

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra bezpečnosti práce a procesů

**Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích
zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu
bezpečnosti nanočástic**

Disertační práce

pro získání akademického titulu „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

Autor:	Ing. et Ing. Vendula Drastichová
Školitel:	doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.
Konzultant:	Ing. Jiří Horák, Ph.D.
Studijní program:	Požární ochrana a průmyslová bezpečnost
Studijní obor:	Požární ochrana a bezpečnost

Ostrava, 12. května 2015

ABSTRAKT

DRASTICHOVÁ, Vendula. *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic*. Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.

Svět se v dnešní době potýká s globálním problémem znečištění ovzduší a s jeho nepříznivými dopady na zdraví obyvatelstva. Tuhé znečišťující látky (TZL) v ovzduší ovlivňují člověka mnohem více než jiné škodliviny v tomtéž prostředí (například SO_x , NO_x). V devadesátých letech minulého století bylo dosaženo významného zlepšení kvality ovzduší v ČR. Avšak v mnohých, zejména dopravou a průmyslem silně zatížených oblastech (například některé oblasti Moravskoslezského kraje) jsou stále překračovány imisní limity pro ochranu zdraví obyvatelstva. Zdroje TZL v ovzduší jsou zejména spalovací procesy. Z těchto zdrojů jsou významnými zástupci v produkci TZL malá spalovací zařízení (MSZ). Problémem MSZ je nízká výška komínů, která způsobuje hromadění TZL v dýchací zóně obyvatelstva i skutečnost, že tato zařízení nemají prakticky žádné čištění spalin (filtry) a neplatí pro ně obdobné kontrolní a regulační mechanismy jako pro velké zdroje znečišťování ovzduší, které jsou z velké části kontrolovány kontinuálně. Ze zdravotního hlediska je zde blízká vazba kvantitativního vztahu mezi expozicí vysoké koncentrace částic PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ a vzrůstajícího počtu onemocnění či úmrtí [3]. Částice menších velikostí mohou být rizikovější než částice větších rozměrů, protože pronikají hlouběji do dýchacího systému a bylo zjištěno [2],[57], že ultrajemné částice (částice menší než 100 nm) jsou schopny aktivně pronikat přímo do krevního řečiště. S rozvojem toxikologických znalostí o ultrajemných částicích (nanočásticích) se ubírá pozornost na jejich možná rizika pro lidské zdraví.

Pochopení vztahu mezi množstvím emisí, jejich fyzikálně-chemickými vlastnostmi a biologickou aktivitou jsou velmi důležité při navrhování a zavádění efektivních opatření pro snížení rizik exponovaného obyvatelstva. Cíl disertační práce se zaměřil na stanovení měrných emisí (ME) TZL, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1 , $\text{PM}_{0,1}$ (ultrajemných částic) ze spalování tuhých paliv v malých spalovacích zařízeních při běžném provozu v domácnostech - při jmenovitém a sníženém výkonu a při spalování různých druhů paliv. Byla vyvinuta vhodná a v praxi využitelná metoda odběru jednotlivých velikostních frakcí částic pro stanovení, jak hmotnostní, tak početní koncentrace částic ($\text{PM}_{0,1}$ - PM_{10}). Z dvaceti pěti provedených spalovacích zkoušek vychází, že procentuálně v PM_{10} jsou ultrajemné částice (UFP) zastoupeny v průměru 8 %_{hm.} a frakce PM_1 je zastoupena v průměru 90 %_{hm.} Při porovnání početní a hmotnostní koncentrace částic vychází, že procentuálně jsou ultrajemné částice v PM_1 zastoupeny v průměru 65 %_{poč.} a 10 %_{hm.} Absolutní hodnoty ME tuhých znečišťujících látek a ME jednotlivých velikostních frakcí jsou mnohem vyšší u kotlů staršího typu spalování (prohořivací a odhořivací kotle). U novějších typů spalovacích zařízení (automatické a zplyňovací kotle) je snížení ME TZL velmi výrazné. Avšak hodnoty ME $\text{PM}_{0,1}$ zůstaly v průměru stejné.

S ohledem na získané výsledky je potřeba se i nadále zaměřit na charakterizaci malých spalovacích zařízení se zaměřením na jemné a ultrajemné částice. Zjišťovat fyzikálně-chemické vlastnosti těchto částic pro rozšíření informací o jejich míře toxicity a využít toxikologické testy, neboť některé látky mohou být silně biologicky aktivní i při nízkých koncentracích přítomných škodlivin.

Klíčová slova: Tuhé znečišťující látky; ultrajemné částice; malá spalovací zařízení; tuhá paliva.

ABSTRACT

DRASTICHOVÁ, Vendula. *Measurement of emissions of ultrafine particles from small combustion equipments with regard to new findings from research on the safety of nanoparticles*. Ostrava, 2015. Dissertation thesis. VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering. Supervisor: doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.

The world today is facing a global problem of air pollution and its adverse impacts on human health. Total suspended particles (TSP) in the atmosphere influence man much more than other harmful substances in the same environment (e.g. SO_x, NO_x). In the nineties, a significant improvement in air quality in the Czech Republic was achieved. However, many, particularly transport and industry heavily loaded areas (e.g. some Moravian-Silesian regions), still exceed the value limits for the protection of public health. Sources of TSP in ambient air are mainly from combustion processes. These sources are important agents in the production of TSP of small combustion equipment (SCE). The SCE problem is the low height of the chimney, which causes an accumulation of solid pollutants in the breathing zone of the population, and the fact that these devices have virtually no exhaust gas purification (filters), and do not operate similar supervisory and regulatory frameworks as large combustion sources of air pollution, whose parts are controlled continuously. From a health perspective, there is a close link in the quantitative relationship between exposure to high concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} and the growing number of illnesses and deaths [3]. Particles of smaller size may be more risky than larger particle sizes, as they penetrate deeper into the respiratory system. It was found [2],[57] that the ultrafine particles (particles smaller than 100 nm) are able to actively penetrate directly into the bloodstream. With the development of toxicological knowledge about ultrafine particles (nanoparticles), attention to their potential risks to human health is falling.

Understanding the relationship between the amounts of emissions, their physicochemical properties, and biological activity are very important when designing and implementing effective measures to reduce the risk of exposure to the population. The objective of the dissertation thesis is focused on determining the specific emissions (SE) TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, PM_{0.1} (ultrafine particles), from the combustion of solid fuels in small combustion equipment in normal operation in households - at nominal and reduced power, and during the combustion of different types of fuels. A suitable and practical usable method of taking individual particle size fractions to determine both the mass and number concentration of particles (PM_{0.1} - PM₁₀) was developed. From the twenty five combustion tests performed, based on the percentage of PM₁₀, ultrafine particles (UFP) represented an average of 8%_{wt.}, and PM₁ fraction is represented by an average of 90%_{wt.}. When comparing numerical and mass concentrations of particles based on the percentage of the ultrafine particles in the PM₁, they represented on average 65%_{num.} amount and 10%_{wt.}. Absolute values of SE TSP and SE individual particle sizes are much higher among older types of combustion equipment (burners and incinerators). The newer types of combustion devices (automatic and gasification burners) reduce the SE of SCE very significantly. However, the value of the SE PM_{0.1} average remained the same. With regard to the results obtained, it is necessary to continue to concentrate on the characterization of small combustion equipments with a focus on fine and ultrafine particles. Identifying the physico-chemical properties of these particles to spread information about their level of toxicity and toxicological tests should be used, as some substances can be biologically highly active even when low concentrations of pollutants are present.

Key words: Total suspended particles; ultrafine particles; small combustion equipments; solid fuels.

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracovala samostatně podle pokynů školitele s použitím literatury uvedené v soupisu bibliografických citací a v souladu se Studijním řádem.

V souladu s § 47b zákona 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním celé disertační práce prostřednictvím informačního systému VŠB - TU Ostrava umožňujícího dálkový přístup.

Jsem seznámena s tím, že na mou disertační práci se vztahuje zákon 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že VŠB - TU Ostrava nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu VŠB - TU Ostrava (§ 35 odst. (3) zákona 121/2000 Sb. v platném znění).

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti VŠB - TU Ostrava; v tomto případě má VŠB - TU Ostrava právo požadovat ode mne úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše (§ 60 odst. (3) zákona 121/2000 Sb. v platném znění).

V Ostravě 12. 5. 2015

Ing. et Ing. Vendula Drastichová

MOTIVACE

Motivací pro sepsání disertační práce se zaměřením na produkci ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení bylo možné propojení dvou vystudovaných oborů, a to Bezpečnostního inženýrství na Fakultě bezpečnostního inženýrství a Energetických strojů a zařízení se zaměřením na parní kotle na Fakultě strojní, VŠB - TU Ostrava. Další motivací bylo zapojení se do výzkumného projektu v letech 2013 - 2014, který se zabýval bezpečností energetických zařízení i používaných paliv. V duchu tématu projektu jsem se věnovala výzkumu zaměřujícímu se na produkci jednotlivých velikostních frakcí částic z různých typů malých spalovacích zařízení.

Mezi důvody, které mě vedly ke zpracování disertační práce, se řadí:

- zájem o emise z malých spalovacích zařízení, které mají vliv, jak na zdraví obyvatelstva, tak na životní prostředí,
- doplnění chybějících dat o množství a procentuálním zastoupení jednotlivých velikostních frakcí částic menších než 10 μm v emisích z malých spalovacích zařízení, které budou sloužit pro aktualizaci používaných emisních faktorů a získání odborných podkladů pro zdokonalení metodik, které budou určeny pro výkon státní správy a povedou ke zkvalitnění rozhodovacích, hodnotících a řídicích procesů.

Práce vznikla za finanční podpory:

- projektu MŠMT ČR Inovace pro efektivitu a životní prostředí (CZ.1.05/2.1.00/01.0036),
- projektů specifického vysokoškolského výzkumu - i) Emise nanočástic z malých spalovacích zařízení s ohledem na distribuci škodlivin (SP2013/199); ii) Měrné emise znečišťujících látek a provozní vlastnosti malých spalovacích zdrojů (SP2014/125); iii) Emise jemných částic z antropogenních činností - vytápění domácností, brzdné procesy automobilů (SP2015/132),
- projektu MŠMT ČR Expozice nanomateriálům, hodnocení a management zdravotních rizik v souvislosti s QSAR/QNTR (LD14041).

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala své školitelce doc. Ing. Ivaně Bartlové, CSc. a Ing. Jirímu Horákovi, Ph.D. za cenné rady a odborné a věcné připomínky při psaní disertační práce. Všem lidem, kteří se jakýmkoliv způsobem podíleli na realizaci této disertační práce. Velké poděkování patří mému příteli a rodině, za jejich pochopení, povzbuzení a důvěru.

OBSAH

SEZNAM GRAFŮ	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM PŘÍLOH.....	14
SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A ZNAČEK.....	15
ÚVOD.....	16
CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	19
Teoretická část	20
1 NOVÉ POZNATKY Z VÝZKUMU BEZPEČNOSTI NANOČÁSTIC	20
1.1 Identifikace nebezpečnosti nanočástic (ultrajemných částic)	21
1.2 Hodnocení vztahu dávka-účinek nanočástic (ultrajemných částic)	22
1.3 Hodnocení expozice nanočástic (ultrajemných částic)	23
2 KONTAMINACE OVZDUŠÍ ČÁSTICEMI	24
2.1 Tvorba tuhých znečišťujících látek	24
2.1.1 Tvorba sazí.....	26
2.1.2 Tvorba organických částic	27
2.1.3 Tvorba částic popílku.....	27
2.2 Účinky nanočástic (ultrajemných částic) na zdraví	28
2.2.1 Příjem a depozice nanočástic (ultrajemných částic) v dýchacím ústrojí	28
2.2.2 Působení nanočástic (ultrajemných částic) v těle člověka a obranné reakce organismu	29
2.2.3 Faktory ovlivňující toxické účinky nanočástic (ultrajemných částic)	29
2.3 Zdroje znečištění ovzduší	30
2.4 Regulace emisí znečišťujících látek z malých spalovacích zařízení v ČR a ve světě.....	31
2.5 Odběr a stanovení emisí z malých spalovacích zařízení	33
2.5.1 Odběr TZL z malých spalovacích zařízení	33
2.5.2 Vzorkování a příprava vzorků k analýze PAHs.....	35
2.5.3 Analýza PAHs.....	35
3 POUŽITÁ SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ	36
3.1 Automatický kotel Benekov V-Ling 25	36
3.2 Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S.....	36
3.3 Zplyňovací kotel Atmos DC25GS	37

3.4	Odhořivací kotel Dakon DOR32S	38
3.5	Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26	38
4	POPIS ODBĚROVÝCH APARATUR, ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ A VÝPOČTU ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK	39
4.1	Stanovení složení spalin za spalovacím zařízením a v ředícím tunelu	39
4.2	Stanovení koncentrace jednotlivých složek obsažených ve spalinách.....	40
4.3	Stanovení množství spalin.....	40
4.3.1	Dle množství a složení paliva	40
4.3.2	Dle měření rychlosti spalin v ředícím tunelu.....	41
4.4	Stanovení výkonu teplovodního kotle a účinnosti spalovacího zařízení	42
4.4.1	Stanovení nepřímé účinnosti spalovacího zařízení.....	42
4.4.2	Stanovení přímé účinnosti spalovacího zařízení.....	45
4.5	Stanovení jednotlivých velikostních frakcí částic a adsorbovaných PAHs	46
4.5.1	Stanovení hmotnostní koncentrace částic	46
4.5.2	Stanovení početní koncentrace částic	50
4.5.3	Detekce a stanovení hmotnostní koncentrace PAHs	51
4.6	Možnosti vyjádření množství emisí znečišťujících látek.....	52
	Praktická část.....	53
5	POUŽITÁ PALIVA.....	53
6	PROVÁDĚNÉ SPALOVACÍ ZKOUŠKY.....	55
6.1	Automatický kotel Benekov V-Ling 25	55
6.1.1	Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon	56
6.1.2	Pelety - jmenovitý a snížený výkon.....	57
6.2	Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S.....	57
6.2.1	Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon	59
6.2.2	Palivo MIX -jmenovitý a snížený výkon.....	59
6.3	Zplyňovací kotel Atmos DC25GS	61
6.3.1	Mokrý smrkové dřevo - jmenovitý a snížený výkon	63
6.4	Odhořivací kotel Dakon DOR32 s	63
6.4.1	Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon	65
6.4.2	Palivo MIX - jmenovitý a snížený výkon.....	66
6.4.3	Mokrý smrkové dřevo - snížený výkon	67
6.4.4	Suché smrkové dřevo - jmenovitý a snížený výkon	68

6.5	Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26	69
6.5.1	Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon	72
6.5.2	Palivo MIX - jmenovitý a snížený výkon	73
6.5.3	Mokrý smrkové dřevo - jmenovitý a snížený výkon	74
6.5.4	Suchý smrkové dřevo - jmenovitý a snížený výkon	75
7	VÝSLEDKY SPALOVACÍCH ZKOUŠEK	77
7.1	Porovnání hmotnostních koncentrací a měrných emisí jednotlivých velikostních frakcí částic naměřených impaktorem a cyklonem	79
7.2	Početní koncentrace částic naměřená SMPS	93
7.3	Detekce a porovnání hmotnostních koncentrací PAHs na PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁ a PM _{0,1}	106
	ZÁVĚR	113
	CONCLUSION	115
	SOUPIS BIBLIOGRAFICKÝCH CITACÍ	117
	PŘÍLOHA A Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotlů	124
	SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ AUTORA	149

SEZNAM GRAFŮ

graf č. 1 Ztráta sdílením tepla do okolí [88]	45
graf č. 2 Porovnání měrných emisí TZL stanovených pomocí odběru cyklonem a impaktorem.....	80
graf č. 3 Porovnání měrných emisí PM ₁₀ stanovených pomocí odběru cyklonem a impaktorem.....	81
graf č. 4 Porovnání měrných emisí PM _{2,5} stanovených pomocí odběru cyklonem a impaktorem.....	82
graf č. 5 Procentuální zastoupení PM _{2,5} v PM ₁₀ při odběru cyklonem a impaktorem	83
graf č. 6 Procentuální zastoupení jednotlivých velikostních frakcí částic ve frakci PM ₁₀ ..	84
graf č. 7 Porovnání hmotnostní koncentrace PM _{0,1} a PM ₁ , odebráno pomocí impaktoru DLPI.....	89
graf č. 8 Měrné emise velikostní frakce PM _{0,1} , pokrytí odběru impaktorem menší než 50 % - vyznačeno šrafovaně.....	90
graf č. 9 Měrné emise velikostní frakce PM ₁ , pokrytí odběru impaktorem menší než 50 % - vyznačeno šrafovaně.....	91
graf č. 10 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - hnědé uhlí.....	95
graf č. 11 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - MIX.....	97
graf č. 12 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - Mokré smrkové dříví	99
graf č. 13 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - suché smrkové dříví	101
graf č. 14 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - dřevěné pelety ..	103
graf č. 15 Porovnání hmotnostních koncentrací 4 PAHs na PM ₁₀ , odběr cyklonem a impaktorem.....	110
graf č. 16 Porovnání hmotnostních koncentrací 4 PAHs na PM _{2,5} , odběr cyklonem a impaktorem.....	111

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. č. 1 PM _{2,5} ve střední Evropě [5]	16
obr. č. 2 Hodnocení a řízení rizik [27]	21
obr. č. 3 Hodnocení rizik [27],[28]	23
obr. č. 4 Idealizovaná velikostní distribuce částic, která by mohla být pozorována v silniční dopravě. Částice rozdílných velikostí, tvořeny ve čtyřech módech: nukleačním, aitkenovým, akumulacním módu a módu hrubých částí. Zobrazny jsou také hlavní formační a růstové mechanismy čtyř módů okolní částic $V = \text{objem}$, $D_p = \text{Stokesův průměr částic}$ [38]	25
obr. č. 5 Tvorba částic při spalování [48]	26
obr. č. 6 Depozice částic v dýchacím traktu člověka [53]	28
obr. č. 7 Schéma ředícího tunelu	34
obr. č. 8 Automatický kotel Benekov V-Ling 25 [81]	36
obr. č. 9 Zplyňovací kotel Atmos C20S [82]	37
obr. č. 10 Zplyňovací kotel Atmos DC25GS [82]	37
obr. č. 11 Odhořívací kotel Dakon DOR32 s [83]	38
obr. č. 12 Viadrus Hercules U26 [84]	38
obr. č. 13 Odběr TZL a PM _x pomocí impaktoru DLPI a cyklonu	47
obr. č. 14 Nízkotlaký kaskádový impaktor DLPI [89]	47
obr. č. 15 Měření na principu urychlení aerosolových částic v proudu vzduchu [89]	48
obr. č. 16 Nástřík sprejem DEKATI	48
obr. č. 17 Folie nastříkány sprejem DEKATI a vloženy do sběrných kroužků	48
obr. č. 18 Mikrováha Mettler Toledo XP6	48
obr. č. 19 Přetížení impaktoru DLPI	49
obr. č. 20 Odběr TZL pomocí cyklonu	49
obr. č. 21 a) Sestava cyklonu, b) a c) Rozebraný cyklon a jeho oplachy po měření	49
obr. č. 22 Skenovací třídič pohyblivosti částic: a) diferenciální analyzátor pohyblivosti, b) kondenzační čítač částic [91],[92]	50
obr. č. 23 Speed - Extractor E916, Buchi Labortechnik	51
obr. č. 24 Analýza PAHs metodou GC/MS	51
obr. č. 25 Příprava PET brikety	53
obr. č. 26 Kotel Benekov V-Ling 25 při zkouškách na zkušebně VĚC	56
obr. č. 27 Kotel Atmos kombi C20S při zkouškách na zkušebně VEC	58
obr. č. 28 Palivo MIX ve spalovací komoře, Atmos kombi C20S	60

obr. č. 29 Kotel Atmos DC25GS při zkouškách na zkušební VEC	62
obr. č. 30 Kotel Dakon DOR32 s při zkouškách na zkušební VEC.....	63
obr. č. 31 Kotel Dakon DOR32 s, přívod sekundárního spalovacího vzduchu	65
obr. č. 32 Kotel Dakon DOR32 s, palivo MIX v násypce	66
obr. č. 33 Kotel Dakon DOR32 s, hořící olej v popelníku, palivo MIX, snížený výkon	67
obr. č. 34 Kotel Viadrus Hercules U26, kouř ve spalovací komoře po přiložení paliva	69
obr. č. 35 Kotel Viadrus Hercules U26 při zkouškách na zkušební VEC.....	70
obr. č. 36 Kotel Viadrus Hercules U26, hořící olej v popelníku, palivo MIX.....	73

SEZNAM TABULEK

tab. č. 1 Normy pro izokinetický odběr prachu a PAHs ze stacionárních zdrojů	33
tab. č. 2 Rozbor použitých paliv	54
tab. č. 3 Složení použitých paliv, Benekov V-Ling 25	55
tab. č. 4 Naměřené a vypočtené hodnoty, Benekov V-Ling 25, hnědé uhlí při jmenovitém a sníženém výkonu	56
tab. č. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty, Atmos kombi C20S, hnědé uhlí a směs paliva při jmenovitém a sníženém výkonu	58
tab. č. 6 Složení hnědé uhlí, Atmos kombi C20S	59
tab. č. 7 Složení paliva MIX, Atmos kombi C20S, jmenovitý výkon	60
tab. č. 8 Složení paliva MIX, Atmos kombi C20S, snížený výkon	61
tab. č. 9 Složení mokrého smrkového dřeva, Atmos DC25GS	61
tab. č. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty, Atmos DC25GS	62
tab. č. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty, Dakon DOR32 s	64
tab. č. 12 Složení hnědé uhlí, Dakon DOR32 s	65
tab. č. 13 Složení paliva MIX, Dakon DOR32 s, jmenovitý výkon	66
tab. č. 14 Složení paliva MIX, Dakon DOR32 s, snížený výkon	67
tab. č. 15 Složení mokrého smrkového dřeva, Dakon DOR32 s	67
tab. č. 16 Složení suchého smrkového dřeva, Dakon DOR32 s	68
tab. č. 17 Naměřené a vypočtené hodnoty, Viadrus Hercules U26	71
tab. č. 18 Složení hnědé uhlí, Viadrus Hercules U26	72
tab. č. 19 Složení paliva MIX, Viadrus Hercules U26, jmenovitý výkon	73
tab. č. 20 Složení paliva MIX, Viadrus Hercules U26, snížený výkon	74
tab. č. 21 Složení mokrého smrkového dřeva, Viadrus Hercules U26	74
tab. č. 22 Složení suchého smrkového dřeva, Viadrus Hercules U26	75
tab. č. 23 Měrné emise TZL, PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁ a PM _{0,1}	78
tab. č. 24 Stanovení EF TZL při spalování HU a biomasy dle metodiky [93]	86
tab. č. 25 Porovnání ME PM _{0,1} [mg/MJ] v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování	92
tab. č. 26 Porovnání procentuálního zastoupení PM _{0,1} v TZL[%] v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování	93
tab. č. 27 Početní koncentrace PM _{0,1} a PM ₁ [# /cm ³] při spalování hnědé uhlí	94
tab. č. 28 Početní koncentrace PM _{0,1} a PM ₁ [# /cm ³] při spalování paliva MIX (směs paliv)	96

tab. č. 29 Početní koncentrace $PM_{0,1}$ a PM_1 [$\#/cm^3$] při spalování mokrého smrkového dřeva.....	98
tab. č. 30 Početní koncentrace $PM_{0,1}$ a PM_1 [$\#/cm^3$] při spalování suchého smrkového dřeva.....	100
tab. č. 31 Početní koncentrace $PM_{0,1}$ a PM_1 [$\#/cm^3$] při spalování dřevěných pelet	102
tab. č. 32 Početní koncentrace $PM_{0,1}$ [$\#/cm^3$] v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování	104
tab. č. 33 Procentuální zastoupení početní koncentrace velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve velikostní frakci PM_1 [%], v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování	105
tab. č. 34 Procentuální zastoupení hmotnostní koncentrace velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve velikostní frakci PM_1 [%], v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování	105
tab. č. 35 Hmotnostní koncentrace 4 PAHs na PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 a $PM_{0,1}$	107
tab. č. 36 Hmotnostní koncentrace 16 a 10 PAHs na PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 a $PM_{0,1}$	108
tab. č. 37 Tlak na jednotlivých patrech impaktoru DLPI.....	109
tab. č. 38 Výtěžnost standardů PAHs ve spiku na foliích bez odběru impaktorem.....	112

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotlů.....	124
---	-----

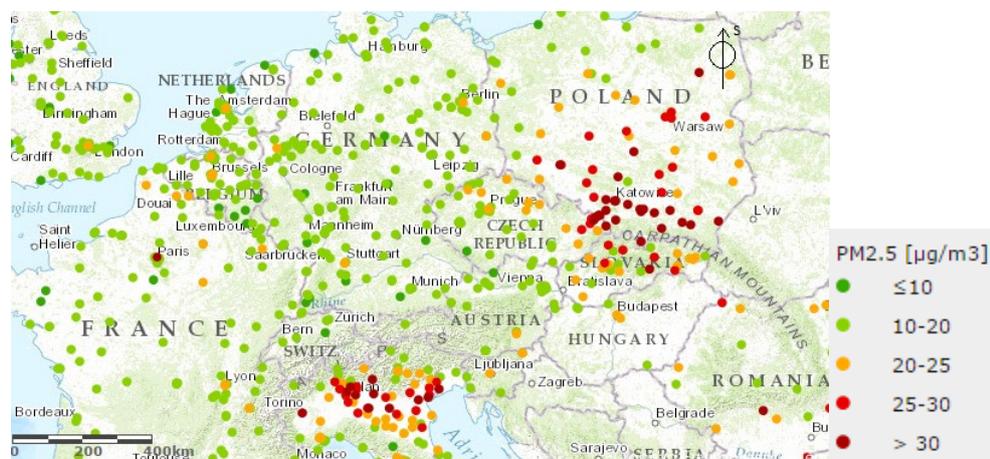
SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A ZNAČEK

ASTDR	Agentura pro toxické látky a registr nemoci
CO	Oxid uhelnatý
CPC	Kondenzační čítač částic
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DMA	Diferenciální třídič pohyblivosti částic
EC	Diferenciální analyzátor pohyblivosti
EF	Emisní faktor sestaven jako vážený průměr z měrných emisí znečišťujících látek z více typů spalovacích zařízení pro konkrétní typ tuhého paliva (hnědé uhlí, černé uhlí, biomasa, koks). Jednotky jsou stejné jako u měrných emisí ZL
FID	Plamenoionizační detektor
GC-MS	Plynová chromatografie/hmotnostní spektrometrie
HU	Hnědé uhlí
IARC	Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny
IRZ	Integrovaný registr znečišťování
ME	Měrná emise je měřením stanovené množství produkovaných emisí znečišťujících látek pro jeden konkrétní typ spalovacího zařízení a pro konkrétní typ paliva. Je možné ji vyjadřovat jako množství emisí znečišťujících látek (ZL) na hmotnost paliva ($\mu\text{g}/\text{kg}$, mg/kg , g/kg , kg/kg) nebo množství emisí ZL na výhřevnost paliva ($\mu\text{g}/\text{GJ}$, mg/GJ , g/GJ , kg/GJ nebo $\mu\text{g}/\text{MJ}$, mg/MJ , g/MJ , kg/MJ)
MSK	Moravskoslezský kraj
MSZ	Malá spalovací zařízení
MWCNT	Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky
NMVOC	Nemetanové těkavé organické sloučeniny
NO_x	Oxidy dusíku
OSN	Organizace spojených národů
PAHs	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB	Polychlorované bifenyly
PCDD/F	Polychlorované di-benzo-para-dioxiny/furany
PM	Aerosolové částice, tj. označení všech částic rozptýlených v ovzduší v daném nehybném objemu vzduchu
PM_x	Částice, které projdou velikostně-selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr $x \mu\text{m}$ odlučovací účinnost 50 %
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší
SMPS	Skenovací třídič pohyblivosti částic
SO_x	Oxidy síry
SVOC	Polo-těkavé organické sloučeniny
SWCNT	Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky
TOC	Tuhý organický uhlík
TSP, TZL	Aerosolové částice v rozmezí velikostí 1 nm-100 μm suspendované ve vzduchu
UFP	Ultrajemné částice
U.S. EPA	Americká agentura pro ochranu životního prostředí
VEC	Výzkumné energetické centrum, VŠB - TU Ostrava
VOC	Těkavé organické sloučeniny
WHO	Světová zdravotnická organizace
ZL	Znečišťující látky

ÚVOD

Kontaminace ovzduší částicemi (*Total suspended particles* - TSP, prach, prachové částice, TZL - tuhé znečišťující látky, PM - *Particulate Matter*) je problém jak pro lidské zdraví, tak pro životní prostředí. Ukazuje se, že menší částice jsou nebezpečné, často i nebezpečnější než stejná hmotnost částic větších, neboť jejich působení může být spojeno s jejich počtem a aktivním povrchem, které jsou u malých částic mnohem větší než u velkých. Na povrchu částic se zachytávají nebezpečné škodliviny (semivolatilní organické polutanty – SVOC, těžké kovy a další). Je známo [1], že podíl organických složek v PM se liší právě dle velikosti částic. Obecně také platí, že čím menší částice, tím hlouběji jsou schopny dýchacími cestami prostupovat. [2]

Z hlediska zdravotního působení atmosférického aerosolu (tuhé, kapalné nebo směsné částice suspendované v atmosféře) na člověka byly definovány velikostní skupiny částic označované jako PM_x (*Particulate Matter*), které obsahují částice o velikosti menší než x μm. Tyto částice v ovzduší ovlivňují člověka mnohem více než škodliviny jiné v tomtéž prostředí (SO_x, NO_x,...). Je zde blízká vazba kvantitativního vztahu mezi expozicí vysoké koncentrace částic PM₁₀ a PM_{2,5} a vzrůstajícího počtu onemocnění či úmrtí [3]. Emise částic menších než 2,5 μm jsou ve vyspělých zemích z více než dvou třetin vázány na antropogenní zdroje [4]. Ostrava ležící v Moravskoslezském kraji (MSK) patří mezi města s nejvíce znečištěným ovzduším prachovými částicemi v České republice (viz obr. č. 1).



obr. č. 1 PM_{2,5} ve střední Evropě [5]

Moravskoslezský kraj je specifický několika faktory. Ostrava je dopravním uzlem regionu a vysoké koncentrace průmyslu a lidských sídel jsou na malém prostoru. Část obyvatel žije v rodinných domech, kde využívají lokální topeniště (malá spalovací zařízení, MSZ), což jsou velmi významné zdroje znečištění ovzduší. [6] TZL ze spalování se dělí do dvou kategorií - primární (emise) a sekundární částice (imise). Disertační práce se zaměřila pouze na primární částice tvořené ve spalovací zóně (emise), které jsou následně emitovány do okolního ovzduší z malých spalovacích zařízení.

