKey=cz_1](http://viadrus.cz/web/structure/stacionarni-kotle-70.html?do[loadData]=1&itemKey=cz_1)>
- [30] *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009 - Part B - 1. A.4. small combustion*, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion-tfeip-endorsed-draft.pdf>>
- [31] Bardoděj, Z.: *Chemie v hygieně a toxikologii*. LFH UK, Praha 1988, s. 43.
- [32] *Carbon Monoxide - International Programme on Chemical Safety - Environmental Health Criteria 213*, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc213.htm>>
- [33] Michael A. Marletta. *ENCYCLOPEDIA OF BIOLOGICAL CHEMISTRY, FOUR-VOLUME SET*, 1-4. Příprava vydání Lennarz, W.J., Lane, M.D.. [s.l.] : [s.n.]. Kapitola Nitric Oxide Signaling
- [34] *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*, Report on a WHO Working Group Bonn, Germany 13–15 January 2003, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.euro.who.int/Document/e79097.pdf>>
- [35] Informace o látkách ohlašovaných do IRZ, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://irz.cz/obsah/ohlasovane-latky> >
- [36] Manfred Rossberg et al. “Chlorinated Hydrocarbons” in Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry Wiley-VCH, Weinheim, 2006
- [37] Nařízení vlády č. 354/2002 Sb. kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu

- [38] Polychlorované bifenyly, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://www.toxik.arnika.org/chemicke-latky/polychlorovane-bifenyly-pcb>>
- [39] Wikipedia benzo(a)pyren, [cit. 2010-08-1] Dostupné na www: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Benzo%28a%29pyren>>
- [40] Holoubek I. : *Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs) v prostředí.*, Český ekologický ústav a Obor ekologických rizik a monitoringu MŽP ČR, Praha, 1996. ISBN 80-85087-340-0
- [41] HORÁK J., MACHÁLEK P. a kol. , *Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory díl I.* ISBN 978-80-248-1816-0, Ostrava 2008
- [42] 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
- [43] ČSN EN 13 229 – Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva - Požadavky a zkušební metody
- [44] ČSN EN 13 240 – Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů - Požadavky a zkušební metody
- [45] OCHODEK T., KOLONIČNÝ J., BRANC M., *Ekologické aspekty záměny fosilních paliv za biomasu*, ISBN 978-80-248-1595-4, Ostrava 2007
- [46] Pandelova, M., Stanev, I., Henkelmann, B., Lenoir, D., Schramm, K.W., Correlation of PCDD/F and PCB at combustion experiments using wood and hospital waste. Influence of (NH₄)₂SO₄ as additive on PCDD/F and PCB emissions, Chemosphere, Volume 75, Issue 5, May 2009, Pages 685-691

Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu dizertace:

- {1} Horák, J., Machálek, P., Krpec, K., Hopan, F., Dej, M., Kubačka, M., Branc, M., Ocelka, T., Šyc, M., Pekárek, V., Tomšej, T., Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory - díl I, 2008, roč. 1, ISSN-ISBN978-80-248-1816-0
- {2} Hopan, F., Šyc, M., Horák, J.; Dej, M.; Krpec, K., Ocelka, T., Tomšej, T., Pekárek, V., Emission factors of selected organic compounds from Domestic hardwood combustion. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada strojní. 2009, roč. LV, č. 3, s. 81-85. ISSN: 1210-0471.
- {3} Horák, J., Hopan, F., Dej, M., Krpec, K., Šyc, M., Ocelka, T., Tomšej, T., Pekárek, V., Emisní faktory znečišťujících látek ze spalování hnědého uhlí ve spalovacích zařízeních malých výkonů., Zpravodaj Hnědé uhlí. 2009, roč. 2009, č. 4, s. 37-40. ISSN: 1213-1660.
- {4} Horák, J., Hopan, F., Může jedna vesnice vyprodukovat tolik dioxinů jako velká spalovna odpadů?, Topenářství - instalace. 2009, roč. 2009, č. 6, s. 36-38. ISSN: 1211-0906.
- {5} Horák, J., Krpec, K., Hopan, F., Tvorba PAU při spalování dřeva a uhlí v malých zdrojích znečišťování, Technológ. 2009, roč. 1, č. mimořádné, s. 5-10. ISSN: 1337-8996.
- {6} Horák, J., Hopan, F., Krpec, K., Dej, M., Kubačka, M., Pekárek, V., Šyc, M., Ocelka, T., Tomšej, T., Machálek, P., Stanovení emisních faktorů pro spalování tuhých paliv ve spalovacích zařízeních provozovaných v domácnostech, Topenářství - instalace. 2009, roč. 2009, č. 7, s. 26-28. ISSN: 1211-0906.
- {7} Horák, J., Machálek, P., Hopan, F., Krpec, K., Dej, M., Pekárek, V., Ocelka, T., Šyc, M., Tomšej, T., Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů znečišťování a jejich emisní faktory., Ochrana ovzduší. 2008, roč. 21, č. 5-6, s. 38-41., ISSN: 1211-0337.
- {8} Hopan, F., Horák, J., Dej, M., Krpec, K., Šyc, M., Ocelka, T., Tomšej, T., Pekárek, V., Emission factors of pollutants from the combustion of brown coal in domestic appliances. Organohalogen Compounds. 2009, roč. Vol.71,2009, s. 699-702.
- {9} Horák, J., Hopan, F., Může jedna vesnice vyprodukovat tolik dioxinů jako velká spalovna odpadů?, Ochrana ovzdušia 2008. 2008, s. 116-119.
- {10} Horák, J., Hopan, F., Krpec, K., Dej, M., Kubačka, M., Pekárek, V., Šyc, M., Ocelka, T., Machálek, P., Tomšej, T., Determination of emission factor for combusting solid fuels in residential combustion appliances., Organohalogen Compounds. 2008, roč. 70, s. 2470-2473.
- {11} Hopan, F., Horák, J., Krpec, K., Dej, M., Branc, M., Tomšej, T., Ocelka, T., Šyc, M., Pekárek, V., Srovnání produkce dioxinů a furanů pro různá paliva spalovaná v 25 kW automatickém kotli, Zborník konferencie OCHRANA OVZDUŠIA 2009. 2009, roč. 2009, s. 118-121.
- {12} Horák, J., Krpec, K., Hopan, F., Dej, M., Koloničný, J., Tomšej, T., Machálek, P., Tvorba PAU při spalování dřeva a uhlí v malých zdrojích znečišťování, Ovzduší 2009. 2009, roč. 9, s. 79-83.
- {13} Šyc, M., Horák, J., Hopan, F., Dej, M., Krpec, K., Ocelka, T., Tomšej, T., Pekárek, V., Emission factors of selected organic compounds from domestic hardwood combustion., Organohalogen Compounds. 2009, roč. Vol.71,2009, s. 148-151.