Podle odhadů Světové zdravotnické organizace (*World Health Organization*, WHO) [4],[7],[8] je znečištění ovzduší prachem zodpovědné za zkrácení průměrné délky života obyvatel Evropské unie o téměř 9 měsíců a nárůst průměrné roční koncentrace jemné frakce suspendovaných částic PM_{2,5} o 10 µg/m³ zvyšuje celkovou úmrtnost exponované populace nad 30 let o 6,2 %.

K nejrizikovějším složkám, které jsou na částicích sorbovány, patří polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs), polychlorované bifenyly (PCB), polychlorované di-benzo-para-dioxiny a furany (PCDD/F) a kovy. Vyjmenované chemické látky jsou produkovány nejčastěji při spalování v MSZ. Z tohoto důvodu jsou částice pocházející ze spalování fosilních paliv řazeny mezi nejrizikovější. [6] Toxicitu $PM_{2,5}$ z velké části způsobují polycyklické aromatické uhlovodíky, u kterých byla prokázána karcinogenita [9].

Menší částice se sorbovanými PAHs mohou v ovzduší setrvávat delší dobu a transportovat se na dlouhé vzdálenosti. Ke skutečné expozici PAHs v ovzduší dochází u člověka aktivní či pasivní inhalací sloučenin, které jsou přítomny např. v tabákovém kouři nebo v kouři ze spalování paliv. Studie ukazují, že jedinci exponovaní těmito částicemi delší dobu se vystavují většímu riziku onemocnění rakovinou i kardiovaskulárnímu onemocnění. [10],[11],[12] Adsorbované PAHs mají také silný oxidační potenciál [13]. Studie [14],[15],[16] poukazují na skutečnost, že pokud jsou PAHs adsorbovány také na částicích menších než $0,1 \mu m$ (ultrajemné částice, $PM_{0,1}$) mohou prostoupit až do krve a být tak transportovány do dalších orgánů, kde se následně ukládají. Všeobecně platí, že potenciální zdravotní riziko částic závisí na závažnosti a době trvání expozice, setrvání částic těle, vlastní toxicitě částic a zdravotním stavu jedince. [17]

Pro částice menší než 100 nm se používají dva termíny. Termín „nanočástice“ (*nanosized particle*) se užívá, pokud se hovoří o tzv. účelově vyrobených nanočásticích - inženýrské nanočástice a termín „ultrajemné částice“ (*ultrafine particle* - UFP) zahrnuje okolní nanočástice, které nejsou účelově vyráběny. [14] Ultrajemné částice se nacházejí v přírodě odněpaměti (horský vzduch obsahuje $10^3/cm^3$ částic). Pouze nová přístrojová technika a nové přístupy umožnili specifikaci částic menších než 100 nm. Při zmenšení částic daného materiálu pod 100 nm začínají fyzikálně chemické vlastnosti povrchu převládat nad vlastnostmi daného materiálu a částice se začne chovat, jako by celá byla tvořená jen povrchem. Jeden z nejvýraznějších jevů tohoto procesu je silné zvýšení chemické reaktivity, jejímž důsledkem může být i změna toxicity. [18]

Existují nejasnosti vyvstávající z důvodů neznalosti faktorů, které jsou zásadní pro vyhodnocení zdravotních rizik. Existují však racionální důvody pro obavu, že potenciální nebezpečnost nanočástic (ultrajemných částic) může v budoucnu ovlivnit zdraví lidí. [19]

Z uvedeného vyplývá potřeba řešení otázky, zda částice vymezené nanostupnicí představují rizika velmi rozdílného typu nebo intenzity než částice větší velikosti, tedy jakou měrou přispívají ultrajemné částice (nanočástice) ke škodlivosti aerosolů s ohledem na lidské zdraví a zda se do těchto účinků mohou zařadit také vlastnosti specificky převažující u ultrajemných částic (nanočástic). Jedná se například o počet částic a jejich povrch, na který dokážou sorbovat nebezpečné polutanty, čímž se zvyšuje jejich škodlivost pro člověka, neboť v současné době studie [14],[15],[16] zabývající se touto problematikou poukazují na hlubší depozici právě menších částic (PM_1 a $PM_{0,1}$) v plicích a na transport ultrajemných částic krevním řečištěm až do specifických orgánů (játra, srdce, slezina,...). Menší částice mohou tak být nebezpečnější než stejná hmotnost částic větších. Někteří vědci upozorňují na nutnost změny způsobu dosavadního hodnocení množství emisí ve smyslu zohlednění významu počtu částic [20].

Specifický význam má tato otázka právě na Ostravsku či některých částech Moravskoslezského kraje, kde je z celé ČR kontaminace ovzduší prachovými částicemi největší a problém je natolik závažný, že řešení této problematiky bylo dáno rozhodnutím vlády č. 260 ze dne 9. dubna 2010 [21]. Pozornost je s ohledem na identifikované výzkumné cíle a možnost spolupráce s Výzkumným energetickým centrem a Centrem nanotechnologií, soustředěna na emise z malých spalovacích zařízení (MSZ), které v oblasti hodnocení expozice charakterizují některé zdroje emisí. Podmínky spalování ovlivňují množství a vlastnosti vznikajících částic. Ačkoli velká spalovací zařízení jsou kontrolována z velké části kontinuálně, regulace procesu spalování v MSZ je obtížnější, nelze na ně aplikovat obdobné kontrolní a regulační mechanismy.

V současnosti používané emisní faktory PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PAHs vycházejí z měrných emisí a byly stanoveny při jmenovitých provozních podmínkách malých spalovacích zařízení. Nezohledňují negativní vliv neodborné obsluhy - provoz spalovacího zařízení při sníženém výkonu, vliv špatné údržby a vliv spalování nekvalitního paliva (domovní odpad). Pro ultrajemné částice a PM_1 emisní faktory doposud stanoveny nebyly. Výzkum emisí TSL, PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 , ultrajemných částic a PAHs ze spalování tuhých paliv v malých spalovacích zařízeních při běžném provozu v domácnostech poskytne nové informace pro aktualizaci používaných emisních faktorů. Tento způsob plní cíl programu v oblasti životního prostředí [22], který byl definován jako získání odborných podkladů pro zdokonalení metodik, které budou určeny pro výkon státní správy a povede ke zkvalitnění rozhodovacích, hodnotících a řídicích procesů.

CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Rámcovým cílem disertační práce bylo stanovení měrných emisí TZL, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, PM_{0,1} (ultrajemných částic) a detekce PAHs sorbovaných na jednotlivých frakcích ze spalování tuhých paliv v malých spalovacích zařízeních při běžném provozu v domácnostech - při jmenovitém a sníženém výkonu, při spalování různých druhů paliv.

Dílčími cíli bylo:

- Porovnání koncentrace (hmotnostní, početní) jednotlivých velikostních frakcí emisí z malých spalovacích zařízení s ohledem na:
 - druh paliva (biomasa, fosilní palivo, směs s odpady),
 - typ spalovacích zařízení (prohořivací, odhořivací, automatické, zplyňovací) a
 - režim spalování (jmenovitý a snížený výkon, vliv obsluhy zařízení),
- Detekce PAHs sorbovaných na částicích se zaměřením na ultrajemnou frakci,
- Stanovení měrných emisí pro jednotlivé velikostní frakce při spalování různých druhů paliv, v různých typech spalovacích zařízení a při různých režimech spalování a vyhodnocení faktorů, které ovlivňují množství emisí jednotlivých velikostních frakcí vypouštěných do ovzduší.

TEORETICKÁ ČÁST

1 NOVÉ POZNATKY Z VÝZKUMU BEZPEČNOSTI NANOČÁSTIC

V oblasti bezpečnostního inženýrství se používají pojmy *nebezpečnost*, *nebezpečí*, *ohrožení* a *riziko*. V mnoha publikacích jsou tyto pojmy definovány různě [23],[24],[25],[26]. V rámci řešení disertační práce se budou využívat následující pojmy a jejich definice:

Pojem *nebezpečnost (Hazard)* definuje mnoho publikací [23],[24] jako nebezpečnou vlastnost látky nebo jako zdroj rizika. Nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 1272/2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí (nařízení CLP) definuje třídy a kategorie nebezpečnosti. Třídy se rozdělují dle povahy (druhu) nebezpečnosti na:

- fyzikální nebezpečnost (hořlavé kapaliny, hořlavé plyny,...),
- nebezpečnost pro zdraví (karcinogenita, toxicita pro reprodukci,...),
- nebezpečnost pro životní prostředí,
- a doplňkovou třídu nebezpečnosti (pro ozónovou vrstvu).

Do 1. června 2015 se obyvatelstvo ČR může setkat s tzv. starou klasifikací směsí/přípravků dle zákona č. 350/2011 Sb., o chemických látkách a chemických směsích a o změně některých zákonů (chemický zákon). Zde se směsi/přípravky zařazují do skupin nebezpečnosti (např. výbušné, extrémně hořlavé, vysoce hořlavé, hořlavé směsi).

Nebezpečí (Danger) je situace nebo stav, kdy může dojít k projevu nebezpečnosti. Nebezpečí se může vyskytovat ve větší či menší míře, to závisí na vyskytující se množství látky např. na pracovišti, v zásobníku. [24]

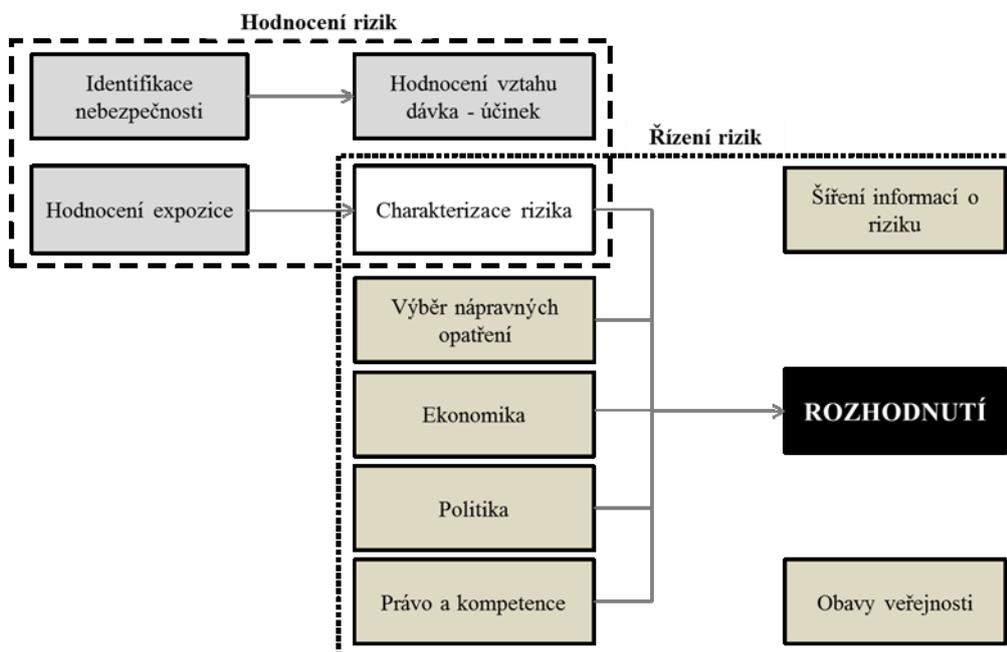
Ohrožení (Threat) vyjadřuje způsob projevu nebezpečí v čase a prostoru, je to situace nebo stav, kdy může dojít k projevu nebezpečnosti (nebezpečí), které hrozí konkrétnímu su/objektu (obyvatelstvo, majetek,...). [26]

Často se tyto dva pojmy nebezpečí a ohrožení zaměňují.

Riziko (Risk) je funkce pravděpodobnosti vzniku nežádoucí situace (expozice nebezpečné látky) a jejího dopadu (onemocnění, smrt). [23],[24]

Proces, jehož cílem je dosažení únosné míry rizika se dle literatury [27] a Agentury pro ochranu životního prostředí (*United States Environmental Protection Agency*, U.S. EPA) [28] nazývá *hodnocení a řízení rizik* (viz obr. č. 2). Hodnocení rizik je proces výhradně vědecký, obsahuje identifikaci (analýzu), hodnocení a srovnání rizik a rovněž přináší podklady potřebné k řízení rizik. Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů [29] vymezuje proces hodnocení zdravotních rizik jako odhad míry závažnosti zátěže populace vystavené rizikovým faktorům životních a pracovních podmínek a způsobu života. Výsledek hodnocení zdravotního rizika je podkladem pro řízení zdravotních rizik (management), zahrnující komplexní rozhodovací proces s cílem snížit zdravotní rizika a komunikaci o těchto rizicích.

V samotném procesu řízení rizik, které zahrnuje aspekty jak vědecké tak i politické (vzhledem k možným dopadům přijatých opatření), jsou přijímána opatření pro jejich snížení na únosnou míru (případně udržení na únosné míře).



obr. č. 2 Hodnocení a řízení rizik [27]

Postavení jednotlivých orgánů ČR při stanovování zásad, postupů a provádění hodnocení a řízení zdravotních rizik je obsaženo v již zmiňovaném zákoně č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů.

Přístupů, které by nabízely postupy vhodné pro hodnocení a řízení rizik nanočástic (UFP), je málo. Některé využívají postupy analýzy a hodnocení rizik pro chemické látky. Jiné přístupy zavádějí nové postupy, které jsou však s ohledem na nedostatek potřebných informací pouze orientační.

Hodnocení rizik související s expozicí nanočásticemi (ultrajemnými částicemi) musí předem předpokládat znalost (nano)materiálů, informací o jejich toxicitě a úrovni expozice. Celý proces se rozděluje na [28]:

- *identifikaci nebezpečnosti (hazard identification),*
- *charakterizaci nebezpečnosti spočívající v hodnocení vztahu dávka - účinek (hazard characterization: evaluation of dose - response relationship),*
- *hodnocení expozice (exposure characterization) a*
- *charakterizaci rizika (risk characterization) -* sumarizace výsledků předchozích kroků, dochází ke kvantifikaci rizika a k diskusi nepřesností a nejistot, které odhad jednotlivých parametrů provázely.

1.1 Identifikace nebezpečnosti nanočástic (ultrajemných částic)

Účinek částic závisí například na jejich velikosti, tvaru a chemickém složení. Velikost částic je rozhodující pro průnik a ukládání v dýchacím ústrojí. Větší částice jsou zachyceny v horních cestách dýchacích. Částice frakce PM₁₀ se dostávají do dolních cest dýchacích. Jemnější částice označené jako frakce PM_{2,5} pronikají až do plicních sklípků. Účinky suspendovaných částic jsou ovlivněny také adsorpcí dalších znečišťujících látek

(PAHs, kovy,...) na jejich povrchu. Převažující vlastnosti nanočástic (UFP), např. jejich velikost, počet, aktivní povrch, náboj, chemické složení, mohou představovat možná rizika pro lidské zdraví a životní prostředí avšak není zřejmé, které vlastnosti to jsou. Nanomateriály o stejném chemickém složení, ale např. jiném tvaru mohou vykazovat rozdílnou toxicitu. Informace o možných nebezpečích nanočástic (UFP) poskytují např. experimenty na zvířatech. Nicméně stále přetrvávají nejistoty, zejména u nových materiálů a pracovních procesů. [30],[31] Identifikace nebezpečí je založeno na určení nebezpečné vlastnosti, která může za určitých okolností ohrožovat lidské zdraví. Vychází se ze znalostí chování používaných nanomateriálů/nanočástic (UFP) a z vlastností jejich zdrojů.

Nanočástice se rozdělují do tří tříd dle jejich nebezpečnosti pro lidské zdraví (čím vyšší třída, tím větší nebezpečnost). Jednotlivé třídy nebezpečnosti jsou popsány následovně [31]:

- Třída 1 - Nanočástice rozpustné ve vodě s rozpustností větší jak 100 mg.dm^{-3} , jsou považovány za neškodné a jejich nebezpečnost je srovnatelná s chemickými látkami, které je tvoří. Příklad: částice lipidů, sacharóza, silikony a další o rozměrech 1 až 100 nm.
- Třída 2 - Syntetické, perzistentní nanočástice (vyjma nanovláken), specifická toxicita. Příklad: kovy (např. Ag, Au, Pb, La), oxidy kovů (např. TiO_2 , ZnO, CeO_2 , CoO), saze, fullereny, polymery, dendrimery apod. o rozměrech 1 až 100 nm.
- Třída 3 - Nanovlákná a ve vodě nerozpustné nanočástice, u kterých není možné vyloučit vlastnosti podobné azbestu, specifická toxicita. Příklad: SWCNT (jednotěnné uhlíkové nanotrubicе) a MWCNT (vícestěnné uhlíkové nanotrubicе).

V současné době nejsou dobře známy následky intoxikace lidského těla nanočásticemi (UFP, více viz Kapitola 2) a ani neexistuje v této oblasti dostatečná legislativa, je proto nutné uplatňovat *princip předběžné opatrnosti*.

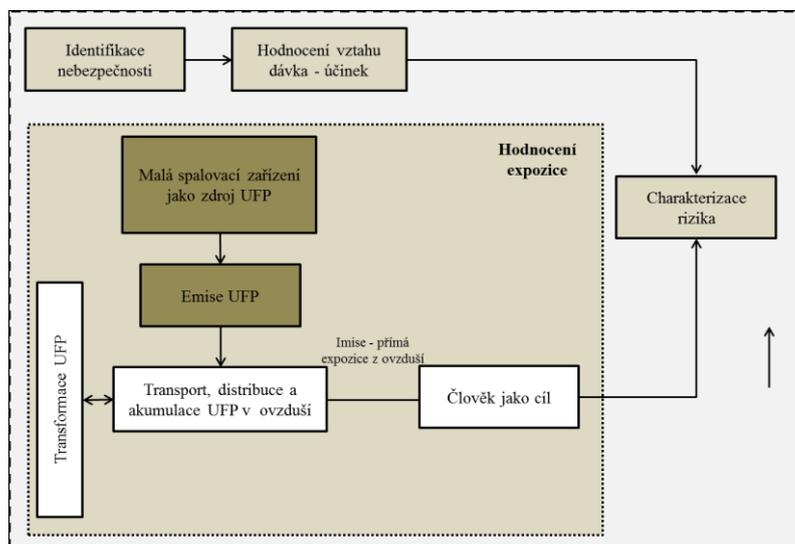
1.2 Hodnocení vztahu dávka-účinek nanočástic (ultrajemných částic)

Data o nebezpečnosti nanočástic (UFP) jsou podkladem pro hodnocení vztahu dávka-účinek, představující kvantifikaci vztahů mezi přijatou dávkou a odpovědí organismu (nepříznivým zdravotním účinkem). Pro působení částic v ovzduší nebyla zatím zjištěna bezpečná prahová koncentrace. Předpokládá se, že citlivost jedinců má tak velkou variabilitu, že ti nejcitlivější jsou v riziku účinků i při velmi nízkých koncentracích. [32] V problematice nanočástic (UFP) zde nastává problém s vyjádřením hmotnosti dávky (mg/kg), neboť jejich převažující vlastnost je jejich počet a povrch, jejich hmotnost vůči těmto vlastnostem je zanedbatelná. Metrika jednotlivých kroků hodnocení zdravotních rizik musí být stejná. Proto musí být měřena jak hmotnostní koncentrace, tak i početní koncentrace částic.

Zatím není zcela jasné, které vlastnosti jsou přesně spojeny s nebezpečným potenciálem různých nanomateriálů, informace o nebezpečnosti nanomateriálů nejsou dostačující k tomu, aby tento krok mohl být proveden. Z tohoto vyplývá, že nemůže být proveden celý proces hodnocení zdravotních rizik s následným řízením rizika, které má za cíl dosažení efektivní ochrany zdraví obyvatelstva. Management zdravotních rizik je složitý proces, proto se disertační práce zaměřila pouze na část hodnocení expozice.

1.3 Hodnocení expozice nanočástic (ultrajemných částic)

Vliv nanočástic (UFP) závisí nejen na jejich schopnosti působit na zdraví, ale také na velikosti expozice, tedy na tom po jakou dobu a jak vysoké koncentraci látek jsou lidé vystaveni. Hodnocení expozice popisuje zdroj, cesty, velikosti, frekvence (četnost) a trvání expozice chemické látky na člověka (obyvatelstvo). [27],[28] Proces hodnocení rizik chemických látek (viz obr. č. 2) byl podrobněji rozpracován v části hodnocení expozice (viz obr. č. 3). Disertační práce se v této oblasti zaměřila na charakteristiku zdrojů tj. malá spalovací zařízení a na emise z nich vypouštěné s ohledem na ultrajemné částice a možné škodliviny na ně vázané (PAHs). Polycyklické aromatické uhlovodíky byly vybrány z toho důvodu, že spalování v malých spalovacích zařízeních je jedním z hlavních zdrojů produkce těchto škodlivin a představují jednu z nejrizikovějších složek sorbovaných na částicích při těchto procesech. [33]



obr. č. 3 Hodnocení rizik [27],[28]

PAHs mají schopnost přetrvávat v prostředí, kumulují se v jeho složkách a v živých organismech, řada z nich má toxické, mutagenní či karcinogenní vlastnosti. PAHs se dostávají na povrch částic kondenzací a adsorpčním mechanismem. Ke kondenzaci dochází při ochlazování emisí. Distribuce PAHs v atmosféře je určena řadou faktorů např. množstvím a povrchem částic (pro sorpci). [34] Z velké skupiny PAHs U.S. EPA a Agentura pro toxické látky a registr nemoci (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ASTDR*) [35] vybrala nesubstituované PAHs a zařadila je na seznam prioritních polutantů: naftalen, acenaftýlen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren, chrysen, benzo(a)antracen, benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(ghi)perylene, indeno(1,2,3-cd)pyren, dibenzo(ah)antracen. U těchto PAHs se předpokládá vyšší pravděpodobnost expozice a významnější účinky na zdraví lidí než u jiných zástupců PAHs.

Podle klasifikace Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (*International Agency for Research on Cancer, IARC*) [36] je prokázaným lidským karcinogenem benzo(a)pyren (skupina 1). Za pravděpodobně karcinogenní látku je považován dibenzo(ah)antracen (skupina 2A) a za možné karcinogeny benzo(a)antracen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, indeno(1,2,3-cd)pyren, naftalen a chrysen (skupina 2B). Mezi látky, které nelze zatím klasifikovat z hlediska karcinogenity, jsou zařazeny acenaften, antracen, benzo(ghi)perylene, fenantren, fluoranten, fluoren a pyren (skupina 3).

2 KONTAMINACE OVZDUŠÍ ČÁSTICEMI

Tuhé znečišťující látky (TZL, prachové částice) jsou částice různé velikosti, které setrvávají v atmosféře a jsou schopny dálkového transportu. Znečišťující látky vypouštěny ze zdrojů znečišťování jsou nazývány „emise“ a znečišťující látky, které jsou již obsaženy v ovzduší, se označují slovem „imise“.

Ze zdravotního hlediska byly definovány velikostní skupiny částic označované jako PM_x (z anglického particulate matter), kde x představuje číslo velikosti částice v mikrometrech. PM_x představuje soubor, v němž částice o aerodynamickém průměru $x \mu m$ jsou předřazeným separačním zařízením (impaktorem, cyklonem) separovány s účinností právě 50 % (tj. 50 % hmotnosti), přičemž částice menší jsou ve vzorku obsaženy téměř se 100 % účinností a částice větších rozměrů než udává hodnota x jsou obsaženy s pravděpodobností blízkou nule. [1]

V 60. - 70. letech minulého století docházelo k velkému znečištění ovzduší v Československu a to v důsledku realizace energetického programu na bázi hnědého uhlí. V počátcích se sledovaly pouze tuhé znečišťující látky a oxid siřičitý o několik let později se začaly monitorovat i oxidy dusíku. Dle údajů OSN bylo v tomto období Československo na 3. místě nejvíce znečištěných míst v Evropě SO_2 . Emise prachu se začaly snižovat instalací dvoustupňových odlučovačů a byl vydán tzv. komínový zákon, který řešil regulaci znečišťujících látek vypouštěných do ovzduší finančními poplatky a postihy. V tomto období byl pozorován zvýšený výskyt alergií a nemocí kardiovaskulárních cest u dětí. [6]

V 80. letech minulého století vyvrcholila imisní zátěž. Došlo k poškození lesů a k jejich odtěžení. Rostlo povědomí u obyvatelstva o znečišťování ovzduší a studie poukazovali na zdroje znečišťování (spalovací zařízení, doprava). Byl vybudován první systém regulace velkých zdrojů znečišťování ovzduší. [6]

Sledování škodlivin bylo později rozšířeno o měření hmotnostního podílu vybraných kovů ve vzorcích částic a monitorování oxidu uhličitého. Technický vývoj analyzátorů umožnil nezávislé monitorování prашného aerosolu frakce PM_{10} . (částice s průměrem menším než $10 \mu m$) [6]

V 90. letech minulého století se začala měřit i frakce $PM_{2,5}$ (částice s průměrem menším než $2,5 \mu m$), také ozón a vybrané organické látky. Postupem času se začíná měřit PM_1 (částice s průměrem menším než $1 \mu m$) i menší částice (částice s průměrem menším než $100 nm$) a to v důsledku většího rizika menších frakcí na zdraví obyvatelstva. Při stejné hmotnosti zmenšujících se částic vzrůstá jejich možnost hlubší depozice v dýchacím traktu a také schopnost vázat na sebe jiné (škodlivé) látky (ať již sorpcí nebo kondenzací) v důsledku většího aktivního povrchu. [37]

2.1 Tvorba tuhých znečišťujících látek

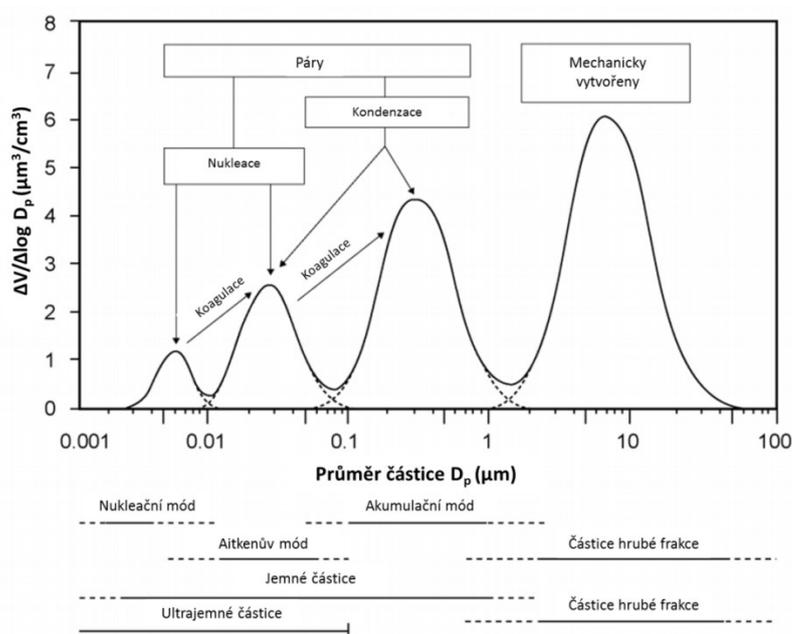
V mnoha studiích se používají termíny „ultrajemné částice“ (ultrafine particles, neúmyslně vyráběné nanočástice), „jemné částice“ (fine particles) a „částice hrubé frakce“ (coarse particles). U.S. EPA definovala ve své studii [38] jemné částice takto: *Jemné částice zahrnují nukleační, Aitkenův a akumulací režim, tedy částice s nejnižší měřitelnou velikostí, v současné době asi 3 nm, těsně nad minimem hmotnostní nebo objemové distribuce a hmotnostní či objemová distribuce je převážně tvořena z částic*

v rozmezí 1 až 3 μm (viz obr. č. 4). Studie zabývající se emisemi ukazují na skutečnost, že v jemné frakci převažují částice menší než 1 μm [39],[40],[41] Za jemnou frakci v emisích se tedy považuje frakce s částicemi menšími než 1 μm (PM_{10}) a částice větší než 1 μm patří do frakce hrubých částic. Tato klasifikace částic je vždy spojena s aerodynamickým průměrem, který definuje průměr kulové částice s hustotou 1000 kg/m^3 , stejnou jako částice v ovzduší. [42],[43]

Částice jemné a hrubé frakce se od sebe podstatně liší, a to nejen velikostí a složením, ale i mechanismy vzniku, odstraňováním z atmosféry a svými účinky na živé organismy [38]. Z koncentrací jedné frakce nelze odvodit koncentrace frakce druhé, a proto WHO (*World Health Organization*, Světová zdravotnická organizace) [44] doporučuje vyhodnocovat, posuzovat a regulovat obě frakce odděleně, neboť ultrajemné částice postupnou koagulací přecházejí z módu menších velikostí do módu větších velikostí. Koagulace částic akumulární módu (jemná frakce) je příliš pomalá na to, aby částice dosáhly velikosti hrubé frakce. Chemické složení částic hrubé frakce tak není ovlivněno složením částic jemných.[44]

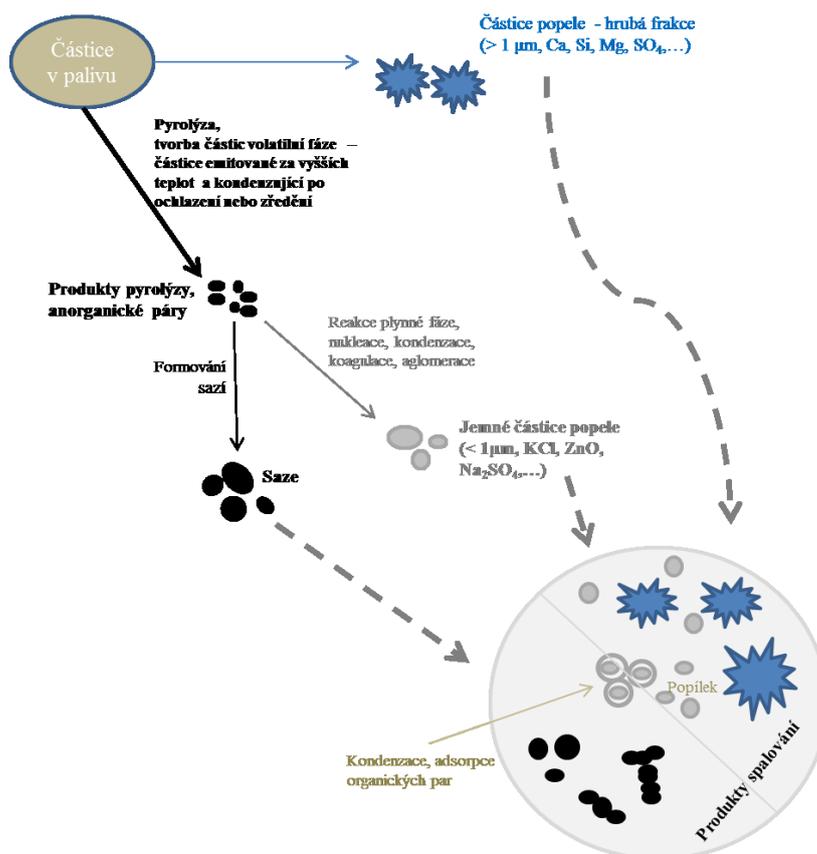
Tvorba TZL ze spalování závisí na řadě faktorů, tj. na podmínkách spalování (režim spalování, přebytek vzduchu,...), vlastnostech paliva a typu spalovacího zařízení.

TZL ze spalování jsou tvořeny směsí plynů, par a částic v plynu. Většinu částic tvoří jemná frakce menší než 1 μm (PM_{10}) [41],[42],[43],[45]. Tyto částice jsou většinou tvořeny z elementů, které se vypařují během spalování, které později dosáhnou bodu nasycení a formují se v ultrajemné částice nukleací. Částice nukleačního módu dále narůstají koagulací, aglomerací, reakcemi kondenzace na povrchu (viz obr. č. 4). Částice větší než 1 μm jsou nazývány částice hrubé frakce, skládající se převážně z částic popele s nízkým tlakem par, které se nevypařují během spalování.[43],[46],[47]



obr. č. 4 Idealizovaná velikostní distribuce částic, která by mohla být pozorována v silniční dopravě. Částice rozdílných velikostí, tvořeny ve čtyřech módech: nukleačním, aitkenovým, akumulárním módu a módu hrubých částí. Zobrazny jsou také hlavní formační a růstové mechanismy čtyř módů okolní částic $V = \text{objem}$, $D_p = \text{Stokesův průměr částic}$ [38]

TZL ze spalování různých druhů paliv se dělí do dvou kategorií: primární a sekundární částice. Primární částice se formují za vysokých teplot ve spalovací zóně a sekundární částice se tvoří v kouřové vlečce nebo v atmosféře. [42],[43] Disertační práce se zaměřila pouze na primární částice tvořené ve spalovací zóně, které jsou následně emitovány do okolního ovzduší z malých spalovacích zařízení. Primární částice se mohou rozdělit dle jejich mechanismu vzniku a formování - na saze, organické částice a popílek (viz obr. č. 5). Formování těchto částic se mění se spalovacími podmínkami při spalování různých paliv v různých typech malých spalovacích zařízení. Saze a organické částice vznikají z hořlavého materiálu při nedokonalém spalování (nedostatek kyslíku ve spalovací zóně). Popílek je tvořen z nespalitelného materiálu vneseného do spalovací komory.[48]



obr. č. 5 Tvorba částic při spalování [48]

2.1.1 Tvorba sazí

Saze jsou komplexní směsí skládající se převážně z amorfního elementárního uhlíku a organického materiálu. Saze se vytvářejí prostřednictvím složitých mechanismů v plameni, v oblasti bohaté na palivo. Saze se začínají tvořit během odstraňování a spalování těkavých látek (prchavá hořlavina), když uhlovodíkové fragmenty opouštějí částice paliva. Tyto fragmenty následně narážejí do menších druhů a reagují s nimi a okolními plyny za tvorby aromatických kruhů. Aromatické kruhy se začínají formovat do polycyklických aromatických uhlovodíků (PAHs). Další růst PAHs vede ke vzniku sazí. [42],[48] Obecně platí, že se saze vytvářejí, jak za nižších, tak vysokých teplot. Za nízkých teplot aromatické uhlovodíky produkují saze přímo do rostoucích grafitových struktur. Za vysokých teplot jsou alifatické (přímé nebo rozvětvené řetězce, metan) a aromatické (kruhové řetězce, například benzo(a)pyren) uhlovodíky prvním fragmentem, který roste

polymerací do více fragmentů a tvoří velké molekuly vytvářející saze. Následně částice rostou více díky povrchovým reakcím, koagulací a aglomerací. Výsledné částice sazí se skládají z menších kulovitých částic. Proces tvorby částic sazí závisí převážně na palivu, podmínkách spalování a typu plamene. V průmyslovém měřítku, pokud se spaluje biomasa ve spalovacích zařízeních, je množství sazí v emisích zanedbatelné, ale v malých spalovacích zařízeních jsou saze důležitým podílem v emisích jemných částic. [42][48][49]

2.1.2 Tvorba organických částic

Při spalování se tvoří mnoho organických sloučenin s odlišnými hodnotami tenzí par. Většina organických sloučenin se adsorbují na částicích jemné frakce. Dle těkavosti se organické sloučeniny rozdělují na těkavé organické sloučeniny (*volatile organic compounds*, VOC) a polo-těkavé organické sloučeniny (*semi-volatile organic compounds*, SVOC). Tyto sloučeniny toxicky působí například na rostliny - zpomalují růst rostlin a vývin kořenového systému. U člověka působí hlavně na nervový systém. Některé VOC jsou karcinogenní, toxické, mají dráždivé účinky na sliznice očí a dýchací cesty, způsobují alergie. Významný představitel těkavých látek při spalování biomasy je metan. [48],[49] Pokud ze sloučenin metan vynecháme, hovoříme o nemetanových těkavých organických sloučeninách (NMVOC), které se dle české legislativy musí při určité vypouštěné koncentraci do ovzduší ohlašovat v integrovaném registru znečišťování (IRZ). IRZ tyto látky definuje takto: *Nemetanové těkavé organické sloučeniny jsou těkavé chemické látky (mimo metanu), které je možno definovat jako sloučeniny uhlíku s výjimkou CO, CO₂, H₂CO₃, karbidů kovů, uhličitánů kovů a uhličitanu amonného. Za těkavé látky se označují takové látky, které vykazují tlak par vyšší než 133,3 Pa při 20 °C, což zhruba odpovídá jejich teplotě varu pod 150 °C.* [50]

2.1.3 Tvorba částic popílku

V procesu spalování se tvoří také produkty nazývané jako popel (představující částice, které zůstávají v propadu ve spalovacím zařízení, *bottom ash*) a popílek (tvořící částice větší než 1 μm, které jsou obsaženy ve spalínách, *fly ash*). Produkce popele a popílku závisí na parametrech paliva zejména na obsahu popeloviny v palivu a chemickém složení popeloviny. Tvorba také závisí na technologii a podmínkách spalování. Biomasa má obsaženo více popeloviny než fosilní paliva. Jemné částice popílku (částice < 1 μm) se vytvářejí z těkavých anorganických elementů uvolněných z paliva v plynné formě během spalování (nukleací, kondenzací, koagulací, aglomerací, viz obr. č. 5). [48],[49]

Prachové částice vypouštěné do ovzduší lze taktéž klasifikovat podle obsahu škodlivých příměsí do několika skupin:

- prachové částice s obsahem toxických látek (např. těžké kovy, persistentní organické látky),
- prachové částice neobsahující toxické látky. [37]

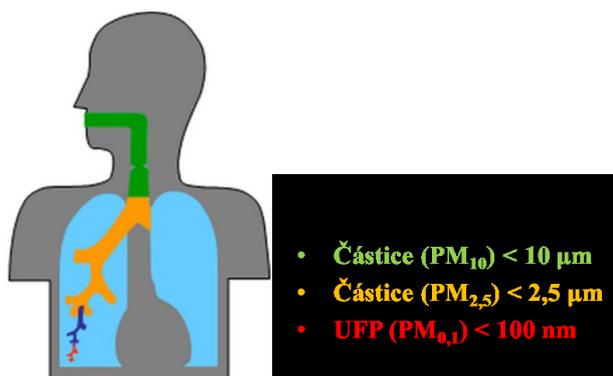
2.2 Účinky nanočástic (ultrajemných částic) na zdraví

Částice se vzájemně liší v řadě fyzikální a chemických vlastností, z nichž toxikologicky nejvýznamnějšími jsou chemické složení, velikost a tvar částic, které jsou závislé na charakteru emisního zdroje. Částice pronikají do lidského těla převážně dýchacím ústrojím, v menší míře kůží nebo s potravou.

2.2.1 Příjem a depozice nanočástic (ultrajemných částic) v dýchacím ústrojí

Velikost částic je rozhodující faktorem ovlivňující průnik a ukládání v dýchacím ústrojí. Větší částice jsou zachyceny v horních cestách dýchacích, odkud mohou být částečně vykašlány a částečně spolknuty.

Rozlišuje se vdechovatelná (inhalabilní) frakce, do které řadíme částice, které mohou vstupovat do dýchacího ústrojí člověka. Extrathorakální frakce částic (PM_{10} , zeleně vyznačená oblast na obr. č. 6) je zachycována na sliznici dutiny nosní a ústní. Tracheobronchiální frakce částic ($PM_{2,5}$, oranžově vyznačená oblast na obr. č. 6) jsou zachycovány v oblasti průdušek na počátku plic. Respirabilní (alveolární, $PM_{0,1}$, modrá a červená oblast na obr. č. 6) frakce částic má schopnost proniknout až do plicních sklípků, do oblasti výměny dýchacích plynů. [51],[52]



obr. č. 6 Depozice částic v dýchacím traktu člověka [53]

Důležitým již zmiňovaným faktorem tuhých znečišťujících látek, který ovlivňuje zdravotní účinky částic, je jejich chemické složení.

Ve složení hrubých částic převládá materiál zemské kůry (Fe, Ca, Al,...). Dominantními složkami frakce jemných částic je uhlík a organické látky, které pocházejí většinou ze spalovacích procesů a oxidace těkavých organických látek. U ultrajemných částic jsou to také organické látky a těžké kovy. Ultrajemné částice jsou navíc schopny díky většímu aktivnímu povrchu vázat větší množství polutantů. [54],[55] Organické sloučeniny na základě svých fyzikálně-chemických vlastností se mohou vyskytovat, jak v plynné, tak tuhé fázi. To závisí na tenzi par nad kapalinou, teplotě a velikosti povrchu částic obsažených v jednotce objemu vzduchu. Vysoký obsah organické hmoty v částicích způsobuje, že i látky s poměrně vysokou tenzí par se chovají jako semivolatilní, a mohou tak být adsorbovány na částicích [56].

Tvar a měrný povrch částic je neméně důležitým parametrem určujícím potenciální rizika částic. Experimentální studie ukazují na fakt, že čím je větší poměr stran částice, tím je větší její toxicita a čím je větší povrchová plocha, je částice více reaktivnější. [2],[57]

Přítomnost dalších znečišťujících látek v ovzduší může mít synergické účinky, a tím zhoršovat působení částic na lidské zdraví. Účinky ultrajemných částic jsou zvýšeny v případě přítomnosti dalších polutantů. [54]

2.2.2 Působení nanočástic (ultrajemných částic) v těle člověka a obranné reakce organismu

Buňky lidského těla jsou stotisíc krát větší než nanočástice. Pokud se nanočástice dostanou dýcháním do plic, jsou schopny překonávat biologické bariéry a nejen krevním oběhem se dostat do různých míst v lidském těle. Nejčastější expozice nanočásticemi je přes dýchací cesty a tedy nejméně účinnou bariérou jsou plíce. Proniknou-li nanočástice až do krevního oběhu, mohou podobně jako molekuly látek postupně pronikat až do buněk a ukládat se v některých specifických orgánech, které jsou nejvíce zásobovány krví (srdce, játra,...). V těchto orgánech můžeme očekávat také nejzávažnější poškození. Kromě krevního oběhu pronikají nanočástice poměrně snadno skrz nosní membránu odkud jsou přes čichové a lebeční nervy transportovány až do centrálního nervového systému. [2],[57]

Chování nanočástic nelze jednoznačně určit, neboť záleží na materiálu, ze kterých jsou tvořeny, na velikosti a chování v těle exponovaných osob nelze předvídat. Většina dostupných toxikologických dat tak vychází ze studií s úzkým zaměřením prováděných na buněčných kulturách nebo na zvířatech, a je obtížné je extrapolovat na člověka. Toxikologické účinky nanočástic na buňku nejsou zcela zřejmé. [2],[16]

Obranné reakce organismu spočívají např. v procesu transportu TZL z dýchacího ústrojí. Tento proces je nazýván *clearance*. Clearance má dvě fáze [57]:

- rychlá - v tracheobronchiální oblasti plic, kde se za pomoci hlenu TZL vytlačují ven z dýchacího traktu,
- pomalá - pohlcování TZL (fagocytóza).

2.2.3 Faktory ovlivňující toxické účinky nanočástic (ultrajemných částic)

Mezi parametry, které ovlivňují toxicitu nanočástic lze zařadit početní koncentraci, charakteristiky velikostní distribuce částic, krystalickou strukturu, velikost aktivního povrchu - tvar částic, schopnost agregace apod.

Dávka je definována jako množství látky, které se dostane do biologického systému. Dávka je závislá na expozici, tedy na hmotnostní koncentraci látky ve vzduchu a době trvání expozice. Jak již bylo uvedeno výše, negativní zdravotní účinky nanočástic nekorelují s hmotnostní dávkou nanočástic. [2],[14],[16]

Bylo zjištěno, že čím větší poměr stran částice má, tím více je toxická [57].

Při rozhodování o míře toxicity nanočástic (UFP) se musíme také dívat na chemické složení, i když není jednoduché ze znalosti chemického složení predikovat sílu toxického účinku. Nutné je rozlišovat mezi chemickým složením a chemickými vlastnostmi daného materiálu. Přestože mohou mít částice stejné složení, mohou mít různou krystalickou strukturu a z toho pramenící různé chemické vlastnosti, neboť toxicita materiálu na krystalické formě velice závisí [2],[57].

Při srovnání zdravotních účinků vdechnutých nanočástic TiO_2 o různých velikostech stojí za povšimnutí, že následkem expozice nízkými dávkami (10 mg/m^3) částic o velikosti 20 nm byl pozorován větší výskyt plicních nádorů než v případě expozice vysokým dávkám (250 mg/m^3) částic o průměru 300 nm. [2],[14],[58]

Toxikologické studie poukazují na fakt, že nanočástice mají negativní respirační účinky na zdraví, přičemž obvykle způsobují rozsáhlejší záněty než větší částice stejného složení [2]. Experimenty na krysách [59] prokázaly, že krysy exponované ultrajemnými částicemi (tvořené TiO_2 nebo sazemí) utrpěly větší poškození plic, než tomu bylo u krys, které byly vystaveny aerosolům tvořených mnohem většími částicemi (v rádech mikrometrů) stejného složení a při stejné hmotnosti prachu usazeného v plicích. K podobným závěrům dospěly i jiné studie [2],[60]. Bylo konstatováno, že zánětlivý účinek závisí na povrchové ploše nanočástic. Zjištění dala podnět ke změnám definic a předpisů vztahující se k dávkovým a expozičním limitům, které se ukázaly jako nevhodné. [2],[57],[59]

Vlastnosti nanočástic jsou závislé nejen na jejich rozměrech ale i ohotě vytvářet větší celky - agregáty. Samotné nanočástice rozptýlené v ovzduší se díky své nepatrné velikosti chovají stejně jako molekuly plynů. Pro své malé rozměry a velmi nízkou hmotnost nepodléhají sedimentaci, a proto mohou ve vzduchu setrvávat po velmi dlouhou dobu. To platí zejména, je-li jejich koncentrace velmi nízká. Při vysokých koncentracích však nanočástice ochotně podléhají procesu agregace. Podstatou agregace jsou vzájemné srážky jednotlivých aerosolových částic, které se tak spojují ve větší celky - agregáty (chemické vazby, volně vázané částice, flokulace) nebo aglomeráty (Van der Waalsovy síly, elektrostatické síly, povrchové napětí, pevně vázané částice, koagulace). Při agregaci nedochází ke zrušení fázového rozhraní mezi jednotlivými částicemi a disperzním prostředím a ke zmenšení plochy jejich povrchu. Malé částice si zachovávají identitu, pouze ztrácejí kinetickou nezávislost - agregát se pohybuje jako celek (kinetická jednotka). Agregace nanočástic má zásadní vliv na účinnost fagocytózy. U větších částic je mnohem účinnější, takže toxicita agregátů větších jak 100 nm je výrazně nižší než u primárních částic. Proto kontaminace ovzduší vyššími koncentracemi nanočástic (UFP), které budou agregovat, nemusejí pro lidské zdraví představovat takové riziko jako nízké koncentrace stejně velkých nanočástic (UFP). [2],[14]

Všechny zmiňované reakce částic jsou odpovědné za to, že ve velikostním spektru běžného atmosférického aerosolu nacházíme dvě charakteristická maxima - jedno okolo 20 nm druhé okolo 300 nm. Proto je potřeba na aerosoly pohlížet jako na dynamický systém, což komplikuje jeho měření, zvláště pokud se parametry emisního zdroje průběžně mění jako je tomu například u malých spalovacích zařízení. [57]

2.3 Zdroje znečištění ovzduší

Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší (REZZO) rozděluje zdroje znečišťujících látek dle tepelného výkonu a také dle požadavků zákona č. 201/2010 Sb. [61], o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů. Zdroje se dělí na stacionární a mobilní zdroje, přičemž stacionární jsou děleny na kategorie podle velikosti a významu. Dílčí soubory REZZO 1-3 zahrnují stacionární zdroje, REZZO 4 mobilní zdroje.

Jedním z významných zdrojů znečišťujících ovzduší částicemi jsou malá spalovací zařízení (MSZ, REZZO 3). Zhruba 570 tisíc domácností v ČR používá pro vytápění uhlí a 150 tisíc domácností používá pro vytápění dřevo. [62] Z těchto zdrojů se produkují škodliviny zejména v topné sezóně. Za rok 2013 se dle Českého hydrometeorologického ústavu [6] podílely MSZ na produkci PM_{10} 41 % a $\text{PM}_{2,5}$ 59 % z celkových zdrojů znečištění. Ve spalínách se může vyskytovat také celá řada chemických sloučenin především CO_2 , CO, NO_x , SO_x , PCDD/F, PCB, PAHs a kovy. Např. PAHs mají negativní vliv na člověka a MSZ produkují tyto škodliviny ve velké míře [6].

Nízká výška komínů MSZ způsobuje hromadění prашného aerosolu právě v dýchací zóně obyvatelstva. Na území Moravskoslezského kraje (MSK) je přes 55 000 kotlů, které spalují tuhá paliva (koks, uhlí, dřevo, ...). Největší hustota lokálních topenišť je v oblastech s nejhorší kvalitou ovzduší v České republice - Ostrava, Orlová a Bohumín. V topné sezóně je ovzduší v oblastech bez průmyslu podobné jako v průmyslových lokalitách (například Krnov). [6],[63] Další problémem v produkci velkého množství emisí z MSZ je skutečnost, že tato zařízení nemají prakticky žádné čištění spalin (filtry).

Znalosti o velikosti znečišťování a možnostech jeho snižování jsou klíčové pro efektivní zásahy ke snížení rizik pro lidské zdraví.

Současné poznatky týkající se malých spalovacích zařízení ukazují, že je nutné zaměřit se ze zdravotního hlediska na vzorkování frakce PM₁ a adsorpci PAHs na částicích menších než 1 μm, neboť přibližně 90 %_{hm.} částic je ve frakci PM₁, [41],[65] která vstupuje do organismu dýchacími cestami. Předpokládá se, že až 75 % PAHs je sorbováno na nejjemnější frakce částic, tzn. respirabilní submikronové velikosti (PM₁). Těkavější PAHs (s výjimkou fluorantenu) jsou vázány na částice větší (PM_{2,5} nebo PM₁₀) jako produkt kondenzace. [34]

Kvantifikace PAHs adsorbovaných na částicích a v plynné fázi produkovaných do atmosféry z MSZ bude důležitou částí hodnocení ovlivňování jak zdraví, tak životního prostředí.

Podle zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů [61], patří PAHs mezi znečišťující látky, které svou přítomností v ovzduší mají nebo mohou mít škodlivé účinky na lidské zdraví. Zákon požaduje provádět jednorázové měření emisí těchto znečišťujících látek v rozsahu čtyř PAHs - benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, benzo(a)pyrenu a indeno(1,2,3-c,d)pyrenu - pro spalovací stacionární zdroje se jmenovitým tepelným příkonem 50 MW a vyšším, spalující kapalná či tuhá paliva. Jednorázová měření se provádí po prvním uvedení stacionárního zdroje do provozu, při každé změně paliva nebo při každém zásahu do konstrukce, který by mohl vést ke změně emisí. Tento požadavek se však nevztahuje na malá spalovací zařízení (§ 18) [61], i když studie ukazují, že 90 % B(a)P pochází právě z nich [6].

2.4 Regulace emisí znečišťujících látek z malých spalovacích zařízení v ČR a ve světě

Nový zákon č. 201/2010 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů [61], udává povinnost osobě uvádějící na trh v ČR *spalovací stacionární zdroj o jmenovitém tepelném příkonu 300 kW a nižším, který slouží jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění* (MSZ) certifikátem prokázat, dle zákona č. 22/1997 Sb., ve znění pozdějších předpisů, že spalovací stacionární zdroj splňuje emisní požadavky pouze u TZL, celkového organického uhlíku a CO. Např. do roku 2018 musí splnit MSZ emisní limit pro TZL 125 mg/m³_N pro fosilní paliva a 150 mg/m³_N pro biologická paliva. Od roku 2018 budou muset MSZ splnit limit (60 - 75) mg/m³_N dle způsobu dodávky paliva. Tyto hodnoty omezují prodej nových spalovacích zařízení a platí pro výrobce, dovozce a prodejce. [64]

Osoba musí provozovat MSZ v souladu s minimálními požadavky, které odpovídají emisím prachu 125 mg/m³_N pro fosilní paliva a 150 mg/m³_N pro biologická paliva a to nejpozději do 10 let od nabytí účinnosti tohoto zákona, tedy do 1. září 2022.

To znamená, že po tomto termínu se tyto limity vztahují také na provozovatele, tedy běžné občany, kteří doma topí tuhými palivy. [64]

Osoby také budou muset provádět jednou za dva kalendářní roky prostřednictvím osoby, která byla proškolená výrobcem spalovacího stacionárního zdroje a má od něj udělené oprávnění k jeho instalaci, provozu a údržbě, kontrolu technického stavu a provozu MSZ a předkládat na vyžádání obecnímu úřadu obce s rozšířenou působností doklad o provedení této kontroly vystavený odborně způsobilou osobou potvrzující, že MSZ je instalováno, provozováno a udržováno v souladu s pokyny výrobce a tímto zákonem. Provozovatel je podle zákona povinen zajistit provedení první kontroly technického stavu a provozu nejpozději do 31. prosince 2016. Zatím však není známo, co přesně se v rámci této kontroly bude provádět. [64]

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů [61] zavádí také opatření pro dodržování těchto požadavků, včetně definovaných sankcí. Pokud provozovatel zdroje neprovede jednou za dva kalendářní roky kontrolu technického stavu a provozu spalovacího stacionárního zdroje prostřednictvím odborně způsobilé osoby, hrozí mu pokuta ve výši až 20 000 Kč. V případě spalování nevyhovujícího paliva (uhelné kaly, lignit, proplátky, ...) hrozí provozovateli pokuta až 50 000 Kč. [64]

V EU pro kotle na tuhá paliva určené k ústřednímu vytápění se samočinnou nebo ruční dodávkou platí evropská norma EN 303-5:2012, která má podobné emisní limity jako ČR. Pouze Německo a Rakousko mají přísnější emisní limity pro MSZ a jsou leadery v této oblasti. Nestačí jim jen certifikace MSZ jako je tomu v ČR, ale splnění emisních požadavků je prokazováno na základě výsledků pravidelných měření, které provádí kominické firmy. Rakousko rovněž stanovilo emisní limit pro NO_x . [64]

V současnosti pro MSZ je tedy sledována pouze celková koncentrace prachu, bez rozlišení velikosti částic. Pro roční bilance emisí prachu se dále používají emisní faktory pro částice PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$. Z předchozích studií [41],[65] je známo, že podstatnou část tuhých znečišťujících látek tvoří částice o velikosti PM_1 . Z pohledu zdravotního rizika jsou tyto částice rizikovější, protože pronikají hlouběji do dýchacího systému a jsou schopny aktivně pronikat přímo do krevního řečiště. Lze předpokládat, že v dohledné době budou emise ultrajemných částic a částic PM_1 v dané oblasti sledovány. Částice PM_1 a ultrajemné částice budou experimentálně stanoveny při spalování tuhých paliv v různých typech malých spalovacích zařízení, které představují reprezentativní vzorek dnes používaných technologií.

2.5 Odběr a stanovení emisí z malých spalovacích zařízení

Izokinetický odběr (dílní proud odebíraných spalin v hubici vzorkovací sondy má stejnou rychlost a směr jako spaliny proudící potrubím v místě vzorkovacího bodu) pro stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu a vzorkování PAHs z emisí je zakotven např. ve standardech uvedených v tab. č. 1.

tab. č. 1 Normy pro izokinetický odběr prachu a PAHs ze stacionárních zdrojů

ISO 9096	Stacionární zdroje znečišťování. Stanovení koncentrace a hmotnostního toku tuhých znečišťujících látek v proudě plynu. Manuální gravimetrická metoda.	[66]
ČSN EN 13284-1	Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda	[67]
ČSN EN ISO 23210	Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace frakce PM ₁₀ /PM _{2,5} v odpadním plynu - Stanovení nízkých koncentrací pomocí impaktorů	[68]
ISO 12141	Stacionární zdroje emisí: Stanovení koncentrací tuhých částic při nízkých koncentracích	[69]
VDI 2066-1	Particulate matter measurement - Dust measurement in flowing gases - Gravimetric determination of dust load	[70]
EPA CTM 039	Conditional Test Method, který normuje měření emisí izokinetickým odebíráním zředěného odpadního plynu pro stacionární zdroje emisí, popisuje vzorkování frakcí PM _{2,5} a PM ₁₀	[71]
ČSN EN 1948-1	Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace PCDD/PCDF a dioxinům podobných PCB - Část 1: Vzorkování PCDD/PCDF	[72]
ISO 11 338	Stacionární zdroje znečišťování: Stanovení PAHs v plynné fázi a sorbovaných na tuhých částicích	[73]
Method 429	Determination of PAH Emissions from Stationary Sources	[74]

2.5.1 Odběr TZL z malých spalovacích zařízení

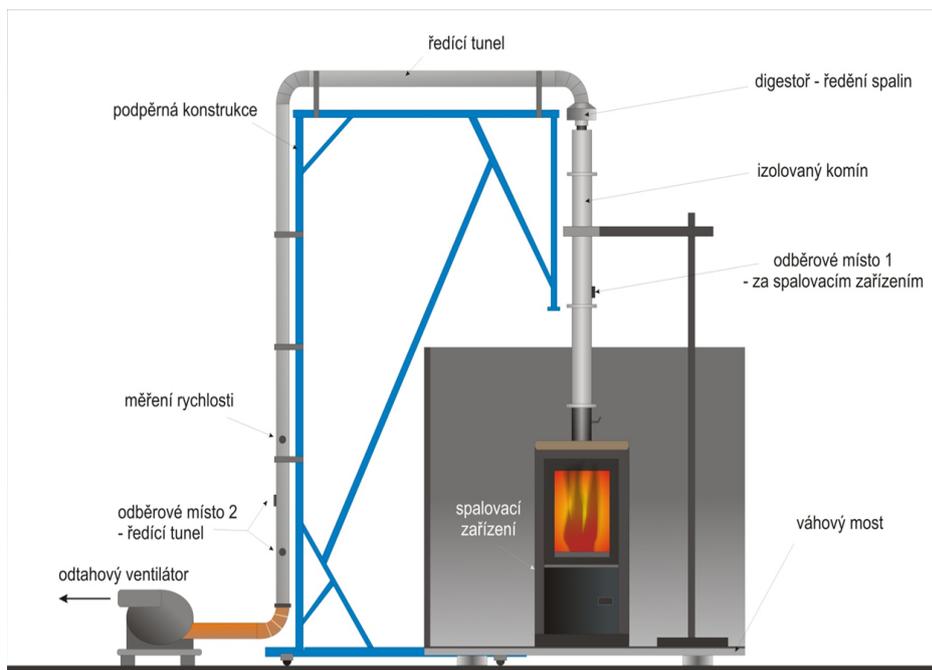
U malých spalovacích zařízení lze odebírat vzorek dvěma způsoby:

- přímý odběr vzorku spalin z kouřovodu za spalováním (bez ředění),
- odběr naředěného vzorku spalin z ředícího tunelu.

Problémy odběru TZL spočívají:

- v nestabilním spalovacím procesu (periody) - přerušovaná doprava paliva, v nestabilitě teploty spalin,
- v proměnlivé rychlosti hoření, proměnlivé spotřebě paliv během spalovací periody, proměnlivém množství spalin, proměnlivé koncentraci znečišťujících látek a omezené opakovatelnosti spalovacích zkoušek,
- v rychlosti spalin v komíněch MSZ, která je cca v rozsahu 0,5 - 2 m/s, normy zabývající se reprezentativním vzorkováním spalin z komína požadují rychlost vzorkovaného plynu alespoň 5 m/s, což vede k problémům s reprezentativním vzorkováním.

Pro vyřešení některých problémů při odběru znečišťujících látek a dosažení tak izokinetických podmínek odběru (jako u velkých stacionárních zdrojů) je vhodné použít ředící tunel, protože v komíně připojeném na malé spalovací zařízení mají spaliny neustálenou a malou rychlost. Ředěním v tunelu se teplota spalin sníží a některé složky, které byly v kouřovodu hned za spalovacím zařízením v plynné fázi, zkondenzují na povrchu částic prachu. Koncentrace prachu stanovená v ředícím tunelu je vyšší oproti hodnotě stanovené přímo za spalovacím zařízením (před naředěním) a chování prachu a uhlovodíků v ředícím tunelu se více podobá chování prachu, který vychází z reálného komína. [75] Schéma ředícího tunelu dle U.S. EPA Metody 5G [76] používaného na zkušebně Výzkumného energetického centra je uvedeno na obr. č. 7.



obr. č. 7 Schéma ředícího tunelu

Platné normy pro třídění jednotlivých frakcí prachových částic z odpadního plynu stacionárních zdrojů se pouze vztahují na odběry frakcí $PM_{2,5}$ a PM_{10} a neexistují normy pro vzorkování frakce PM_1 a $PM_{0,1}$. I když současné poznatky o velikostním zastoupení částic ($PM_{10} - PM_{0,1}$), jak již bylo uvedeno, ukazují, že přibližně 90 %_{hm.} částic je ve frakci PM_1 . Frakce PM_1 je pro člověka nebezpečnější s ohledem na snadnější vstup takto jemných částic do těla přes dýchací ústrojí. Studie [77],[78] ukazují na skutečnost, že těžší PAHs jsou sorbovány na jemnější frakci.

Současné studie [39],[65] zabývající se měřením emisí z malých spalovacích zdrojů se zaměřují na vzorkování PAHs sorbovaných na frakci PM_1 . Spaliny jsou odebírány izokineticky a tato frakce je zachytávána pomocí gravimetrického impaktoru DGI. Také je oddělována frakce větší než 1 μm pomocí impaktoru DEKATI a frakce PM_1 je zachycována na teflonové filtry či filtry z křemenného vlákna.

2.5.2 Vzorkování a příprava vzorků k analýze PAHs

Odběr vzorku spalin je značně obtížný, neboť sloučeniny PAHs mají různé fyzikální a chemické vlastnosti (tenze par, body varu apod). Pro reprezentativní odběr nelze stanovovat PAHs jen v jedné fázi, proto je nutno respektovat povahu PAHs a odebírat plynnou i pevnou část vzorku. Správnost výsledků analýzy je dále ovlivňována např. kontaminací (vzorkovací trať, rozpouštědla, činidla, nádoby apod.), rozkladem PAHs působením tepla, UV zářením. [79]

V České republice se v praxi pro odběry PAHs v emisích velkých spalovacích zařízení využívá norma ČSN EN 1948-1 [72] a norma ČSN EN 13284-1 [67] pro záchyt PM a izokinetický odběr. Normy pro vzorkování PAHs popisují tři varianty odběru vzorků pro analýzu:

- metoda **filtračně - kondenzační**,
- metoda **zřed'ovací**, spaliny se ředí a chladí před filtrem max. na 40 °C,
- metoda **kondenzační** (s chlazenou sondou), spaliny se před filtrem chladí max. na 40 °C

Všechny tři varianty odběru zachycují škodliviny jak sorbované na částicích, tak v plynné fázi (podle metody vzorkování jsou záchytnými systémy filtry, kondenzační baňky, pevné nebo kapalné sorbenty).

2.5.3 Analýza PAHs

Stanovení obsahu PAHs se zpravidla provádí některou z chromatografických metod (ISO 11338-2). Nejrozšířenější metodou je metoda plynové chromatografie (GC-MS). Analýza se provádí využitím kapilárních kolon se slabě polárními zakotvenými fázemi s hmotnostně selektivní detekcí s ionizací nárazem elektronu. [79]

Určitou nevýhodou metody GC-MS je skutečnost, že nelze příliš dobře rozlišovat jednotlivé isomery PAHs. Na rozdíl od plynové chromatografie není kapalinová chromatografie omezena těkavostí PAHs.

Detekční limit metody GC-MS se pohybuje kolem 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ při odběru 250 litrů vzorku. Mez stanovitelnosti je ovlivněna charakterem analytu a činí například u naftalenu 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a u koronenu 2 mg/m^3 při odběru stejného množství. [79]

Kromě uvedených metod lze pro stanovení použít i dalších chromatografických metod.

3 POUŽITÁ SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ

MSZ se významnou měrou podílejí na produkci PM_{10} a $PM_{2,5}$, v roce 2012 se podílely 89,6 % na produkci benzo[a]pyrenu. Hlavní příčinou takto vysokého podílu je spalování pevných paliv, především uhlí, v kotlích starších typů (odhořivací, prohořivací). Podle odborných odhadů tvoří odhořivací a prohořivací kotle až 85 % všech zařízení na spalování pevných paliv v domácnostech. [6] Disertační práce se zaměřuje na starší (prohořivací, odhořivací) i novější (zplyňovací, automatické) typy kotlů.

3.1 Automatický kotel Benekov V-Ling 25

Kotel BENEKOV V- LING 25 (viz obr. č. 8) je určen pro spalování hnědého uhlí, černého uhlí a dřevěných pelet. Jedná se o kotel s retortovým způsobem spalování paliva. Pro zlepšení spalování a snížení úletové prašnosti nad hořákem je instalován žáruvzdorný keramický deflektor, který navíc usměrňuje tok spalin přes výměník a minimalizuje škodliviny ve spalinách. Kotel je vybaven ventilátorem spalovacího vzduchu.

Výkon kotle lze nastavovat pomocí regulace času podávání/nepodávání paliva od cca 30 % do 100 % jmenovitého výkonu kotle (25 kW).

Předepsaným palivem je černé uhlí (krupice praná, hrášek praný) o výhřevnosti 21-23 MJ/kg, hnědé uhlí (ořech 2 a 3) o výhřevnosti 17-18,5 MJ/kg a dřevěné pelety (průměr 8-20 mm) o výhřevnosti 15-19 MJ/kg. Kotel je certifikován na hnědé uhlí, černé uhlí, dřevěné pelety. [80]



obr. č. 8 Automatický kotel Benekov V-Ling 25 [80]

3.2 Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S

Ekologické zplyňovací kotle Atmos kombi (viz obr. č. 9) jsou určeny pro vytápění rodinných domků, chat a chalup a jiných podobných objektů. Kotle jsou konstruovány pro spalování hnědého uhlí ořech 1 a kusového dřeva.

Těleso kotlů je vyrobeno jako svařenec z kvalitních ocelových plechů o tloušťce 3 až 6 mm. Tvoří je násypka paliva, která je spodní čisti vybavena otočnou roštovou mechanikou s přívodem sekundárního spalovacího vzduchu. Spodní dohořivací prostor je vyložen keramickými tvarovkami. V zadní části tělesa kotlů je svislý spalinový kanál, opatřený ve vrchní části zatápníci záklopkou. Vrchní část spalinového kanálu je opatřena odtahovým hrdlem pro připojení na komín. Primární a sekundární spalovací vzduch je předehříván na vysokou teplotu.

Předepsané palivo pro kotel ATMOS kombi C20S je hnědé uhlí ořech 1 o výhřevnosti 17 - 20 MJ/kg a suché dřevo o výhřevnosti 15 - 17 MJ/kg s obsahem vody 12 - 20 % (průměr 80-150 mm). Rozsah jmenovitého výkonu: 20-25 kW (dle typu paliva). Certifikované palivo: kusové dřevo a hnědé uhlí (ořech 1). [81]



obr. č. 9 Zplyňovací kotel Atmos C20S [81]

3.3 Zplyňovací kotel Atmos DC25GS

Ekologické zplyňovací kotle (viz obr. č. 10) na dřevo jsou konstruovány pro spalování dřeva, na principu generátorového zplyňování s použitím odtahového ventilátoru, který odsává spaliny z kotle, nebo s použitím tlačného ventilátoru, který vhání spalovací vzduch do kotle.

Těleso kotlů je vyrobeno jako svařenec z kvalitních ocelových plechů o tloušťce 8 až 3 mm. Tvoří je násypka paliva (6 mm), která je ve spodní části opatřena zplyňovací tryskou s podélným otvorem pro průchod spalin a plynů. Dohořivací prostor pod ní je opatřen keramickými tvarovkami pro ideální vyhoření všech spalitelných látek s vysokou účinností při ekologicky šetrném spalování. V zadní části tělesa kotlů je svislý spalinový kanál, opatřený ve vrchní části zatápníci záklopkou. Vrchní část spalinového kanálu je opatřena odtahovým hrdlem pro připojení na komín.

Předepsané palivo pro kotel ATMOS DC25GS je suché dřevo o výhřevnosti 15-18 MJ/kg a vlhkosti 12-20% (průměr 70-150 mm). Rozsah jmenovitého výkonu: 17-25 kW (dle typu paliva) Certifikované palivo: kusové dřevo. [81]



obr. č. 10 Zplyňovací kotel Atmos DC25GS [81]

3.4 Odhořivací kotel Dakon DOR32S

Jedná se o kotel spalující palivo odhořivacím způsobem. Při spalování odhořívá dávka paliva postupně odspodu, přičemž spaliny procházejí spalinovým traktem, který je tvořen třemi tahy.

Výrobce uvádí, že teplovodní ocelové kotle DOR (viz obr. č. 11) jsou určeny pro spalování všech běžně užívaných pevných paliv - hnědého a černého uhlí, briket, koksu a dřeva.

Předepsané palivo pro kotel DOR 32 je hnědé uhlí - zrnění ořech 1 (20-40 mm), o výhřevnosti 16 MJ/kg, obsah vody do 28 %. Jmenovitý výkon: 32 kW. Certifikované palivo: hnědé uhlí (ořech 1). [82]



obr. č. 11 Odhořivací kotel Dakon DOR32 s [82]

3.5 Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26

Jedná se litinový kotel spalující palivo prohořivacím způsobem. Při spalování prohořívá dávka paliva najednou, přičemž spaliny procházejí celou vrstvou paliva. Spalinový trakt je tvořen jedním tahem.

Výrobce uvádí kotel Viadrus Hercules U26 (viz obr. č. 12) pracuje s přirozeným nebo nuceným oběhem topné vody a je vhodný pro vytápění rodinných domů a menších objektů. V otevřených systémech je kotel možno používat bez pojistného dochlazovacího zařízení.

Předepsané palivo je koks s výhřevností 26-30 MJ/kg (vlhkost max. 15 %), černé uhlí s výhřevností 26-28 MJ/kg (vlhkost max. 15 %), dřevo s výhřevností 14-18 MJ/kg (vlhkost max. 20 %). Rozsah jmenovitého výkonu: 22,5 - 30 kW (dle typu paliva). Při zkouškách byla použita 5-ti článková varianta kotle. Certifikované palivo: koks, černé uhlí, dřevo. [83]



obr. č. 12 Viadrus Hercules U26 [83]

4 POPIS ODBĚROVÝCH APARATUR, ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ A VÝPOČTU ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

Spalovací zařízení je při měření hydraulicky připojeno ke zkušební smyčce, která umožňuje stanovit veškeré výkonové parametry tohoto zařízení. Je měřen zejména průtok vody kotlem, teplota vstupní a výstupní otopné vody, teploty v zařízení, teplota spalin, spotřeba paliva atd.

4.1 Stanovení složení spalin za spalovacím zařízením a v ředícím tunelu

Stanovení složení spalin za spalovacím zařízením je realizováno v odběrovém místě 1 (viz obr. č. 7). V tomto místě jsou sledovány koncentrace - CO, CO₂, NO_x, SO₂, O₂, TOC.

Všechny plynné znečišťující látky jsou měřeny kontinuálně po celou dobu experimentu. Hodnoty jsou zapisovány v sekundových intervalech a do databáze měřených hodnot jsou ukládány minutové průměry. Všechny plynné látky jsou měřeny jako objemové koncentrace sledované látky v suchém plynu v ppm nebo %. Výjimkou jsou nemetanové těkavé organické sloučeniny (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 je koncentrace NMVOC přepočítána pomocí průměrné vlhkosti spalin vypočtené ze složení paliva a průměrné koncentrace O₂ za dobu spalovací zkoušky.

Objemové koncentrace stanovené v suchých spalinách byly přepočítány na hmotnostní koncentrace dle rovnice 1 [84],[85] vztažené na 1 m³ suchých spalin při normálních podmínkách (0 °C, 101 325 Pa).

$$c(x)_m = c(x)_v \times \rho_x \quad [mg/m_N^3] \quad (1)$$

kde:

- $c(x)_m$... hmotnostní koncentrace složky x [mg/m³_N]
- $c(x)_v$... objemová koncentrace složky x [ppm],
- ρ_x ... hustota složky x při normálních stanových podmínkách [kg/m³_N]
- x ... složky CO, SO₂, NO_x vyjádřené jako NO₂, NMVOC vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC)

Hmotnostní koncentrace jsou stanoveny pro každou hodnotu minutového průměru a přepočteny na nulový obsah kyslíku ve spalinách (viz rovnice 2) [85]. Poté je stanovena průměrná hmotnostní koncentrace složky x vztažená na 1 m³ suchých spalin při nulovém obsahu kyslíku ve spalinách za celou spalovací zkoušku. S koncentrací stanovenou při 0 % O₂ je dále počítáno.

$$c(x)_{stech} = c(x)_m \times \frac{21}{21 - O_{2m\ddot{e}r}} \quad [mg/m_N^3] \quad (2)$$

kde

- $c(x)_{stech}$... hmotnostní koncentrace složky x přepočítaná na nulový kyslík [mg/m³_N],
- O_{2m\ddot{e}r} ... průměrná koncentrace kyslíku v suchých spalinách stanovená v místě měření složky x (za kotlem) v [%]

Stanovení složení spalin v ředícím tunelu je realizováno v odběrovém místě 2 (viz obr. č. 7). V tomto místě je sledováno CO, CO₂, O₂, prach PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, PM_{0,1} a PAHs. Koncentrace znečišťujících látek je stanovena dle rovnic 1 a 2 a s koncentrací znečišťujících látek při 0 % O₂ je dále počítáno.

4.2 Stanovení koncentrace jednotlivých složek obsažených ve spalinách

Stanovení koncentrace O₂

Koncentrace O₂ je stanovována paramagnetickým principem pomocí analyzátorů plynů firmy ABB.

Stanovení koncentrace SO₂, CO, NO_x, CO₂

Koncentrace výše uvedených složek spalin je stanovována pomocí analyzátorů plynů firmy ABB, které pracují na principu pohlcování infračerveného záření.

Stanovení koncentrace TOC

Stanovení koncentrace TOC je prováděno analyzátozem firmy SICK. Jedná se plameno-ionizační princip stanovení uhlovodíků (FID).

4.3 Stanovení množství spalin

Množství spalin se stanovuje, podle množství a složení použitého paliva, nebo podle měření rychlosti spalin v ředícím tunelu.

4.3.1 Dle množství a složení paliva

Pro malá spalovací zařízení se musí stanovit množství spalovacího vzduchu a množství vzniklých spalin, abychom poté dostali hmotnostní koncentrace jednotlivých složek ve spalinách. Z bilance energetické, která se zjistí z látkové bilance (viz rovnice 3 a 4) se stanoví množství tepla ve spalinách. Použité rovnice jsou převzaty z literatury [85],[86].

Vztah pro látkovou bilanci pro palivo více složek o složení:

$$\bullet \text{ hrubé : } h + A + w = 1, \quad (3)$$

$$\bullet \text{ prvkové: } C + H + S + N + O + A + w = 1, \quad (4)$$

kde h ... hořlavina, A ... popelovina, w ... voda

Z látkové bilance se určí energetická bilance pomocí stechiometrických rovnic.

Výpočet stechiometrického množství kyslíku se vypočítá dle rovnice 5:

$$V_{O_2,t} = \frac{22,4}{12,01} \cdot C^r + \frac{22,43}{2 \cdot 2} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{32} \cdot S^r - \frac{22,39}{32} \cdot O_2^r \quad [m_N^3/kg] \quad (5)$$

Množství teoretického vzduchu suchého se vypočítá dle rovnice 6:

$$V_{vz,t} = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} \quad [m_N^3/kg] \quad (6)$$

Množství vzniklých spalin teoretických suchých se vypočítá dle rovnice 7:

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3/kg] \quad (7)$$

Vodní pára ve spalinách se vypočítá dle rovnice 8:

$$V_{H_2O,t}^{sp} = 11,11 \cdot H^r + 1,24 \cdot W^r + (v-1) \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3/kg] \quad (8)$$

kde:

v ... součinitel respektující zvětšení objemu suchého vzduchu v důsledku vlhkosti.[-]

Součinitel zvětšení objemu vlhkostí vzduchu v se vypočítá dle rovnice 9:

$$v = 1 + \frac{\varphi \times p''}{p_{atm} - p''} \quad [-] \quad (9)$$

kde:

φ_{cc} ... relativní vlhkost okolního vzduchu [-],
 p ... parciální tlak vodní páry při teplotě okolí [Pa],
 p_{atm} ... měřený atmosférický tlak [Pa]

4.3.2 Dle měření rychlosti spalin v ředícím tunelu

V ředícím tunelu je instalována měřicí rychlostní sonda, která po celou dobu měření kontroluje a měří rychlost spalin. Rychlost stanovená uprostřed potrubí je násobena konstantou profilu k_{prof} , která má hodnotu 0,831. Takto se stanoví střední rychlost spalin $v_{stř}$ v měřicím profilu v m/s. Vynásobením této veličiny $v_{stř}$ obsahem plochy profilu je získán průtok spalin v ředícím tunelu při aktuálním stavu spalin a aktuálním kyslíku. [85],[86]

Rychlost spalin uprostřed potrubí se vypočítá dle rovnice 10:

$$v = k \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho_{sp}}} \quad [m/s] \quad (10)$$

kde:

k ... konstanta rychlostní sondy [-],
 Δp ... diferenční tlak naměřený na rychlostní sondě [Pa]
 ρ ... hustota spalin v potrubí (ředícím tunelu) při aktuálních stavových podmínkách [kg/m^3]

Střední rychlost se vypočítá dle rovnice 11:

$$v_{stř} = v \times k_{prof} \quad [m/s] \quad (11)$$

kde:

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

Průtok vlhkých spalin V_V v ředícím tunelu za aktuálních stavových podmínek se vypočítá dle rovnice 12:

$$V_V = S \times v_{stř} \times 3600 \quad [m^3/h] \quad (12)$$

kde:

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

Průtok suchých spalin $V_{S,N}$ v ředícím tunelu při normálních stavových podmínkách spalin se vypočítá dle rovnice 13:

$$V_{S,N} = V_V \times \frac{(T_N + t_{sp})}{T_N} \times \frac{p_N}{(p_{atm} + p_{stat})} \times (1 - w) \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (13)$$

kde:

- T_N ... normální termodynamická teplota 273,15 [K]
- t_{sp} ... měřená teplota spalin v měřicím profilu [°C]
- p_N ... normální tlak 101 325 [Pa]
- p_{atm} ... měřený atmosférický tlak [Pa]
- p_{stat} ... měřený statický tlak v měřicím profilu podtlak se záporným znaménkem/ přetlak s kladným znaménkem [Pa]
- 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 se vypočte dle rovnice 14:

$$V_{S,N,stech} = V_{S,N} \times \frac{21 - O_{2mer}}{21} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (14)$$

kde:

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

4.4 Stanovení výkonu teplovodního kotle a účinnosti spalovacího zařízení

Výkon teplovodního kotle P se vypočítá dle rovnice 15 [84]:

$$P = m_v \times c_v \times \Delta t \quad [\text{kW}] \quad (15)$$

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]

Účinnost spalovacího zařízení se určuje přímou nebo nepřímou metodou.

4.4.1 Stanovení nepřímé účinnosti spalovacího zařízení

Po stechiometrických výpočtech se účinnost kotle stanoví nepřímou metodou měření jednotlivých ztrát [87]. Vychází se z rovnice 16:

$$\eta = 100 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_f - \zeta_k - \zeta_{sv} \quad [\%] \quad (16)$$

kde:

- η ... účinnost kotle [%]
- ζ_C ... ztráta mechanickým nedopalem (hořlavina v tuhých zbytcích) [-]
- ζ_{CO} ... ztráta chemickým nedopalem (hořlavina ve spalinách) [-]
- ζ_f ... ztráta citelným teplem tuhých zbytků [-]
- ζ_k ... ztráta komínová (fyzické teplo spalin) [-]
- ζ_{sv} ... ztráta sdílením tepla do okolí [-]

Ztráta mechanickým nedopalem (hořlavinou v tuhých zbytcích) se vypočítá dle rovnice 17:

$$\zeta_C = \frac{b \cdot C^r \cdot 32600}{Q_1} \quad [-] \quad (17)$$

kde:

- ξ_C ... ztráta mechanickým nedopalem [-]
- b ... podíl nespáleného uhlíku odcházející ze zařízení společně s tuhými zbytky (škvára, popílek, úlet) [-]
- C^r ... zastoupení uhlíku v surovém stavu v palivu [-]
- Q_1 ... redukovaná výhřevnost paliva [kJ/kg]

Teplo přivedené v 1 kg paliva se vypočítá dle rovnice 18:

$$Q_1 = Q_i^r + \Delta Q_{POV} + \Delta Q_{pal} + \Delta Q_{sr} \quad [\text{kJ/kg}_{pal}] \quad (18)$$

kde:

- Q_1 ... teplo přivedené v 1 kg paliva [kJ/kg_{pal}]
- Q_i^r ... výhřevnost směsi [kJ/kg_{pal}]
- ΔQ_{pal} ... teplo přivedené přehřevem 1 kg paliva [kJ/kg_{pal}]
- ΔQ_{POV} ... teplo přivedené přehřevem spalovacího vzduchu [kJ/kg_{pal}]
- ΔQ_{sr} ... teplo přivedené recirkulací spalin [kJ/kg_{pal}]

Ztráta chemickým nedopalem (hořlavina ve spalinách) se vypočítá dle rovnice 19:

$$\zeta_{CO} = \frac{(12640 \cdot a_1 \cdot V_{sCO} + 35800 \cdot a_2 \cdot V_{sCH_4})}{Q_1} \quad [-] \quad (19)$$

kde:

- ξ_{CO} ... ztráta chemickým nedopalem (hořlavina ve spalinách) [-]
- Q_1 ... teplo přivedené v 1 kg paliva [kJ/kg_{pal}]
- a_1 ... podíl uhlíku paliva spáleného na CO [kg/kg_{pal}]
- a_2 ... podíl nespáleného CH₄ [kg/kg_{pal}]
- V_{si} ... stechiometrický podíl složek v suchých spalinách [m³/kg_{pal}]

Ztráta citelným teplem tuhých zbytků se vypočítá dle rovnice 20:

$$\zeta_f = \frac{A^r \cdot \left(\sum \frac{X_i \cdot \bar{c}_{si} \cdot (t_i - t_0)}{1 - C_i} \right)}{Q_1} \quad [-] \quad (20)$$

kde:

- ζ_f ... ztráta citelným teplem tuhých zbytků [-]
- A^r ... obsah popela v surovém palivu [-]
- X_i ... hmotnostní podíl složky tuhých zbytků [kg/kg_{pal}]
- C_i ... hmotnostní podíl složky tuhých zbytků [kg/kg_{pal}]
- Q_1 ... teplo přivedené v 1 kg paliva [kJ/kg_{pal}]
- \bar{c}_{si} ... střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků [kJ/(K·m³)]
- t_i ... teplota tuhých zbytků [°C]
- t_0 ... vztažná teplota [°C], 20 °C nemá souvislost s měřenou teplotou okolí

Střední měrná tepelná kapacita škváry se vypočítá dle rovnice 21:

$$\bar{c}_{ssk} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{sk} \quad [\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})] \quad (21)$$

Střední měrná tepelná kapacita popílku se vypočítá dle rovnice 22:

$$\bar{c}_{spop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} \quad [\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})] \quad (22)$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

Komínová ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech, významně ovlivňuje účinnost kotle. Velikost závisí na teplotě spalin a přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem. Při zvětšování jejich hodnot ztráta narůstá. Možnost výpočtu dle rovnice 23:

$$\zeta_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s \cdot (t_k - t_0)}{Q_1} \quad [-] \quad (23)$$

kde:

- ζ_k ... ztráta komínová (fyzické teplo spalin) [-]
- $V_{sp,sk}^v$... objem spalin skutečných vlhkých [m³/kg_{pal}]
- \bar{c}_s ... střední měrná tepelná kapacita spalin [kJ/(K·m³)]
- Q_1 ... teplo přivedené v 1 kg paliva [kJ/kg_{pal}]
- t_k ... teplota spalin [°C]
- t_0 ... vztažná teplota [°C], 20 °C nemá souvislost s měřenou teplotou okolí

Dle literatury [88] se střední měrná tepelná kapacita spalin může vzít jako průměrná hodnota. Literatura uvádí průměrnou hodnotu na základě intervalu teplot (0 °C do 300 °C) a druhu spalovaného paliva.

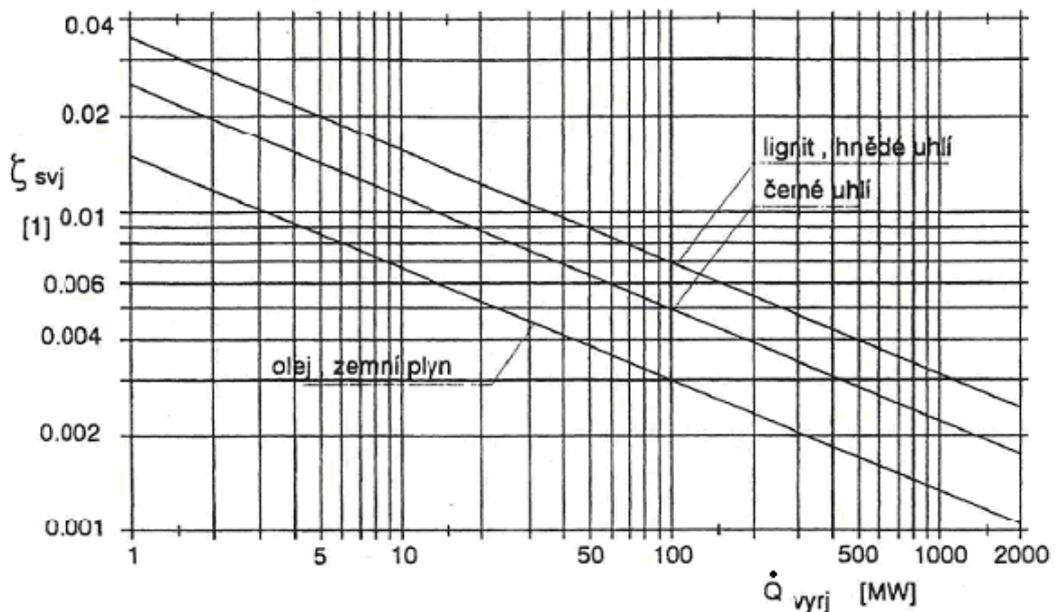
Ztráta sdílením tepla do okolí

Tato ztráta závisí na kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování, velikosti povrchu a výkonu kotle a vypočítá se dle rovnice 24:

$$\xi_{sv} = \xi_{svj} \times \frac{Q_{vyrj}}{Q_{vyr}} \quad [-] \quad (24)$$

kde:

- ξ_{sv} ... ztráta sdílením tepla do okolí [-]
- ξ_{svj} ... ztráta sdílením tepla do okolí při jmenovitém výkonu [-] viz graf č. 1
- Q_{vyrj} ... jmenovitý výkon kotle [kW]
- Q_{vyr} ... pracovní výkon kotle [kW]



graf č. 1 Ztráta sdílením tepla do okolí [87]

4.4.2 Stanovení přímé účinnosti spalovacího zařízení

Přímá účinnost η se vypočte dle rovnice 25 [84],[85],[86]:

$$\eta = \frac{P}{P_{př}} \quad [\%] \quad (25)$$

kde:

- P ... tepelný výkon spalovacího zařízení [kW]
- $P_{př}$... tepelný příkon [kW]

Tepelný příkon se stanovuje dle rovnice 26 [84],[85]:

$$P_{př} = \frac{m_1 - m_2 \times Q_i^r}{3,6} \quad [\text{kW}] \quad (26)$$

kde:

- m_1 ... tepelný výkon spalovacího zařízení [kW]
- m_2 ... tepelný příkon [kW]
- Q_i^r ... výhřevnost paliva [MJ/kg]
- t ... doba zkoušky [h]

Stanovení hmotového toku paliva je obtížné. Je možno stanovit množství přikládaného paliva, ale nastává problém se stanovením času, po který palivo vyhoří - konec spalovací zkoušky. Při reálných spalovacích zkouškách je váženo nejen množství přiloženého paliva, ale i spalovací zařízení i s palivem a je co celý čas spalovací zkoušky pozorován úbytek paliva. Po spalovací zkoušce nelze dosáhnout hmotnosti před přiložením paliva, neboť v kotli zůstává popel a nedohořelé zbytky paliva.

4.5 Stanovení jednotlivých velikostních frakcí částic a adsorbovaných PAHs

Při odběru se vzorkuje dle standardu EPA CTM 039 [71], ČSN EN ISO 23 210 [68] (pomocí impaktoru DLPI a cyklonu) a normy ISO 11338-1 [73]: filtrační metoda (PAHs). Odlišnost od standardu EPA CTM 039 - plyn je chlazen již v ředícím tunelu před impaktorem.

4.5.1 Stanovení hmotnostní koncentrace částic

Stanovení je provedeno gravimetrickou metodou v odběrovém místě 2 (viz obr. č. 7, obr. č. 13). Princip měřicí metody je založen na „izokinetickém“ odsátí vzorku plynu z ředícího tunelu a na separaci a záchytu jednotlivých frakcí.

Hmotnostní koncentrace TZL a jednotlivých frakcí zachycených na foliích impaktoru a filtru a oplachu cyklonu jsou stanoveny z navážky částic podělené objemem spalin při normálních stavových podmínkách v ředícím tunelu (0 °C, 101 325 Pa, viz rovnice 27) a poté přepočítány na nulový procentuální kyslík (viz rovnice 28) [84],[85].

$$c(x)_m = \frac{m_x}{V_x} \quad [mg/m^3_N] \quad (27)$$

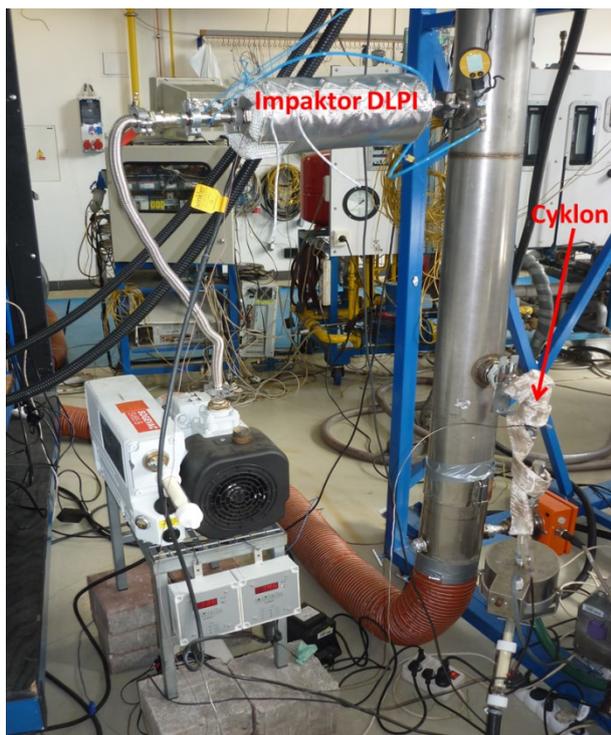
kde:

- $c(x)_m$... hmotnostní koncentrace složky x [mg/m^3_N],
- m_x ... hmotnost složky x [mg],
- V_x ... objem spalin při normálních stavových podmínkách [m^3_N],
- x ... složky TZL, PM_x , PAHs

$$c(x)_{stech} = c(x)_m \times \frac{21}{21 - O_{2RT}} \quad [mg/m^3_N] \quad (28)$$

kde

- $c(x)_{stech}$... hmotnostní koncentrace složky x přepočítaná na nulový kyslík [mg/m^3_N],
- O_{2RT} ... průměrná objemová koncentrace kyslíku v suchých spalinách stanovená v ředícím tunelu [%]



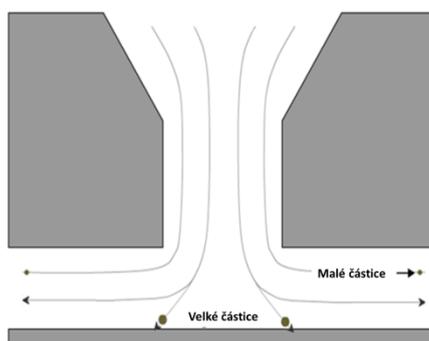
obr. č. 13 Odběr TZL a PMx pomocí impaktoru DLPI a cyklonu

K separaci frakcí na PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 a $PM_{0.1}$ je využíváno nízkotlakého kaskádového impaktoru DLPI (viz obr. č. 14). Impaktor separuje částice (30 nm - 10 μ m) na principu urychlení aerosolových částic v proudu vzduchu. Zachytává prachové částice na hliníkové či karbonátové fólie.



obr. č. 14 Nízkotlaký kaskádový impaktor DLPI [89]

Princip urychlení proudu vzduchu je založen na průchodu zúženou kruhovou tryskou s následným ostrým zakřivením jeho dráhy. S proudem vzduchu jsou v trysce také urychleny aerosolové částice. Menší z nich kopírují dráhu proudnic vzduchu. Větší částice v důsledku větší setrvačnosti, při změně směru z proudu vzduchu vylétají a narážejí na impakční desku, kde jsou zachyceny. Kaskádový impaktor (viz obr. č. 15) klasifikuje částice přítomné ve vzorku vzduchu nebo plynu do známých rozsahů velikostí. Vzorek vzduchu se nasává přes kaskády postupně jemnějších trysek. Proud vzduchu z trysek dopadá na rovinné povrchy pro odběr vzorků a každý stupeň sbírá jemnější částice, než ten předchozí. [89]



obr. č. 15 Měření na principu urychlení aerosolových částic v proudu vzduchu [89]

Gravimetrické stanovení částic jednotlivých velikostních frakcí zachycených na foliích je provedeno na VEC v laboratoři paliv. Hliníkové folie průměru 25 mm jsou stříkány 2x sprejem DEKATI pro lepší záchyt částic (doba mezi nástřiky je cca 15 minut, viz obr. č. 16), zváženy a následně po cca 15 - 30 minutách vloženy do sběrných kroužků (viz obr. č. 17).



obr. č. 16 Nástřik sprejem DEKATI



obr. č. 17 Folie nastříkány sprejem DEKATI a vloženy do sběrných kroužků

Hmotnost částic na folii je určena na základě rozdílu hmotnosti folie před a po skončení vzorkování. Hmotnostní koncentrace je vypočítána jako podíl hmotnosti jednotlivé frakce zachycené na folii a objemu odebraného odpadního plynu (spalin). K vážení folií po vyvážení (ekvilibraci) v klimatizované váhově je používána mikrováha Mettler Toledo XP6 s přesností 0,001 mg (viz obr. č. 18).



obr. č. 18 Mikrováha Mettler Toledo XP6

Impaktor je během odběrů otápen pomocí topného pláště na teplotu spalin cca 100 °C.

Hmota zachycená na sběrných destičkách musí být v určitých limitech, aby se zabránilo odrazům částic. Odrazy způsobují, že některé částice se shromáždí na nesprávném impaktorovém stupni a způsobí chybu ve velikosti distribuovaných částic.

Odražené částice lze vidět ze spodní strany destičky (viz obr. č. 19). Pokud se tak stane, čas měření musí být zkrácen, nebo musí být použita ředička. Maximální hmota na stupni závisí od aerosolu, ale obvykle je 1 mg na stupeň.



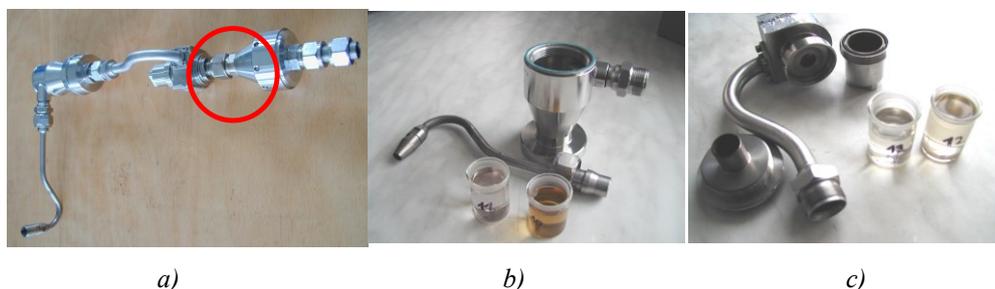
obr. č. 19 Přetížení impaktoru DLPI

Pro odběr částic a kontrolu správnosti odběru impaktorem DLPI je využíváno cyklonu k separaci frakcí na TZL, PM₁₀ a PM_{2,5} (viz obr. č. 20, obr. č. 21).



obr. č. 20 Odběr TZL pomocí cyklonu

Jedná se o sondu se zachycovačem, ve kterých se frakce separují odstředivými silami prostřednictvím soustavy cyklonu. Separované frakce se zachycují na stěnách a ve sběrných nádobkách. Hubicí a sondou jsou prosávány spaliny pomocí odběrové tratě, která umožňuje nastavení požadovaného průtoku a zároveň poskytuje údaj o odebraném množství suchých spalin za normálních podmínek. Část cyklonu s filtrem (označená červeně) byla zaměněna za zachycovač umožňující použití filtračního papíru s větším průměrem, což dovolilo provádět odběr po celou dobu spalovací zkoušky. Cyklon je během odběru otápen pomocí topných pásů na teplotu spalin cca 100 °C.



obr. č. 21 a) Sestava cyklonu, b) a c) Rozebraný cyklon a jeho oplachy po měření

Po ukončení odběru je cyklon postupně rozebírán, přičemž se acetonem oplachují jednotlivé části dle dělicích rovin jednotlivých frakcí. Oplachy tvoří jednu část, která je připočtena ke vzorku na filtru odpovídající frakce. Filtry jsou po vysušení zváženy.

4.5.3 Detekce a stanovení hmotnostní koncentrace PAHs

Analýza PAHs je prováděna na Centru nanotechnologií, VŠB-TU Ostrava v akreditované laboratoři Oddělení organické analýzy a katalytických procesů pod vedením doc. Ing. Daniely Plaché, Ph.D.

Extrakce jsou provedeny dle přístroje Speed - Extractor E916, Buchi Labortechnik (viz obr. č. 23), extrakčním činidlem - směs aceton:hexan 50:50, s nosným médiem - plynný dusík, teplota 100 °C a tlak 120 bar. Extrakce probíhá ve 2 cyklech po 15 minutách, pro kovové filtry 2 cykly po 10 minutách.



obr. č. 23 Speed - Extractor E916, Buchi Labortechnik

Analýza PAHs je prováděna pomocí metody GC/MS - Thermo Trace GC Ultra / TSQ Quantum XLS: split/splitless nástřik, režim SIM, kolona TG-5ms, 30 m x 0,25 mm x 0,25 um (viz obr. č. 24) .



obr. č. 24 Analýza PAHs metodou GC/MS

Výsledky jsou laboratoří dodány v jednotkách ng/vzorek, mez detekce k 0,01 až 0,1 dle konkrétního PAH, mez stanovitelnosti je uvedena v tabulkách u měření a nejistotu měření laboratoř uvádí mezi 30 - 40 %. Při měření jsou rovněž prováděny slepé pokusy (viz kap. 7.3).

4.6 Možnosti vyjádření množství emisí znečišťujících látek

Dle výše uvedených rovnic 27 a 28 se vypočítá hmotnostní koncentrace znečišťujících látek (ZL) v 1 m³ suchých spalin při normálních stavových podmínkách a při nulovém obsahu kyslíku. Všechny tyto koncentrace se dají přepočítat a vyjádřit několika způsoby, které se v praxi používají.

Hmotnostní koncentrace v suchých spalinách při 10 % kyslíku

Pro přepočet na 10 % kyslík se používá rovnice 20 [85]:

$$c(ZL)_{stech} = c(ZL)_m \times \frac{(21-10)}{21} \quad [mg/m_N^3] \quad (20)$$

kde

$c(ZL)_{stech}$...	hmotnostní koncentrace ZL v suchých spalinách při normálních stavových podmínkách a nulovém obsahu kyslíku [mg/m _N ³]
$c(ZL)_{10\%O_2}$...	hmotnostní koncentrace ZL v suchých spalinách při normálních stavových podmínkách při 10 % objemového obsahu kyslíku ve spalinách [mg/m _N ³]
ZL	...	znečišťující látka TZL, PM _x , PAHs

Emisní faktor, (měrná emise) vtažený na hmotnost spáleného paliva

Vypočítá se dle rovnice 21 [85]:

$$EF = \frac{m(ZL)}{m_{pal}} \quad [mg/kg_{pal}] \quad (21)$$

kde

m_{pal}	...	spotřeba paliva [kg/h]
-----------	-----	------------------------

Emisní faktor (měrná emise) vtažený na energii obsaženou ve spáleném palivu

Vypočítá se dle rovnice 22 [84],[85]:

$$EF = \frac{m(ZL)}{Q_i^r \times m_{pal}} \quad [mg/MJ] \quad (22)$$

kde

Q_i^r	...	výhřevnost paliva [MJ/kg]
---------	-----	---------------------------

PRAKTICKÁ ČÁST

5 POUŽITÁ PALIVA

V České republice je vytápěno [62]:

- 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 například tepelná čerpadla.

Při spalovacích zkouškách byla použita nejpoužívanější paliva v ČR. Ze zástupců fosilních paliv bylo vybráno hnědé uhlí s ohledem na jeho velkou oblibu při vytápění českých domácností tuhými palivy, které je spalováno více než uhlí černé nebo koks. V MSK v roce 2013 byla tato spotřeba cca 30 000 TJ [33]. Z biomasy bylo vybráno smrkové dříví a pelety. Kromě standardních paliv byly při zkouškách spalovány i tzv. PET brikety. Jednalo se o PET láhev s uříznutým hrdlem, která byla po okraj naplněna štěpkou. Do PET brikety byl dále nalit použitý fritovací olej. Takto byla PET briketa ponechána cca 14 h tak, aby olej nasáknul do štěpky. Před samotnou spalovací zkouškou byl zbývající nenasáknutý olej z PET brikety vylit. Ukázka přípravy PET brikety je uvedena na obr. č. 25.



obr. č. 25 Příprava PET brikety

Při spalovacích zkouškách byly PET brikety míchány s mokrým smrkovým dřevem a hnědým uhlím (HU) - palivo MIX. Aktuální elementární složení paliva a hmotnostní zastoupení jednotlivých složek paliva je uvedeno u konkrétních spalovacích zkoušek.

V tab. č. 2 je uveden rozbor použitých paliv, kde hnědé uhlí s označením Ořech 1 (HU O1) mělo granulometrii cca 4 cm a Ořech 2 (HU O2) mělo granulometrii cca 2 cm.

Před spalovacími zkouškami byla na VEC stanovena vlhkost paliv a bylo vypočítáno aktuální složení paliva. Dávka přikládaného paliva byla vypočítána na základě znalosti výhřevnosti použitého paliva a údajů o kotli (účinnost, jmenovitý výkon, doba hoření na jednu dávku paliva) udávaných výrobcem kotle.

tab. č. 2 Rozbor použitých paliv

		HU O1	HU O2	Mokrý smrkové dřevo	Suchý smrkové dřevo	Použitý fritovací olej *	Štěpka *	Dřevěné pelety
uhlík	[% _{hm}]	54,62	61,72	34,15	45,19	52,10	35,04	47,43
vodík	[% _{hm}]	4,46	5,10	4,35	5,75	7,48	4,44	6,10
dusík	[% _{hm}]	0,76	0,90	0,06	0,08	0,26	0,08	0,04
kyslík	[% _{hm}]	19,05	14,44	29,85	39,50	40,16	31,18	40,00
síra	[% _{hm}]	0,72	1,36	0,02	0,03	0,00	0,38	0,05
voda veškerá	[% _{hm}]	15,51	9,04	31,20	8,98	0,00	28,00	6,00
popel	[% _{hm}]	4,87	7,45	0,37	0,49	0,00	0,87	0,39
výhřevnost	[MJ/kg]	22,61	25,84	11,89	16,52	38,01	12,55	17,02

*Složky "PET" brikety

6 PROVÁDĚNÉ SPALOVACÍ ZKOUŠKY

Před každou spalovací zkouškou byl kotel uveden do běžného provozního stavu a byla vytvořena dostatečná žhavá základní vrstva paliva (cca 2 h). Poté byla na vytvořenou žhavou základní vrstvu paliva (v případě kotlů s ruční dodávkou paliva do spalovací komory) přiložená dávka paliva. Konec spalovací zkoušky byl stanoven tak, aby byla k dispozici ještě dostatečná žhavá vrstva paliva pro případné přiložení druhé dávky paliva. V případě, že byla spalovací zkouška krátká (méně než 2 h), byla přiložena další dávka paliva (kotel Viadrus Hercules U26).

Při spalovacích zkouškách jmenovitého výkonu byla vždy přiložena dávka paliva až po horní plnicí úroveň kotle.

Při spalovacích zkouškách sníženého výkonu byla vždy přiložena dávka paliva tak, aby délka zkoušky byla přibližně stejná jako při zkoušce jmenovitého výkonu.

V případě přikládání paliva MIX byla dávka přikládána tak, aby jednotlivé složky paliva byly ve spalovací komoře pokud možno promíchány.

Při výpočtu účinnosti kotlů nepřímou metodou nebyla měřena ztráta sdílením tepla do okolí (byla brána z měření prováděných na VEC dříve). Ztráta mechanickým nedopalem byla brána 0,5 % při spalování mokrého a suchého smrkového dřeva, 3 % při spalování HU a 1,5 % při spalování paliva MIX.

Veškeré, v textu nebo v tabulkách, uváděné koncentrace v mg/m^3_{N} jsou uvedeny při $\text{O}_{2,\text{ref}} = 10 \%$, aby bylo možné naměřené parametry kotlů porovnávat mezi sebou.

6.1 Automatický kotel Benekov V-Ling 25

V tomto kotli bylo spalováno hnědé uhlí - ořech 2 a dřevěné pelety. Hnědé uhlí ořech 1 není technicky možné v tomto kotli spalovat, protože systém dopravy paliva do hořáku není na toto palivo uzpůsoben. Rozbor použitých paliv je uveden v tab. č. 3.

tab. č. 3 Složení použitých paliv, Benekov V-Ling 25

		HU O2	Dřevěné pelety
uhlík	[% _{hm}]	61,72	47,43
vodík	[% _{hm}]	5,10	6,10
dusík	[% _{hm}]	0,90	0,04
kyslík	[% _{hm}]	14,44	40,00
síra	[% _{hm}]	1,36	0,05
voda veškerá	[% _{hm}]	9,04	6,00
popel	[% _{hm}]	7,45	0,39
výhřevnost	[MJ/kg]	25,84	17,02

Kotel při zkouškách na zkušebně je vidět na obr. č. 26.



obr. č. 26 Kotel Benekov V-Ling 25 při zkouškách na zkušebně VĚC

Výsledné naměřené výkonové a emisní parametry kotle jsou uvedeny v tab. č. 4.

tab. č. 4 Naměřené a vypočtené hodnoty, Benekov V-Ling 25, hnědé uhlí při jmenovitém a sníženém výkonu

Číslo spalovací zkoušky		1	2	3	4	
Čas počátku měření	h:min	9:45	11:15	9:44	9:26	
Čas konce měření	h:min	14:00	15:38	14:13	13:57	
Délka zkoušky	h	4,3	4,4	4,5	4,5	
Poznámka		Pjm	Psn	Pjm	Psn	
Atmosférický tlak	mbar	984	982	998	991	
Teplota vzduchu	°C	22,9	23,7	24,0	22,0	
Relativní vlhkost vzduchu	%	38,7	47,0	27,2	24,9	
Palivo		HU O2	HU O2	pelety	pelety	
Měřený výkon kotle	kW	23,9	7,6	24,8	7,7	
Spotřeba paliva	kg/h	4,24	1,40	6,19	2,05	
Teplota výstupní otopné vody	°C	68,3	65,4	87,2	67,1	
Teplota vstupní otopné vody	°C	51,6	52,7	69,2	58,4	
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%	78,7	75,8	84,7	79,5	
Ztráta citelným teplem spalin	%	15,4	14,3	12,2	12,5	
Ztráta plynným nedopalem	%	0,5	1,0	0,2	1,4	
Ztráta sdílením tepla do okolí	%	2,5	6,0	2,5	6,0	
Ztráta mechanickým nedopalem	%	3,0	3,0	0,5	0,5	
Teplota spalin	°C	238	133	219	128	
Tah komína	Pa	14,7	14,8	20,1	20,1	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}	11,2	15,8	8,0	14,6	
Přebytek vzduchu	-	2,14	4,07	1,61	3,30	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	1 069	2 103	316	2 941
	NO _x	mg/m ³ _N	453	321	176	163
	TOC	mg/m ³ _N	17	125	5	97
	CO ₂	g/m ³ _N	188	180	212	207

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

6.1.1 Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 1

Nastavení kotle při zkouškách: podávání paliva 5 s ON / 11 s OFF, výkon ventilátoru 100 %. Během spalovací zkoušky se koncentrace CO pohybovala v rozmezí od 600 do 1 800 mg/m³_N a koncentrace TOC byla do cca 40 mg/m³_N.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 1 a graf č. 2).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 2

Nastavení kotle při zkouškách: Snížený výkon: podávání paliva 10 s ON / 90 s OFF, výkon ventilátoru 50 %

Při spalovací zkoušce byl provoz kotle ustálený, což je vidět na průběhu koncentrace O₂, CO a TOC. Koncentrace CO byla v rozmezí cca 1 600 - 2 400 mg/m³_N, koncentrace TOC byla v rozmezí 40-240 mg/m³_N. Při spalovací zkoušce bylo dosaženo cca 32 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu. Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 3 a graf č. 4).

6.1.2 Pelety - jmenovitý a snížený výkon

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 3

Nastavení kotle při zkouškách: podávání paliva 13 s ON / 23 s OFF, výkon ventilátoru 55 %. Během spalovací zkoušky se koncentrace CO pohybovala v rozmezí od 250 do 500 mg/m³_N a koncentrace TOC byla do cca 20 mg/m³_N.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 5 a graf č. 6).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 4

Nastavení kotle při zkouškách: Snížený výkon: podávání paliva 5 s ON / 39 s OFF, výkon ventilátoru 4 %

Při spalovací zkoušce byl provoz kotle ustálený, což je vidět na průběhu koncentrace O₂, CO a TOC. Koncentrace CO byla v rozmezí cca 2 600 - 3 200 mg/m³_N, koncentrace TOC byla v rozmezí 50 - 230 mg/m³_N. Při spalovací zkoušce bylo dosaženo cca 31 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu. Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 7 a graf č. 8).

6.2 Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S

Kotel byl při zkoušce jmenovitého výkonu provozován s funkční regulací přívodu spalovacího vzduchu - klapa přívodu ovládána pomocí termostatického řetízkového regulačního ventilu.

Při zkoušce při sníženém výkonu byl termostatický regulační ventil vyřazen z činnosti (odpojen řetízek) a klapa přívodu spalovacího vzduchu byla uzavřena na minimum doporučené výrobcem. Také byl odpojen odtahový spalinový ventilátor. Při tomto nastavení kotle by měl kotel dle návodu k obsluze dosáhnout cca 50 % jmenovitého výkonu. Na nižší výkon není možno kotel provozovat. Toto nastavení popisuje výrobce jako stáložárný provoz. Kotel při zkouškách na zkušebně je vidět na obr. č. 27. Výsledné naměřené výkonové a emisní parametry kotle jsou uvedeny v tab. č. 5.



obr. č. 27 Kotel Atmos kombi C20S při zkouškách na zkušebně VEC

tab. č. 5 Naměřené a vypočtené hodnoty, Atmos kombi C20S, hnědé uhlí a směs paliva při jmenovitém a sníženém výkonu

Číslo spalovací zkoušky		5	6	7	8	
Čas počátku měření	h:min	9:20	10:05	9:38	9:48	
Čas konce měření	h:min	13:15	16:55	13:21	14:15	
Délka zkoušky	h	3,9	6,8	3,7	4,5	
Poznámka		Pjm	Psn	Pjm	Psn	
Atmosférický tlak	mbar	987	982	990	999	
Teplota vzduchu	°C	22,9	22,2	22,4	20,5	
Relativní vlhkost vzduchu	%	35,7	32,0	29,8	26,0	
Palivo		HU O1	HU O1	MIX	MIX	
Měřený výkon kotle	kW	25,8	12,8	27,3	11,2	
Spotřeba paliva	kg/h	5,16	2,51	6,20	2,67	
Teplota výstupní otopné vody	°C	77,0	67,1	73,9	59,0	
Teplota vstupní otopné vody	°C	57,6	50,6	53,7	46,6	
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%	79,7	81,3	77,5	79,9	
Ztráta citelným teplem spalin	%	14,5	7,2	14,9	9,0	
Ztráta plynným nedopalem	%	0,3	2,6	3,5	3,6	
Ztráta sdílením tepla do okolí	%	2,5	6,0	2,5	6,0	
Ztráta mechanickým nedopalem	%	3,0	3,0	1,5	1,5	
Teplota spalin	°C	264	139	308	143	
Tah komína	Pa	22,7	19,5	22,6	19,6	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}	9,2	9,8	8,1	11,4	
Přebytek vzduchu	-	1,77	1,87	1,63	2,18	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	1 280	6 396	7 142	10 115
	NO _x	mg/m ³ _N	220	140	158	150
	TOC	mg/m ³ _N	11	295	1 478	2 651
	CO ₂	g/m ³ _N	197	189	185	182

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

6.2.1 Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon

Při těchto spalovacích zkouškách bylo spalováno hnědé uhlí ořech 1 viz tab. č. 6.

tab. č. 6 Složení hnědého uhlí, Atmos kombi C20S

		HU O1
uhlík	[% _{hm}]	54,62
vodík	[% _{hm}]	4,46
dusík	[% _{hm}]	0,76
kyslík	[% _{hm}]	19,05
síra	[% _{hm}]	0,72
voda veškerá	[% _{hm}]	15,51
popel	[% _{hm}]	4,87
výhřevnost	[MJ/kg]	22,61

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 5

Při zkoušce jmenovitého výkonu byly koncentrace CO a TOC během spalovací zkoušky velice nízké ($CO < 1\ 000\ \text{mg/m}^3_{\text{N}}$, $TOC < 50\ \text{mg/m}^3_{\text{N}}$). Jen v posledních 30 min došlo k nárůstu koncentrace CO.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovacích zkoušek při jmenovitém výkonu jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 9 a graf č. 10).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 6

Při zkoušce sníženého výkonu bylo dosaženo cca 50 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

V první 1,4 h se byly koncentrace CO a TOC relativně nízké ($CO < 3\ 000\ \text{mg/m}^3_{\text{N}}$, $TOC < 500\ \text{mg/m}^3_{\text{N}}$). Pak došlo k postupnému nárůstu koncentrací CO až na hodnoty $10\ 000\ \text{mg/m}^3_{\text{N}}$. Tento stav se nezlepšil až do konce spalovací zkoušky.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovacích zkoušek při sníženém výkonu jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 11 a graf č. 12).

6.2.2 Palivo MIX -jmenovitý a snížený výkon

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 7

Při spalovací zkoušce byla do kotle přiložena směs paliv v poměru uvedeném v tab. č. 7. V téže tabulce je také uvedeno výsledné přepočítané složení paliva. Nejprve bylo přiloženo hnědé uhlí a na vrstvu hnědého uhlí byla přiložena směs mokrého dřeva a PET brikety. V dávce paliva bylo 10 ks PET briket. Dávka paliva ve spalovací komoře kotle je vidět na obr. č. 28.

tab. č. 7 Složení paliva MIX, Atmos kombi C20S, jmenovitý výkon

			palivo MIX		
PET briketa	HU O1	[%hm]	23		
	fritovací olej	[%hm]	23		
	štěpka	[%hm]	13		
	mokrý dřevo	[%hm]	41		
			vodík	[% _{hm}]	5,11
			dusík	[% _{hm}]	0,27
			kyslík	[% _{hm}]	29,95
			síra	[% _{hm}]	0,22
			voda veškerá	[% _{hm}]	19,99
			popel	[% _{hm}]	1,37
			výhřevnost	[MJ/kg]	20,46



obr. č. 28 Palivo MIX ve spalovací komoře, Atmos kombi C20S

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 13 a graf č. 14).

Z grafu průběhu koncentrace emisí je vidět, že ihned po přiložení dávky paliva došlo k prudkému nárůstu koncentrace CO (až na koncentraci 20 000 mg/m³_N) a TOC (až na koncentraci 6 000 mg/m³_N), což bylo zřejmě způsobeno intenzivním hořením oleje na vrstvě žhavého uhlí. Tento jev byl provázen poklesem koncentrace O₂ ve spalínách až na hodnoty cca 2 %. Tento stav byl doprovázen tmavým kouřem vystupujícím z komína. Po cca 1,5 h po přiložení paliva se kotel emisně dostal do „běžného provozního stavu“.

Snižovaný výkon - spalovací zkouška č. 8

Při zkoušce sníženého výkonu bylo dosaženo cca 41 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

Při spalovací zkoušce byla do kotle přiložena směs paliv v poměru uvedeném v tab. č. 8. V téže tabulce je také uvedeno výsledné přepočítané složení paliva. Nejprve bylo přiloženo hnědé uhlí a na vrstvu hnědého uhlí byla přiložena směs mokrého dřeva a PET brikety. V dávce paliva bylo 5 ks PET briket.

tab. č. 8 Složení paliva MIX, Atmos kombi C20S, snížený výkon

					palivo MIX
				vodík [% _{hm}]	4,76
				dusík [% _{hm}]	0,34
				kyslík [% _{hm}]	27,13
				síra [% _{hm}]	0,30
				voda veškerá [% _{hm}]	21,58
				popel [% _{hm}]	2,02
				výhřevnost [MJ/kg]	18,93
PET bríketa	HU O1 [% _{hm}]		37		
	fritovací olej [% _{hm}]		12		
	štěpka [% _{hm}]		6		
	mokrě dřevě [% _{hm}]		45		

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 15 a graf č. 16).

Po přiložení dávky paliva nedošlo k tak razantnímu zvýšení koncentrací CO a TOC jako v případě zkoušky při jmenovitém výkonu, ale také nedošlo (ve druhé polovině zkoušky) k tak výraznému poklesu koncentrací CO a TOC.

6.3 Zplyňovací kotel Atmos DC25GS

Kotel byl při zkoušce jmenovitého výkonu provozován s funkční regulací přívodu spalovacího vzduchu - klapa přívodu ovládána pomocí termostatického řetízového regulačního ventilu.

Při zkoušce při sníženém výkonu byl termostatický regulační ventil vyřazen z činnosti (odpojen řetízek) a klapa přívodu spalovacího vzduchu byla uzavřena na minimum doporučené výrobcem. Také byl odpojen odtahový spalinový ventilátor. Při tomto nastavení kotle by měl kotel dle návodu k obsluze dosáhnout cca 50 % jmenovitého výkonu. Na nižší výkon není možno kotel provozovat. Toto nastavení popisuje výrobce jako stáložární provoz.

Při přikládání dávky paliva bylo postupováno tak, že na žhavou základní vrstvu paliva byla přiložena 1 vrstva suššího smrkového dřeva (s vlhkostí 20 %) a na tu bylo dále přiloženo mokré smrkové dřevě, rozbor paliva je uveden v tab. č. 9. Kotel při zkouškách na zkušebně je vidět na obr. č. 29.

tab. č. 9 Složení mokrého smrkového dřevě, Atmos DC25GS

		Mokrě smrkové dřevě zkouška č. 9	Mokrě smrkové dřevě zkouška č. 10
uhlík [% _{hm}]		35,02	35,73
vodík [% _{hm}]		4,46	4,55
dusík [% _{hm}]		0,06	0,06
kyslík [% _{hm}]		30,61	31,24
síra [% _{hm}]		0,03	0,03
voda veškerá [% _{hm}]		29,46	28,02
popel [% _{hm}]		0,38	0,39
výhřevnost [MJ/kg]		12,25	12,55



obr. č. 29 Kotel Atmos DC25GS při zkouškách na zkušebně VEC

Výsledné naměřené výkonové a emisní parametry kotle jsou uvedeny v tab. č. 10.

tab. č. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty, Atmos DC25GS

Číslo spalovací zkoušky			9	10
Čas počátku měření	h:min		9:52	8:14
Čas konce měření	h:min		13:36	12:14
Délka zkoušky	h		3,73	4,00
Poznámka			Pjm	Psn
Atmosférický tlak	mbar		996	995
Teplota vzduchu	°C		22,7	23,1
Relativní vlhkost vzduchu	%		37,9	40,7
Palivo			dřevo-smrk- mokrý	dřevo-smrk- mokrý
Měřený výkon kotle	kW		19,2	9,5
Spotřeba paliva	kg/h		7,33	3,62
Teplota výstupní otopné vody	°C		75,8	76,1
Teplota vstupní otopné vody	°C		61,1	66,3
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%		77,1	75,1
Ztráta citelným teplem spalin	%		17,3	11,1
Ztráta plyným nedopalem	%		2,6	7,3
Ztráta sdílením tepla do okolí	%		2,5	6,0
Ztráta mechanickým nedopalem	%		0,5	0,5
Teplota spalin	°C		189	114
Tah komína	Pa		22,1	22,6
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}		13,1	14,8
Přebytek vzduchu	-		2,65	3,39
Koncentrace plyných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	5 730	15 480
	NO _x	mg/m ³ _N	135	35
	TOC	mg/m ³ _N	402	2 918
	CO ₂	g/m ³ _N	201	194

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

6.3.1 Mokr  smrkové d veo - jmenovitý a snien  výkon

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 9

Při zkoušce bylo dosaženo výkonu 19,2 kW. Je z ejm , že zvyšen  vlhkost paliva neměla na funkci kotle (z pohledu schopnosti dosáhnutí jmenovitého výkonu) z asadn  vliv. Kotel fungoval během spalovací zkoušky bez větších problémů, což lze vidět z průběhu výkonových parametrů kotle - p iloha A viz graf č. 17. Z průběhů koncentrací sledovaných škodlivin - p iloha A viz graf č. 18, je vidět, že emisní byl kotel poměrně neust len  - koncentrace CO kolísala v rozsahu 3 000 - 10 000 mg/m³_N. Koncentrace TOC byla většinu spalovací doby menší než 500 mg/m³_N.

Snien  výkon - spalovací zkouška č. 10

Při zkoušce snien ho výkonu bylo dosaženo cca 50 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

Výkon kotle byl po dobu spalovací zkoušky ust len , ale koncentrace CO kolísaly od 7 500 do 20 000 mg/m³_N a koncentrace TOC kolísaly od 500 do 5 000 mg/m³_N.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v p iloze A (viz graf č. 19 a graf č. 20).

6.4 Odhořívací kotel Dakon DOR32 s

Kotel byl při zkoušce jmenovitého výkonu provozován s funkcn  regulací p ivodu primárního spalovacího vzduchu (vzduch pod rošt, klapa umístěna v popelníkových dv rk ch) - klapa p ivodu ovládána pomocí termostatického řetízkového regulačního ventilu. Regulátory p ivodu sekundárního spalovacího vzduchu byly otevřeny dle použitého paliva a doporučení výrobce. Otvor pro p ivod vzduchu nad vrstvu paliva (v p ikl dac ch dv rk ch) byl uzavřen. Z topov  klapa byla uzavřena - spaliny procházely všemi tahy kotle (3 tahy). Kom nov  klapa byla otevřena.

Při zkoušce při snien m výkonu byl termostatick  regulační ventil vyřazen z činnosti (odpojen řetízek) a klapa p ivodu primárního spalovacího vzduchu byla uzavřena na minimum doporučování výrobce. P ivody sekundárního spalovacího vzduchu byly uzavřeny. Z topov  klapa byla otevřen  - spaliny procházely jen jedním tahem kotle. Kom nov  klapa byla uzavřena. Toto nastavení popisuje výrobce jako st loárn  provoz pro udržení ohně v kotli přes noc.

Kotel při zkouškách na zkušebn  je vidět na obr.  . 30.



obr.  . 30 Kotel Dakon DOR32 s při zkouškách na zkušebn  VEC

V sledn  nam řen  výkonové a emisní parametry kotle jsou uvedeny v tab.  . 11.

tab. č. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty, Dakon DOR32 s

Datum měření		11	12	13	14	15	16	17	
Čas počátku měření	h:min	9:54	9:42	9:44	9:34	9:56	9:10	9:15	
Čas konce měření	h:min	15:38	14:06	12:35	13:30	12:28	13:33	13:53	
Délka zkoušky	h	5,73	4,40	2,85	3,93	2,53	4,38	4,63	
Poznámka		Pjm	Psn	Pjm	Psn	Psn	Pjm	Psn	
Atmosférický tlak	mbar	978	990	982	976	983	1 000	999	
Teplota vzduchu	°C	22,2	20,5	20,0	22,7	23,5	22,3	21,9	
Relativní vlhkost vzduchu	%	46,2	48,8	49,7	43,6	44,4	28,8	25,7	
Palivo		HU O1	HU O1	MIX	MIX	mokrý smrk	suchý smrk	suchý smrk	
Měřený výkon kotle	kW	22,8	7,3	19,8	8,4	11,4	15,2	7,5	
Spotřeba paliva	kg/h	4,76	1,63	4,59	1,94	4,89	4,58	2,14	
Teplota výstupní otopné vody	°C	74,5	61,1	72,3	65,8	62,0	62,0	53,2	
Teplota vstupní otopné vody	°C	58,6	53,2	58,6	57,5	54,1	50,7	45,0	
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%	76,1	71,1	77,2	74,9	68,5	72,3	76,3	
Ztráta citelným teplem spalin	%	15,3	9,0	14,1	11,3	23,7	21,0	10,6	
Ztráta plynným nedopalem	%	3,1	10,8	4,5	6,3	4,8	3,7	6,7	
Ztráta sdílením tepla do okolí	%	2,5	6,0	2,6	6,0	2,5	2,5	6,0	
Ztráta mechanickým nedopalem	%	3,0	3,0	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	
Teplota spalin	°C	248	176	238	205	180	208	161	
Tah komína	Pa	25,4	23,0	25,8	26,0	24,6	24,9	24,9	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}	11,0	10,3	10,4	9,6	15,6	14,6	11,4	
Přebytek vzduchu	-	2,10	1,96	1,98	1,83	3,92	3,27	2,20	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	6 456	30 199	9 356	15 008	9 512	9 419	15 902
	NO _x	mg/m ³ _N	171	86	117	85	150	99	51
	TOC	mg/m ³ _N	611	8 393	3 011	8 090	2 562	2 177	6 446
	CO ₂	g/m ³ _N	192	178	185	166	192	202	201

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

6.4.1 Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon

Složení hnědého uhlí při spalovacích zkouškách č. 11 a 12 uvádí tab. č. 12.

tab. č. 12 Složení hnědého uhlí, Dakon DOR32 s

		HU O1
uhlík	[% _{hm}]	54,62
vodík	[% _{hm}]	4,46
dusík	[% _{hm}]	0,76
kyslík	[% _{hm}]	19,05
síra	[% _{hm}]	0,72
voda veškerá	[% _{hm}]	15,51
popel	[% _{hm}]	4,87
výhřevnost	[MJ/kg]	22,61

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 11

Při zkoušce jmenovitého výkonu byly přívody sekundárního spalovacího vzduchu otevřeny na 50 % průměru trubky (viz obr. č. 31).



obr. č. 31 Kotel Dakon DOR32 s, přívod sekundárního spalovacího vzduchu

Cca 1 hod po přiložení dávky paliva došlo k prudkému nárůstu koncentrace CO a TOC - toto mohlo být způsobeno zaklenbováním paliva, vytvoření kapsy a následnému sesypání paliva na žhavou vrstvu. Tomu odpovídá i pokles koncentrace O₂ ve spalinách, který nastal ve stejnou dobu.

Během zkoušky nebylo dosaženo jmenovitého výkonu uváděného výrobcem (32 kW), ale jen výkonu 22,8 kW. Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 21 a graf č. 22).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 12

Při zkoušce sníženého výkonu byl provozní stav kotle neustálený, což se projevvalo velkým kolísáním teploty spalin a výkonu. Také koncentrace CO a TOC byly během zkoušky vysoké.

Při zkoušce bylo dosaženo cca 32 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 23 a graf č. 24).

6.4.2 Palivo MIX - jmenovitý a snížený výkon

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 13

Při spalovací zkoušce byla do kotle přiložena směs paliv v poměru uvedeném v tab. č. 13.

tab. č. 13 Složení paliva MIX, Dakon DOR32 s, jmenovitý výkon

			palivo MIX
PET briketa	HU O1	[%hm]	44
	fritovací olej	[%hm]	13
	štěpka	[%hm]	9
	mokrý dřev	[%hm]	34
	uhlík	[%hm]	45,62
	vodík	[%hm]	4,82
	dusík	[%hm]	0,40
	kyslík	[%hm]	26,57
	síra	[%hm]	0,36
	voda veškerá	[%hm]	19,88
	popel	[%hm]	2,35
	výhřevnost	[MJ/kg]	20,13

V téže tabulce je také uvedeno výsledné přepočítané složení paliva. Nejprve bylo přiloženo trochu hnědého uhlí a pak byla přiložena směs mokrého dřeva, hnědého uhlí a PET brikety. V dávce paliva bylo 5 ks PET briket. Vrstvení paliva do násypky kotle je vidět na obr. č. 32.



obr. č. 32 Kotel Dakon DOR32 s, palivo MIX v násypce

Prívody sekundárního spalovacího vzduchu byly otevřeny na 40 %.

Během spalovací zkoušky nebylo pozorováno žádné klenbování paliva - lze tedy konstatovat, že olej „zabraňoval“ klenbování dřeva v násypce (jev pozorovaný při zkoušce s mokrým smrkovým dřevem).

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 25 a graf č. 26).

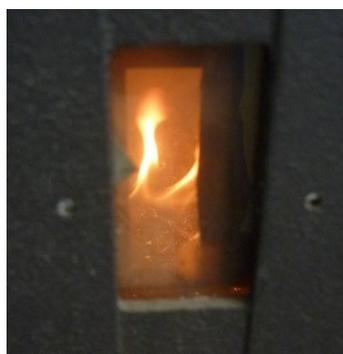
Snížený výkon - spalovací zkouška č. 14

Při zkoušce bylo dosaženo cca 42 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu. Ani při zkoušce sníženého výkonu nebylo pozorováno klenbování paliva. Při spalovací zkoušce byla do kotle přiložena směs paliv v poměru uvedeném v tab. č. 14. V téže tabulce je také uvedeno výsledné přepočítané složení paliva. Nejprve bylo přiloženo trochu hnědého uhlí a pak byla přiložena směs mokrého dřeva, hnědého uhlí a PET brikety. V dávce paliva byly 4 ks PET briket.

tab. č. 14 Složení paliva MIX, Dakon DOR32 s, snížený výkon

			palivo MIX
PET briketa	HU O1	[%hm]	48
	fritovací olej	[%hm]	14
	štěpka	[%hm]	8
	mokrý dřev	[%hm]	30
	uhlík	[%hm]	46,58
	vodík	[%hm]	4,85
	dusík	[%hm]	0,43
	kyslík	[%hm]	26,20
	síra	[%hm]	0,39
	voda veškerá	[%hm]	19,03
	popel	[%hm]	2,52
	výhřevnost	[MJ/kg]	20,75

Po přiložení dávky paliva bylo zjištěno, že olej z PET briket protekl žhavou vrstvou paliva do popelníku, kde hořel - obr. č. 33.



obr. č. 33 Kotel Dakon DOR32 s, hořící olej v popelníku, palivo MIX, snížený výkon

V čase 12:00 došlo k výpadku měření analyzátoru spalin v odběrovém místě za kotlem. Měření TOC se již nepodařilo obnovit. Měření koncentrace O₂ pokračovalo v čase 12:45. Data mezi 12:00 a 12:45 byla aproximována.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 27 a graf č. 28).

6.4.3 Mokrý smrkové dřev - snížený výkon

Složení mokrého smrkového dřeva při spalovací zkoušce č. 15 uvádí tab. č. 15.

tab. č. 15 Složení mokrého smrkového dřeva, Dakon DOR32 s

		Mokrý smrkové dřev zkouška č. 15
uhlík	[%hm]	34,15
vodík	[%hm]	4,35
dusík	[%hm]	0,06
kyslík	[%hm]	29,85
síra	[%hm]	0,02
voda veškerá	[%hm]	31,20
popel	[%hm]	0,37
výhřevnost	[MJ/kg]	11,89

Spalovací zkouška č. 15

Kotel byl nastaven jako pro zkoušku jmenovitého výkonu. V kotli byla vytvořena žhavá základní vrstva paliva, na tu byly přiloženy 3 menší polínka „suchého“ smrkového dřeva (vlhkost 20 %) a dále byla naložena vrstva mokrého smrkového dřeva.

Během spalovací zkoušky bylo zjištěno, že palivo v násypce klenbuje a muselo být shazováno ručně (v časech 10:38 a 11:00). Je možno konstatovat, že násypka paliva není vhodně řešena pro spalování dřeva.

Během celé spalovací zkoušky byla měřena vysoká koncentrace O₂ ve spalínách (cca 15 %). Výkon dosáhl jen 11,4 kW. Palivo nebylo schopno uspokojivě hořet. Tato zkouška byla brána jako zkouška sníženého výkonu. Na toto palivo není možno dosáhnout výkonu blízkého jmenovitému výkonu kotle. V případě, že by byl kotel nastaven pro zkoušku sníženého výkonu, došlo by k uhasnutí paliva a zkoušku by nebylo možno relevantně vyhodnotit.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 29 a graf č. 30).

6.4.4 Suché smrkové dřevo - jmenovitý a snížený výkon

Složení suchého smrkového dřeva při spalovací zkoušce č. 16 a 17 uvádí tab. č. 16.

tab. č. 16 Složení suchého smrkového dřeva, Dakon DOR32 s

		Suché smrkové dřevo
uhlík	[% _{hm}]	45,19
vodík	[% _{hm}]	5,75
dusík	[% _{hm}]	0,08
kyslík	[% _{hm}]	39,50
síra	[% _{hm}]	0,03
voda veškerá	[% _{hm}]	8,98
popel	[% _{hm}]	0,49
výhřevnost	[MJ/kg]	16,52

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 16

Kotel byl nastaven pro zkoušku jmenovitého výkonu. Přívod sekundárního vzduchu byl uzavřen. V kotli byla vytvořena žhavá základní vrstva paliva, na tu bylo naloženo cca 10 kg suchého smrkového dřeva.

Během spalovací zkoušky bylo zjištěno, že palivo v násypce klenbuje a muselo být shazováno ručně (v časech 9:39, 10:07, 10:56 a 12:21). Je možno konstatovat (tak jako u spalovací zkoušky č. 15), že násypka paliva není vhodně řešena pro spalování dřeva.

Bylo dosaženo výkonu 15,2 kW.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 31 a graf č. 32).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 17

Prívod primárního vzduchu byl otevřen cca 3-5 mm, prívod sekundárního vzduchu byl uzavřen. V kotli byla vytvořena žhavá základní vrstva paliva, na tu bylo naloženo cca 12 kg suchého smrkového dřeva.

Během spalovací zkoušky bylo zjištěno (tak jako u spal. zkoušek č. 15 a 16), že palivo v násypce klenbuje a muselo být shazováno ručně (v časech 11:47 a 12:24). Násypka paliva není vhodně řešena pro spalování dřeva.

Při zkoušce bylo dosaženo výkonu 7,5 kW, což odpovídá cca 49 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu. Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 33 a graf č. 34).

6.5 Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26

Kotel byl při zkoušce jmenovitého výkonu provozován s funkční regulací přívodu primárního spalovacího vzduchu (vzduch pod rošt, klapa umístěna v popelníkových dvířkách) - klapa přívodu ovládána pomocí termostatického řetízkového regulačního ventilu. Regulátor přívodu sekundárního spalovacího vzduchu byl otevřen dle použitého paliva a doporučení výrobce (růžice v příkládacích dvířkách). Komínová klapa byla otevřena.

Při zkoušce při sníženém výkonu byl termostatický regulační ventil vyřazen z činnosti (odpojen řetízek) a klapa přívodu primárního spalovacího vzduchu byla uzavřena na minimum doporučené výrobcem. Prívod sekundárního spalovacího vzduchu byl uzavřen. Komínová klapa byla uzavřena. Toto nastavení popisuje výrobce jako stáložárny provoz pro udržení ohně v kotli přes noc.

Po přiložení dávky paliva byla vždy ponechána po určitou dobu otevřená popelníková dvířka kvůli lepšímu rozhoření paliva.

Při všech spalovacích zkouškách došlo ihned po přiložení dávky paliva k velkému vývinu kouře ve spalovací komoře, což je typický stav u kotlů s prohořivacím způsobem spalování paliva - obr. č. 34.



obr. č. 34 Kotel Viadrus Hercules U26, kouř ve spalovací komoře po přiložení paliva

Kotel při zkouškách na zkušebně je vidět na obr. č. 35.



obr. č. 35 Kotel Viadrus Hercules U26 při zkouškách na zkušebně VEC

Výsledné naměřené výkonové a emisní parametry kotle jsou uvedeny v tab. č. 17.

tab. č. 17 Naměřené a vypočtené hodnoty, Viadrus Hercules U26

Datum měření		18	19	20	21	22	23	24	25	
Čas počátku měření	h:min	9:39	9:14	9:12	9:24	9:55	9:58	9:28	9:07	
Čas konce měření	h:min	13:53	14:17	14:27	13:24	14:25	16:01	14:22	12:46	
Délka zkoušky	h	4,23	5,05	4,07	4,00	3,60	5,18	4,83	3,65	
Poznámka		Pjm	Psn	Pjm	Psn	Pjm	Psn	Pjm	Psn	
Atmosférický tlak	mbar	983	990	987	989	986	988	996	989	
Teplota vzduchu	°C	25,0	23,3	23,8	22,4	26,5	23,6	24,0	24,3	
Relativní vlhkost vzduchu	%	36,7	39,0	48,4	48,0	39,9	53,5	29,7	32,9	
Palivo		HU O1	HU O1	MIX	MIX	dřevo-smrk- mokrý	dřevo-smrk- mokrý	dřevo-smrk- suchý	dřevo-smrk- suchý	
Měřený výkon kotle	kW	18,8	9,0	23,8	10,7	14,1	9,0	19,0	8,8	
Spotřeba paliva	kg/h	4,28	1,88	6,17	2,67	6,69	3,52	5,98	2,49	
Teplota výstupní otopné vody	°C	64,1	52,9	67,9	58,4	61,1	60,6	66,8	55,5	
Teplota vstupní otopné vody	°C	51,4	46,3	54,2	50,8	53,2	53,7	53,9	47,6	
Účinnost zařízení (nepřímá metoda)	%	70,0	76,1	69,9	76,7	61,4	74,7	69,2	77,1	
Ztráta citelným teplem spalin	%	18,2	7,3	20,3	9,2	29,1	9,5	23,9	7,4	
Ztráta plynným nedopalem	%	6,3	7,6	5,8	6,6	6,6	9,4	3,9	9,0	
Ztráta sdílením tepla do okolí	%	2,5	6,0	2,5	6,0	2,5	6,0	2,5	6,0	
Ztráta mechanickým nedopalem	%	3,0	3,0	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Teplota spalin	°C	293	130	336	149	231	127	294	133	
Tah komína	Pa	19,9	19,7	19,8	20,1	19,9	20,2	20,1	20,1	
Koncentrace O ₂ v suchých spalinách	% _{obj.}	11,7	11,7	10,0	12,6	15,6	12,7	12,5	10,3	
Přebytek vzduchu	-	2,25	2,25	1,94	2,50	3,91	2,55	2,48	1,96	
Koncentrace plynných emisí v suchých spalinách při referenčním kyslíku 10 %	CO	mg/m ³ _N	10 450	17 972	11 437	17 849	13 164	21 288	8 600	19 504
	NO _x	mg/m ³ _N	150	116	117	112	122	79	104	40
	TOC	mg/m ³ _N	2 467	5 677	4 564	> 10 833	2 190	8 476	> 1 495	> 6 878
	CO ₂	g/m ³ _N	203	185	177	202	195	202	203	193

Pozn.:

výsledná koncentrace emisí NO_x je přepočtena na NO₂

6.5.1 Hnědé uhlí - jmenovitý a snížený výkon

Při těchto spalovacích zkouškách č. 18 a 19 bylo spalováno hnědé uhlí ořech 1 viz tab. č. 6.

tab. č. 18 Složení hnědé uhlí, Viadrus Hercules U26

		HU O1
uhlík	[% _{hm}]	54,62
vodík	[% _{hm}]	4,46
dusík	[% _{hm}]	0,76
kyslík	[% _{hm}]	19,05
síra	[% _{hm}]	0,72
voda veškerá	[% _{hm}]	15,51
popel	[% _{hm}]	4,87
výhřevnost	[MJ/kg]	22,61

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 18

Při zkoušce byla otevřena růžice přívodu sekundárního spalovacího vzduchu na 8 mm. Po přiložení dávky paliva byla ponechána popelníková dvířka otevřená 5 min.

Dávka paliva byla přiložena tak, že na žhavou vrstvu paliva byla přiložena jedna vrstva dřeva (vlhkost 20 %), do předních rohů spalovací komory bylo umístěno vždy 1 poleno dřeva a spalovací komora byla pak naplněna hnědým uhlím.

V první třetině zkoušky byly koncentrace CO a TOC vysoké (CO až 40 000 mg/m³_N a TOC až 11 000 mg/m³_N), po zbývajícím čase zkoušky byly koncentrace CO a TOC „relativně“ nízké (CO < 4 000 mg/m³_N a TOC < 1 000 mg/m³_N).

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 35 a graf č. 36).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 19

Po přiložení dávky paliva byla ponechána popelníková dvířka otevřená 9 min. Způsob přiložení paliva byl shodný jako při zkoušce jmenovitého výkonu. Při zkoušce bylo dosaženo cca 47 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

Po přiložení paliva byla koncentrace TOC až 16 000 mg/m³_N a klesala jen velice pozvolně.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 37 a graf č. 38).

6.5.2 Palivo MIX - jmenovitý a snížený výkon

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 20

Při spalovacích zkouškách byla do kotle přiložena směs paliv v poměrech uvedených v tab. č. 19. V téže tabulce je také uvedeno výsledné přepočítané složení paliva. Nejprve byla přiložena 1 vrstva „suchého“ smrkového dřeva (vlhkost 20 %) a pak byla přiložena směs mokrého dřeva, hnědého uhlí a PET brikety.

tab. č. 19 Složení paliva MIX, Viadrus Hercules U26, jmenovitý výkon

		1.perioda	2.perioda
PET briketa	HU O1 [%hm]	33	31
	fritovací olej [%hm]	15	17
	štěpka [%hm]	7	8
	suché dřevo [%hm]	12	11
	mokrý dřevo [%hm]	32	33

		palivo MIX 1.perioda	palivo MIX 2.perioda
uhlík [%hm]		44,43	44,20
vodík [%hm]		4,95	4,99
dusík [%hm]		0,33	0,31
kyslík [%hm]		28,48	28,87
síra [%hm]		0,28	0,27
voda veškerá [%hm]		19,67	19,61
popel [%hm]		1,86	1,75
výhřevnost [MJ/kg]		19,77	19,91

Opět se zkouška skládala ze 2 spalovacích period. V první dávce paliva (1. spalovací perioda) bylo 5 ks PET briket. Ve druhé dávce paliva (2. spalovací perioda) bylo také 5 ks PET briket.

Při zkoušce byla otevřena ružice přívodu sekundárního spalovacího vzduchu na 8 mm. Po přiložení dávky paliva byla ponechána popelníková dvířka otevřená 5 min. Po přiložení paliva bylo pozorováno, že olej protékal do popelníku a tam hořel - obr. č. 36. Teplota spalin byla během spalovacích zkoušek vysoká: 370 - 400 °C.



obr. č. 36 Kotel Viadrus Hercules U26, hořící olej v popelníku, palivo MIX

První spalovací perioda proběhla v čase 9:12 - 11:20 hod a druhá spalovací perioda proběhla v čase 12:31 - 14:27 hod. Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 39 a graf č. 40).

Snižovaný výkon - spalovací zkouška č. 21

Při spalovací zkoušce byla do kotle přiložena směs paliv v poměru uvedeném v tab. č. 20.

tab. č. 20 Složení paliva MIX, Viadrus Hercules U26, snížený výkon

			palivo MIX			
PET briketa	HU O1	[% _{hm}]	32	uhlík	[% _{hm}]	43,84
	fritovací olej	[% _{hm}]	11	vodík	[% _{hm}]	4,87
	štěpka	[% _{hm}]	11	dusík	[% _{hm}]	0,31
	suché dřevo	[% _{hm}]	17	kyslík	[% _{hm}]	28,46
	mokrý dřevo	[% _{hm}]	28	síra	[% _{hm}]	0,29
				voda veškerá	[% _{hm}]	20,39
			popel	[% _{hm}]	1,85	
			výhřevnost	[MJ/kg]	18,78	

V této tabulce je také uvedeno výsledné přepočítané složení paliva. Nejprve byla přiložena jedna vrstva „suchého“ smrkového dřeva (vlhkost 20 %) a pak byla přiložena směs mokrého dřeva, hnědého uhlí a PET brikety.

Při zkoušce byla klapa přívodu primárního spalovacího vzduchu otevřena na 5 mm. Stejně jako při zkoušce jmenovitého výkonu bylo pozorováno hoření oleje v popelníku.

V čase 11:52 - 12:25 hod došlo k výpadku měření koncentrace TOC. V čase 12:40 hod bylo měření koncentrace TOC odpojeno úplně.

Výpadky v měření analyzátoru byly způsobeny ucpáváním prachového filtru analyzátoru, což způsobilo chybu nedostatečného průtoku vzorku spalin analyzátořem. Filtr bylo nutno vyčistit a vyměnit, což zabere poměrně dost času. Při zkoušce bylo dosaženo cca 45 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 41 a graf č. 42).

Při zkoušce bylo dosaženo cca 45 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

6.5.3 Mokrý smrkový dřevo - jmenovitý a snížený výkon

Složení mokrého smrkového dřeva při spalovací zkoušce č. 22 a 23 uvádí tab. č. 21.

tab. č. 21 Složení mokrého smrkového dřeva, Viadrus Hercules U26

		Mokrý smrkový dřevo zkouška č. 15
uhlík	[% _{hm}]	34,15
vodík	[% _{hm}]	4,35
dusík	[% _{hm}]	0,06
kyslík	[% _{hm}]	29,85
síra	[% _{hm}]	0,02
voda veškerá	[% _{hm}]	31,20
popel	[% _{hm}]	0,37
výhřevnost	[MJ/kg]	11,89

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 22

Při zkoušce byla otevřena rúžice přívodu sekundárního spalovacího vzduchu na 8 mm. Po přiložení dávky paliva byla ponechána popelníková dvířka otevřená 5 min.

Vzhledem k tomu, že doba hoření na jednu dávku paliva byla krátká, byly provedeny 2 zkoušky a výsledky byly zprůměrovány. První spalovací perioda proběhla v čase 9:55 až 11:36 hod a druhá spalovací perioda proběhla v čase 12:30 až 14:25 hod.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 43 a graf č. 44).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 23

Po přiložení dávky paliva byla ponechána popelníková dvířka otevřená 5 min. Klapa přívodu primárního spalovacího vzduchu byla otevřena na 12 mm. Zkouška sníženého výkonu se stejně jako zkouška jmenovitého výkonu skládala z 2 spalovacích period (9:58-13:16 hod a 12:24-16:01 hod). V čase 15:18 hod došlo k výpadku měření analyzátoru v odběrovém místě za kotlem, analyzátor se nepodařilo do konce zkoušky zprovoznit.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 45 a graf č. 46).

Při zkoušce bylo dosaženo cca 63 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

6.5.4 Suché smrkové dřevo - jmenovitý a snížený výkon

Složení suchého smrkového dřeva při spalovací zkoušce č. 24 a 25 uvádí tab. č. 22.

tab. č. 22 Složení suchého smrkového dřeva, Viadrus Hercules U26

		Suché smrkové dřevo
uhlík	[% _{hm}]	45,19
vodík	[% _{hm}]	5,75
dušík	[% _{hm}]	0,08
kyslík	[% _{hm}]	39,50
síra	[% _{hm}]	0,03
voda veškerá	[% _{hm}]	8,98
popel	[% _{hm}]	0,49
výhřevnost	[MJ/kg]	16,52

Jmenovitý výkon - spalovací zkouška č. 24

Při zkoušce byla otevřena rúžice přívodu sekundárního spalovacího vzduchu na 8 mm. Po přiložení dávky paliva byla ponechána popelníková dvířka otevřená 5 min.

Vzhledem k tomu, že doba hoření na jednu dávku paliva byla krátká, byly provedeny 3 zkoušky a výsledky byly zprůměrovány. První spalovací perioda proběhla v čase 9:28 až 10:52 hod s palivem o hmotnosti 9,85 kg, druhá spalovací perioda proběhla v čase 10:54 až 12:30 hod s palivem o hmotnosti 12,25 kg a třetí spalovací perioda proběhla v čase 12:32 až 14:22 s palivem o hmotnosti 9,64 kg. Kotel dosáhl výkonu 19 kW.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 47 a graf č. 48).

Snížený výkon - spalovací zkouška č. 25

Klapa přívodu primárního spalovacího vzduchu byla otevřena na 5 mm. Klapa sekundárního vzduchu a komínová klapa byla uzavřena. Zkouška sníženého výkonu se skládala z jedné spalovací periody. Bylo přiloženo 11,68 kg paliva. Kotel dosáhl výkonu 8,8 kW, což odpovídá cca 46 % výkonu měřeného při zkoušce jmenovitého výkonu.

Průběhy hlavních sledovaných parametrů kotle během spalovací zkoušky jsou uvedeny v příloze A (viz graf č. 49 a graf č. 50).

7 VÝSLEDKY SPALOVACÍCH ZKOUŠEK

V této části disertační práce jsou prezentovány naměřené výsledné měrné emise (ME) a emisní faktory (EF) TZL a jednotlivých velikostních frakcí částic vztažené na energii v palivu a spotřebu paliva. Dále jsou uvedeny početní koncentrace částic $PM_{0,1}$ a PM_1 a detekce PAHs na částicích (hmotnostní koncentrace PAHs na částicích). EF TZL naměřené cyklonem a impaktorem jsou porovnávány s EF navrženými Výzkumným energetickým centrem, které jsou uvedeny v metodice ČHMÚ [92].

Veškeré, v textu nebo v tabulkách, uváděné koncentrace v mg/m^3_N , $\#/cm^3$ jsou uvedeny při $O_{2,ref} = 10\%$, aby bylo možné naměřené parametry kotlů porovnávat mezi sebou.

Mezní průměry částic impaktoru DLPI (*Cut-off particle diameter*, D_{50} - velikost částice, která má stejnou 50 % pravděpodobnost, že separačním stupněm projde, jako že se na něm zachytí) pater 1-13 byly 0.03, 0.06, 0.09, 0.16, 0.26, 0.38, 0.61, 0.95, 1.6, 2.39, 4, 6.6 a $9.96\ \mu m$.

Problém zahlcení impaktoru, který nastal při odběrech u všech zkoušek, byl řešen výměnou impaktoru. Na pracovišti Výzkumného energetického centra jsou k dispozici dva impaktory DLPI. Při zkouškách, u kterých nedošlo alespoň k 50 % pokrytí odběru impaktorem DLPI, jsou výsledky v tabulkách označeny oranžovou barvou a při komentářích a srovnávání byl na tuto skutečnost brán zřetel. Výsledná hmotnostní koncentrace částic odebrána pomocí impaktoru byla vypočtena jako vážený průměr.

Měrné emise (ME) TZL jsou prezentovány ve tab. č. 23. Z tabulky lze vyčíst příslušné ME různých velikostních frakcí částic, ME CO, měřenou teplotu za kotlem a v ředícím tunelu, kyslík za kotlem, ředící poměr, délku spalovací zkoušky a pokrytí spalovací zkoušky odběrem pomocí impaktoru DLPI v závislosti na palivu, typu spalovacího zařízení a režimu spalování.

Nejvyšších hodnot ME TZL dosáhl kotel prohořivací, jak při jmenovitém, tak při snížené výkonu.

tab. č. 23 Měrné emise TZL, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ a PM_{0,1}

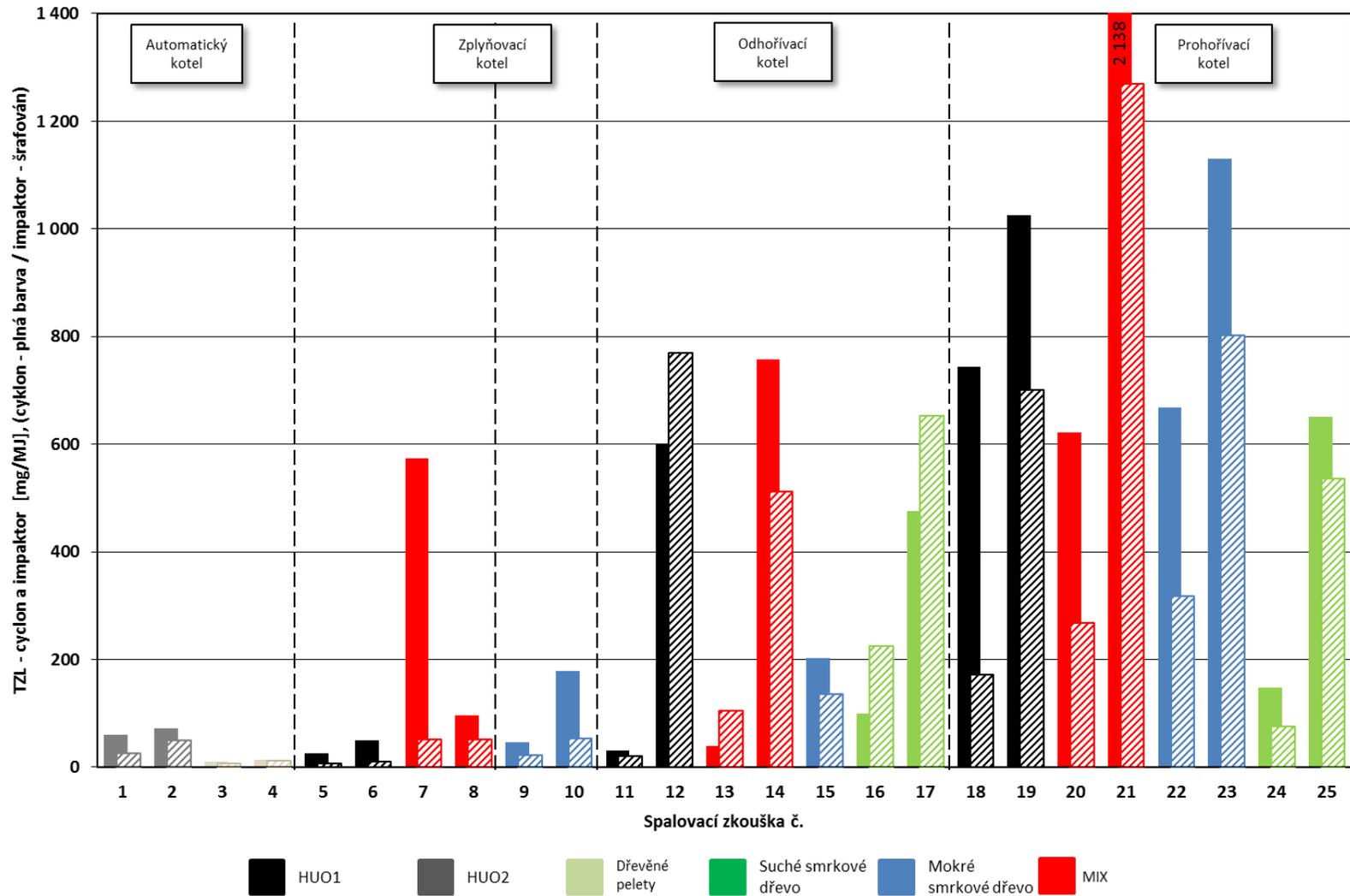
Palivo	Spalovací zkouška č.	Výkon	Pjm / Psn	Teplota spalín za kotlem	Teplota spalín v ŘT	O ₂ za kotlem	Ředící poměr	Počet spalovacích period	Délka spalovací zkoušky	Pokrytí spalovací zkoušky odběrem pomoci impaktoru DLPI	ME TZL cyklon	ME TZL impaktor DLPI	ME TZL cyklon	ME TZL impaktor DLPI	ME PM10 cyklon	ME PM10 impaktor DLPI	ME PM2,5 cyklon	ME PM2,5 impaktor DLPI	ME PM1 impaktor DLPI	ME PM0,1 impaktor DLPI	ME CO
[-]	[-]	[kW]	[-]	[°C]	[°C]	[vol. %]	[-]	[-]	[h]	[%]	[kg/t]	[kg/t]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
Automatický kotel Benekov V-Ling 25																					
HU O2	1	23,9	Pjm	238	64	11,2	4,5	1	4,25	56,9	1,5	0,7	59	25	50	25	40	23	22	3	492
HU O2	2	7,6	Psn	133	40	15,8	5,7	1	4,38	72,6	1,9	1,3	72	49	61	46	54	44	42	7	968
pelety	3	24,8	Pjm	219	73	8,0	4,4	1	4,48	65,8	0,2	0,1	10	6	10	6	8	6	6	2	158
pelety	4	7,7	Psn	128	68	14,6	7,4	1	4,52	78,6	0,2	0,2	13	12	12	12	10	11	10	4	1468
Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S																					
HU O1	5	25,8	Pjm	264	74	9,2	4,0	1	3,92	81,7	0,6	0,1	26	6	21	6	10	6	5	1	575
HU O1	6	12,8	Psn	139	34	9,8	8,1	1	6,83	74,9	1,1	0,2	50	10	46	10	23	10	9	2	2 875
MIX	7	27,3	Pjm	308	102	8,1	3,6	1	3,72	73,2	11,7	1,0	573	51	562	50	164	47	39	3	2 751
MIX	8	11,2	Psn	143	37	11,4	8,9	1	4,45	60,9	1,8	1,0	96	52	88	52	80	51	48	1	4 285
Zplyňovací kotel Atmos DC25GS																					
Mokrě smrkové dřevo	9	19,2	Pjm	189	59	13,1	4,3	1	3,73	92,9	0,6	0,3	47	22	43	21	38	17	16	4	2 900
Mokrě smrkové dřevo	10	9,5	Psn	114	38	14,8	6,3	1	4,00	79,1	2,2	0,7	178	53	175	53	123	52	51	3	7 802
Odhoňvací kotel Dakon DOR32 s																					
HU O1	11	22,8	Pjm	248	82	11,0	3,2	1	5,73	75,6	0,7	0,4	31	20	31	20	30	19	18	1	2 902
HU O1	12	7,3	Psn	176	34	10,3	12,9	1	4,40	25,2	13,6	17,4	601	770	593	769	583	766	681	1	13 573
MIX	13	19,8	Pjm	238	56	10,4	6,3	1	2,85	34,4	0,8	2,1	39	104	33	103	27	102	94	7	3 892
MIX	14	8,4	Psn	205	36	9,6	15,6	1	3,93	20,5	15,7	10,6	757	512	752	511	710	509	477	6	6 198
Mokrě smrkové dřevo	15	11,4	Psn	180	63	15,6	3,5	1	2,53	55,9	2,5	1,7	202	136	191	135	140	134	131	5	4 814
Suché smrkové dřevo	16	15,2	Pjm	208	75	14,6	3,5	1	4,38	31,1	1,6	3,7	99	224	89	224	85	221	210	6	4 561
Suché smrkové dřevo	17	7,5	Psn	161	69	11,7	14,4	1	4,63	35,3	7,9	10,8	476	653	469	652	456	645	569	4	7 700
Prohoňvací kotel Viadrus Hercules U26																					
HU O1	18	18,8	Pjm	293	94	11,7	4,0	1	4,23	19,3	16,8	3,9	743	172	720	171	692	169	168	5	4 697
HU O1	19	9,0	Psn	130	35	11,7	10,7	1	5,05	8,9	23,2	15,8	1 025	701	1 014	698	987	689	614	2	8 078
MIX	20	23,8	Pjm	336	103	10,0	3,5	2	4,07	14,2	12,4	5,3	622	268	603	267	585	264	257	10	4 669
MIX	21	10,7	Psn	149	38	12,6	7,9	1	4,00	4,4	40,2	23,9	2 138	1 270	1 541	1 269	1 483	1 259	1 096	1	7 592
Mokrě smrkové dřevo	22	14,1	Pjm	231	95	15,6	2,7	2	3,60	17,4	8,2	3,9	667	318	638	316	553	314	309	15	6 652
Mokrě smrkové dřevo	23	9,0	Psn	127	38	12,7	7,7	2	5,18	6,7	13,9	9,9	1 129	802	1 114	801	1 047	799	775	4	10 767
Suché smrkové dřevo	24	19,0	Pjm	294	101	12,5	3,4	3	4,83	10,4	2,4	1,3	148	76	121	75	112	74	72	10	4 164
Suché smrkové dřevo	25	8,8	Psn	133	36	10,3	12,0	1	3,65	5,7	10,8	8,9	652	536	641	535	630	532	520	5	9 445

7.1 Porovnání hmotnostních koncentrací a měrných emisí jednotlivých velikostních frakcí částic naměřených impaktorem a cyklonem

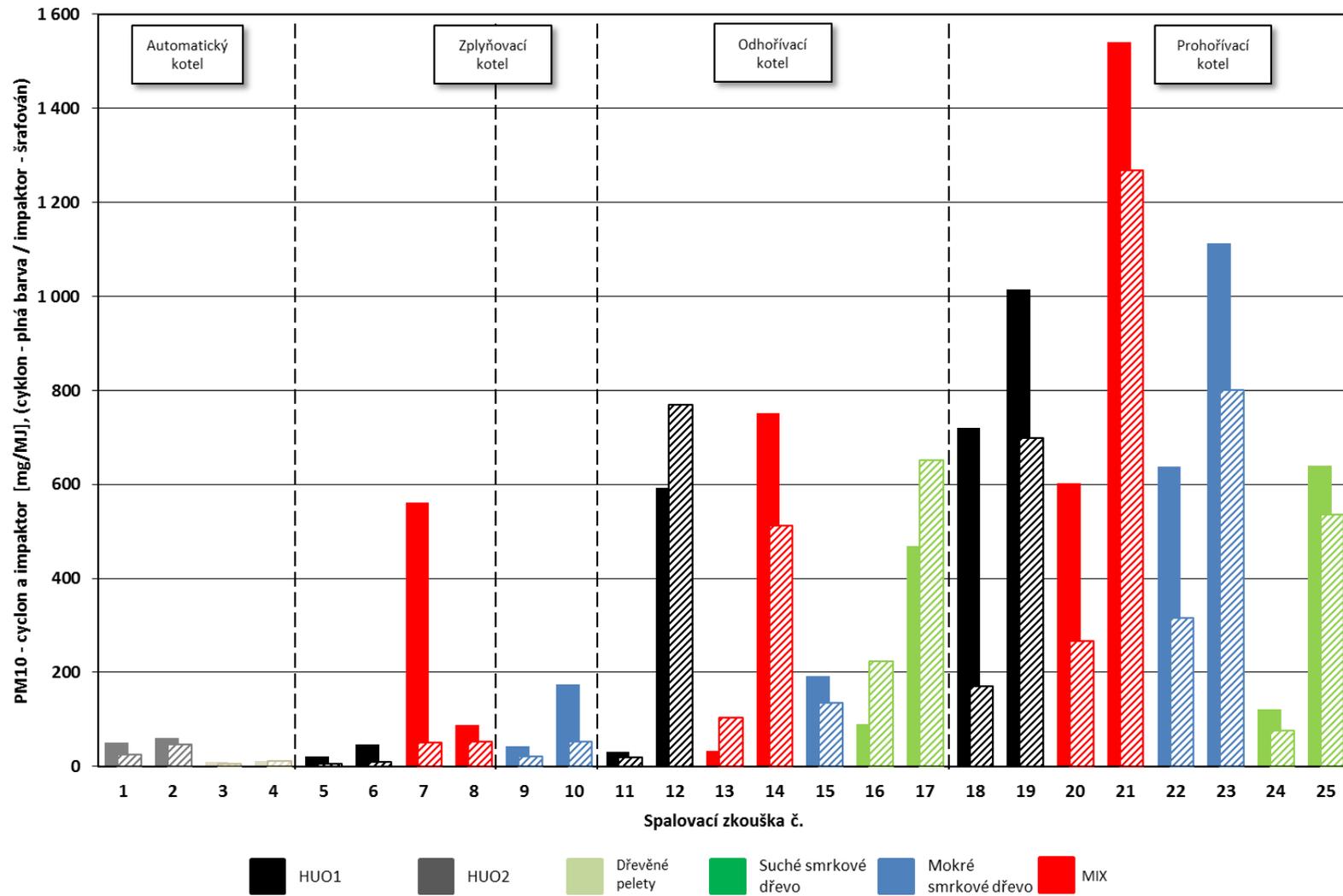
Z dvaceti pěti provedených spalovacích zkoušek vyšly ME TZL v jednadvaceti případech větší při odběrech s cyklonem. V průměru byly hodnoty ME o 50 % větší u cyklonu než u impaktoru (viz tab. č. 23). U čtyř spalovacích zkoušek č. 12, 13, 16 a 17 na odhořivacím kotli, kde bylo pokrytí impaktorem do 30 %, vyšly ME TZL větší u impaktoru než u cyklonu (viz graf č. 2 až graf č. 4). U zkoušky č. 13 nebyl těsný držák polyuretanové pěny za filtrem a byl netěsnostmi přísáván okolní vzduch, tudíž průtok cyklonem nebyl dodržen a průtok byl nižší.

Hodnoty ME TZL cyklonu a impaktoru jsou však ve většině případů ve stejných řádech. Dobré shody při měření bylo dosaženo na kotli automatickém, kde jsou sledované parametry téměř konstantní (tepelný výkon, teplota spalin, teplota vstupní a výstupní otopné vody). Hodnoty procentuálního rozdělení frakce $PM_{2,5}$ k PM_{10} vychází u cyklonu menší než u impaktoru (viz graf č. 5). U impaktoru je frakce $PM_{2,5}$ v PM_{10} zastoupena cca 97 %_{hm}. U cyklonu je tato frakce zastoupena pouze cca 84 %_{hm}.

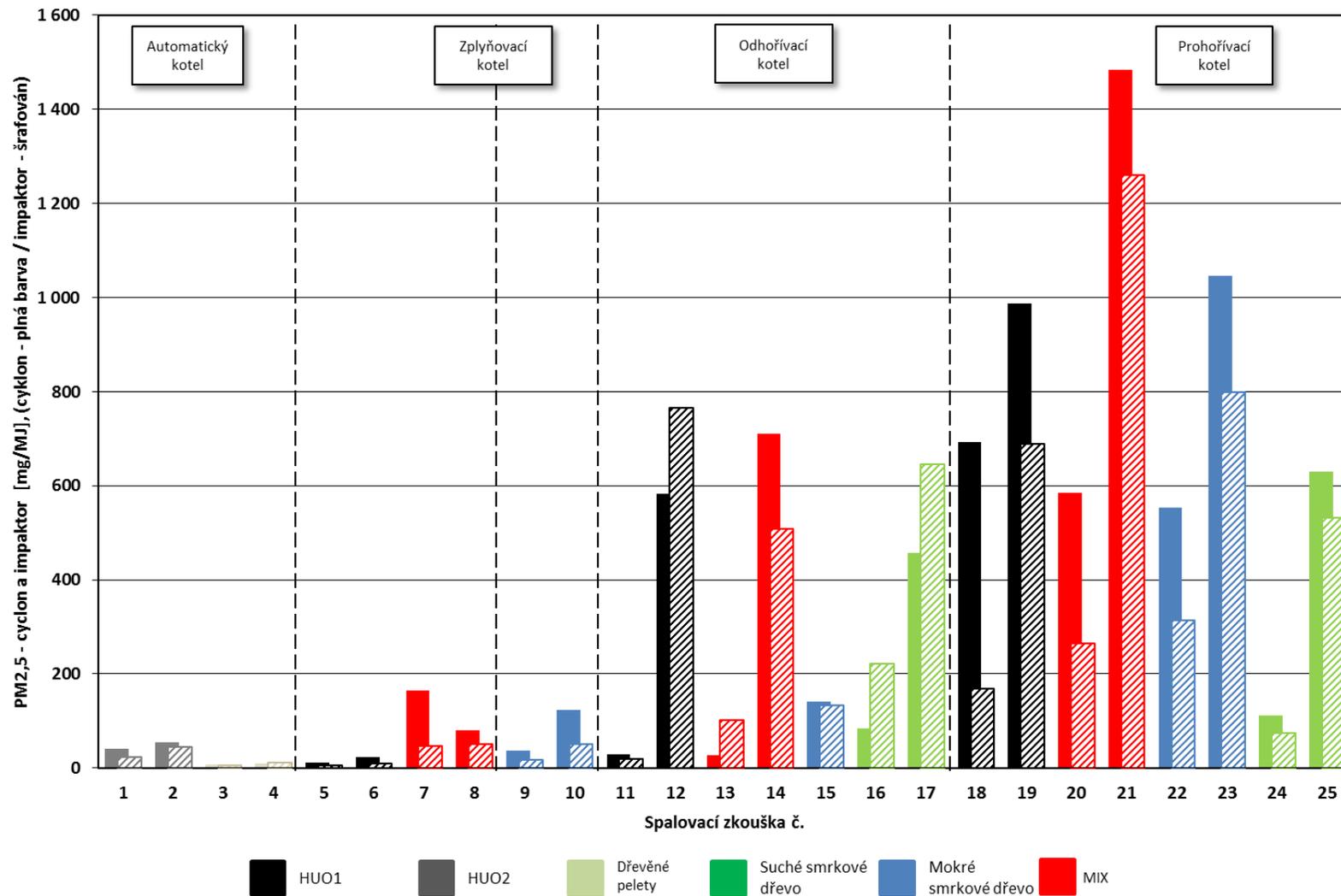
Graf č. 6 ukazuje, že ve frakcích PM_{10} odebraných impaktorem DLPI jsou ultrajemné částice (UFP) zastoupeny v průměru 8 %_{hm}, frakce PM_1 v průměru 90 %_{hm}.



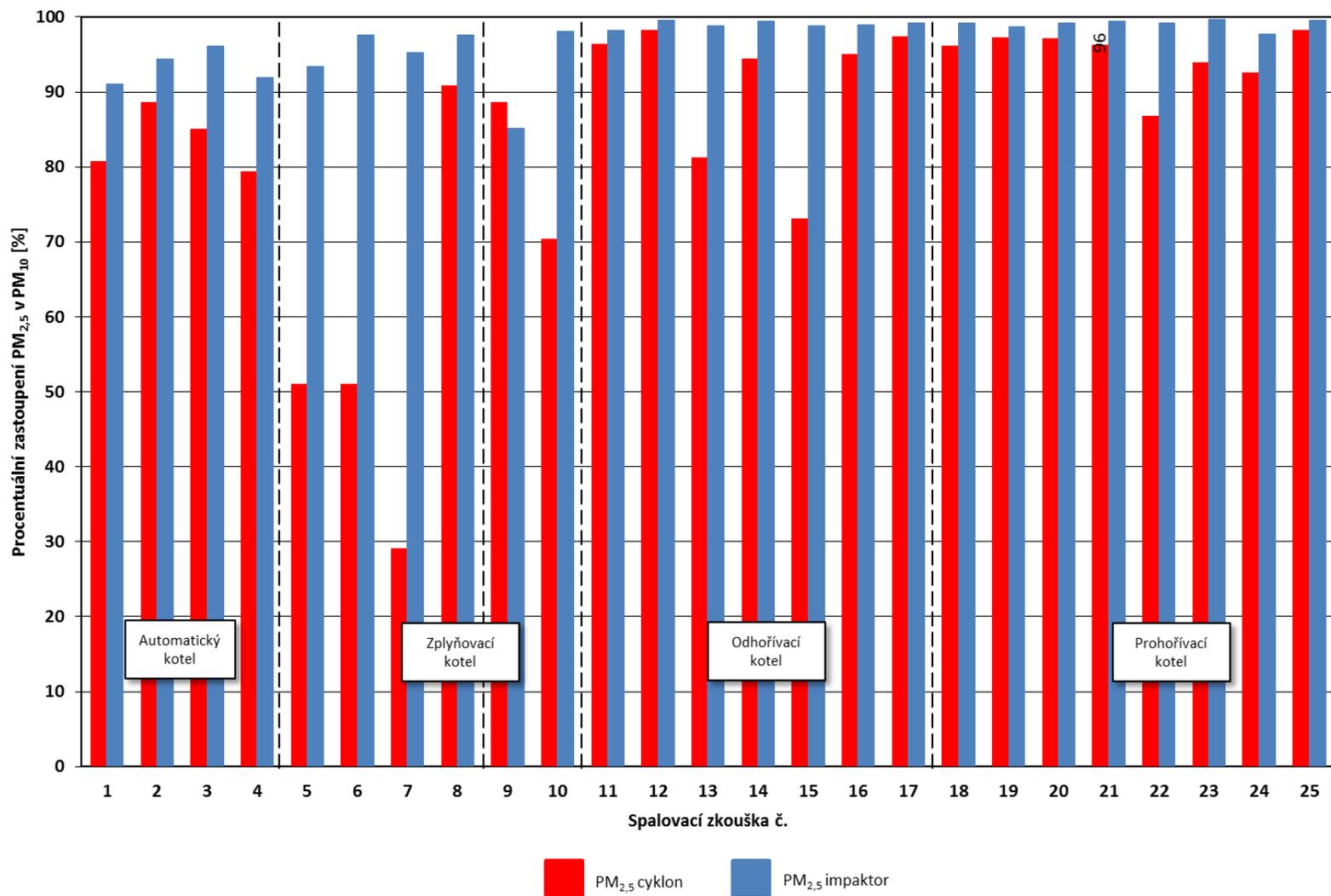
graf č. 2 Porovnání měřných emisí TZL stanovených pomocí odběru cyclonem a impaktorem



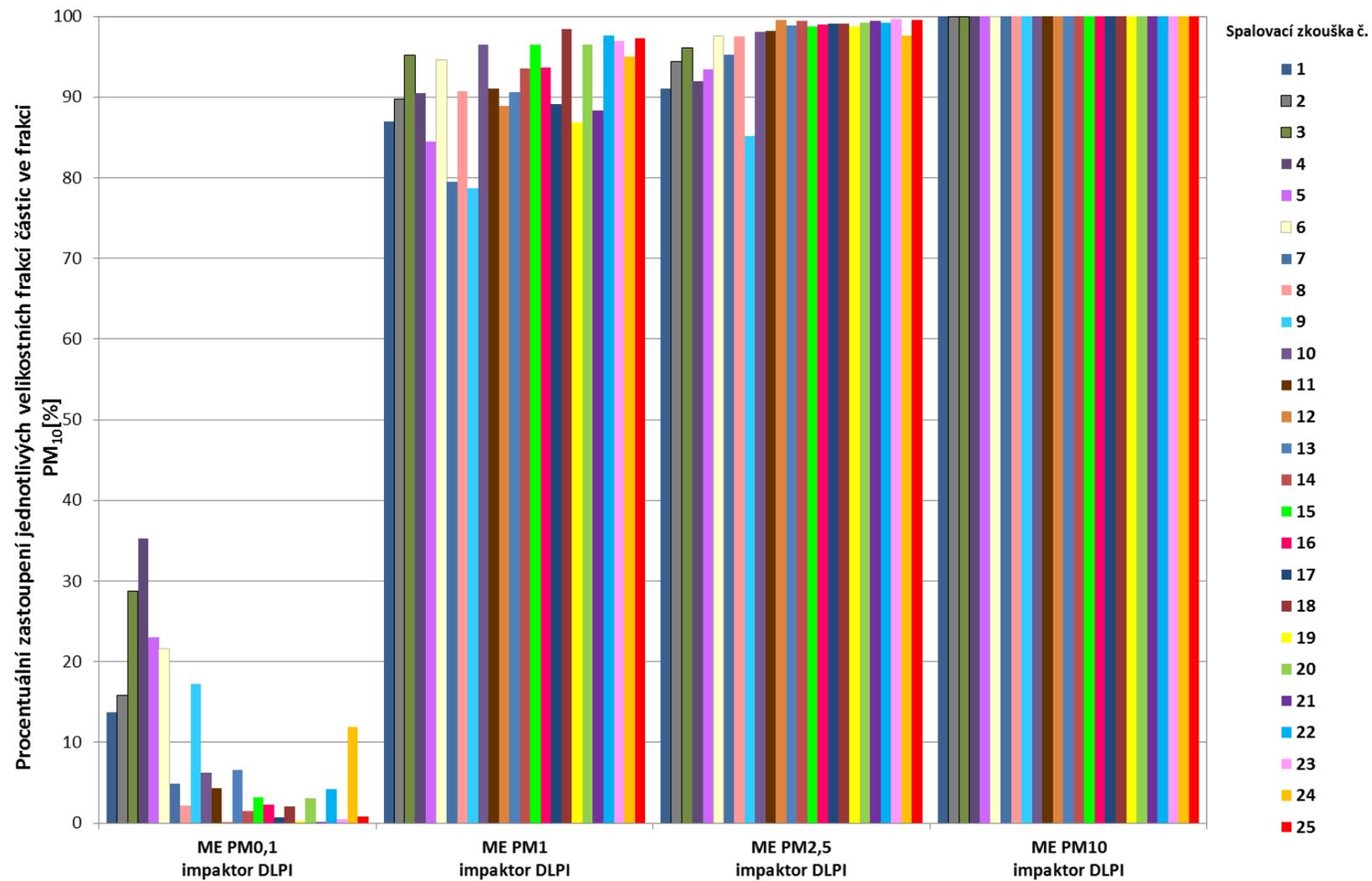
graf č. 3 Porovnání měrných emisí PM₁₀ stanovených pomocí odběru cyclonem a impaktorem



graf č. 4 Porovnání měrných emisí PM_{2.5} stanovených pomocí odběru cyclonem a impaktorem



graf č. 5 Procentuální zastoupení $PM_{2,5}$ v PM_{10} při odběru cyklonem a impaktorem



graf č. 6 Procentuální zastoupení jednotlivých velikostních frakcí částic ve frakci PM_{10}

Pro porovnání, zda cyklon a impaktor dosahuje podobných hodnot hmotnostních koncentrací TZL jako metoda odběru používaná při akreditovaných spalovacích zkouškách (izokinetický odběr se záchytem TZL na filtru), byly vypočítány emisní faktory (EF, viz tab. č. 24) dle metodiky [92], která využívá metody váženého průměrování zastoupení využití různých konstrukcí kotlů pro uhlí a dřevo. Vypočtené hodnoty EF TZL byly porovnány s hodnotami EF TZL udávanými v metodice. Metodika udává více hodnot EF pro TZL dle scénářů a pro jednotlivá léta (od roku 2001 až po rok 2012). Byl vybrán scénář označován jako varianta č. 3, který předpokládá v roce 2022 setrvalý stav celkového počtu provozovaných spalovacích zařízení na tuhá paliva, při mírném snížení počtu odhořivacích kotlů, podstatném snížení počtu prohořivacích kotlů a nárůstu počtu automatických a zplyňovacích kotlů. Důvodem pro výběr varianty č. 3, bylo malé pokrytí odběru impaktorem DLPI při spalovacích zkouškách na prohořivacím a odhořivacím kotli. Vybraná varianta udává hodnotu EF TZL pro hnědé uhlí 4,69 kg/t a pro biomasu 1,13 kg/t. EF TZL byly přepočteny z měrných emisí TZL naměřených při provedených spalovacích zkouškách zmiňovaných výše. Pro hnědé uhlí byly brány hodnoty ME TZL ze spalovacích zkoušek č. 1, 2, 11, 12, 18 a 19 a pro biomasu byly brány hodnoty ME TZL ze spalovacích zkoušek č. 3, 4, 9, 10, 15 - 17, 22 - 25. EF TZL vyšel pro HU v rozsahu (6,25 - 6,74) kg/t a pro biomasu v rozsahu (1,87 - 2,76) kg/t v závislosti na typu odběrového zařízení. Stanovené EF TZL pomocí cyklonu a impaktoru vyšly u obou paliv vyšší než EF TZL udávané v metodice. Důvodem zvýšení hodnot EF může být skutečnost, v metodice není nezohledňován režim spalování - tedy kvalita obsluhy spalovacího zařízení.

Pokrytí spalovací zkoušky odběrem pomocí impaktoru DLPI bylo u prohořivacího kotle v průměru jen 10 % a u odhořivacího kotle průměru jen 30 %. U těchto kotlů z hlediska malého procentuálního pokrytí je reprezentativnost výsledků naměřených impaktorem DLPI velmi nízká. Ale i přes tuto skutečnost hodnoty ME TZL a ME jednotlivých velikostních frakcí obsažených v TZL těchto kotlů vysoce převyšují hodnoty ME TZL a ME jednotlivých velikostních frakcí v TZL automatických a zplyňovacích kotlů.

Pro budoucí spalovací zkoušky se doporučuje předřadit před impaktor DLPI ředičku s nastavitelným ředícím poměrem, která umožní delší pokrytí impaktorem DLPI. V době, kdy byly experimenty prováděny, ředička nebyla k dispozici.

tab. č. 24 Stanovení EF TZL při spalování HU a biomasy dle metodiky [92]

Palivo	Typ konstrukce spalovacího zařízení	Zastoupení typů konstrukcí spalovacích zařízení na spotřebě uhlí a biomasy [89]	Průměrná hodnota ME TZL pro P _j m, P _{sn} cyklon [kg/t]	Průměrná hodnota ME TZL pro P _j m, P _{sn} impaktor [kg/t]	Průměrná hodnota ME násobená zastoupením typů konstrukcí spalovacích zařízení cyklon [kg/t]	Průměrná hodnota ME násobená zastoupením typů konstrukcí spalovacích zařízení impaktor [kg/t]
HU	odhořivací kotel	0,671	7,2	8,9	4,80	5,99
	prohořivací kotel	0,049	20,0	9,9	0,98	0,48
	automatický kotel	0,28	1,7	1,0	0,47	0,27
EF TZL při spalování HU					6,25	6,74
Biomasa	odhořivací kotel	0,079	4,0	5,4	0,32	0,43
	prohořivací kotel	0,201	8,8	6,0	1,78	1,20
	zplyňovací kotel	0,442	1,4	0,5	0,62	0,20
	automatický kotel na pelety	0,278	0,2	0,2	0,05	0,04
EF TZL při spalování biomasy					2,76	1,87

Grafické porovnání ME ultrajemných částic a částic jemné frakce v závislosti na palivu a typu spalovacího zařízení znázorňuje graf č. 8 a graf č. 9. V grafech je pokrytí impaktorem, které bylo menší než 50 %, odlišeno šrafovaně. Nejvyšších hodnot ME UFP dosáhl prohořivací kotel při jmenovitém výkonu při spalování mokrého smrkového dříví. A to i přes nízké pokrytí odběrem pomocí impaktoru DLPI (17,4 %).

Porovnání jednotlivých hmotnostních koncentrací PM_1 a $PM_{0,1}$ bylo provedeno v závislosti na použitém palivu.

Hnědé uhlí

ME $PM_{0,1}$ (viz graf č. 8) - nejvyšší hodnoty ME $PM_{0,1}$ bylo dosaženo u automatického kotle při sníženém výkonu. Zástupci starších typů spalovacích zařízení (prohořivací a odhořivací kotel) produkují vyšší ME $PM_{0,1}$ při výkonu jmenovitém než při výkonu sníženém. U kotlů novějšího typu (automatický a zplyňovací) je tento trend zhruba opačný. Vyšší hodnoty ME $PM_{0,1}$ jsou při spalovacích zkouškách na novějších typech spalovacích zařízení při výkonu sníženém. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME $PM_{0,1}$ jsou zhruba v tomto pořadí: automatický > prohořivací > zplyňovací > odhořivací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME $PM_{0,1}$).

ME PM_1 (viz graf č. 9) - nejvyšší hodnoty ME PM_1 bylo dosaženo u odhořivacího kotle při sníženém výkonu. Zástupci starších i nových typů spalovacích zařízení produkují vyšší ME PM_1 při výkonu sníženém než při výkonu jmenovitém. Při porovnání typů spalovacích zařízení vychází, že hodnoty ME PM_1 jsou zhruba v tomto pořadí: prohořivací > odhořivací > automatický > zplyňovací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME PM_1).

Palivo MIX

ME $PM_{0,1}$ (viz graf č. 8) - nejvyšší hodnoty ME $PM_{0,1}$ bylo dosaženo u prohořivacího kotle při jmenovitém výkonu. Zástupci starších typů spalovacích zařízení (prohořivací a odhořivací kotel) produkují vyšší ME $PM_{0,1}$ než kotel zplyňovací. U kotlů všech typů byly ME $PM_{0,1}$ vždy vyšší při jmenovitém než při sníženém výkonu. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME $PM_{0,1}$ jsou v průměru v tomto pořadí: prohořivací > odhořivací > zplyňovací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME $PM_{0,1}$).

ME PM_1 (viz graf č. 9) - nejvyšší hodnoty ME PM_1 bylo dosaženo také u prohořivacího kotle při sníženém výkonu. Zástupci starších i nových typů spalovacích zařízení produkují vyšší ME PM_1 při výkonu sníženém než při výkonu jmenovitém. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME PM_1 jsou zhruba v tomto pořadí: prohořivací > odhořivací > zplyňovací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME PM_1).

Mokré smrkové dřevo

ME $PM_{0,1}$ (viz graf č. 8) - nejvyšší hodnoty ME $PM_{0,1}$ bylo dosaženo u prohořivacího kotle při výkonu jmenovitém. Zástupci starších typů spalovacích zařízení (prohořivací a odhořivací kotel) produkují vyšší ME $PM_{0,1}$ než kotel zplyňovací. U všech kotlů byly ME $PM_{0,1}$ vždy vyšší při jmenovitém výkonu než při výkonu sníženém. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME $PM_{0,1}$ jsou v průměru v tomto pořadí: prohořivací > odhořivací > zplyňovací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME $PM_{0,1}$).

ME PM₁ (viz graf č. 9) - nejvyšší hodnoty ME PM₁ bylo dosaženo také u prohořivacího kotle při sníženém výkonu. Zástupci starších i nových typů spalovacích zařízení produkují vyšší ME PM₁ při výkonu sníženém než při výkonu jmenovitém. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME PM₁ jsou zhruba v tomto pořadí: prohořivací > odhořivací > zplyňovací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME PM₁).

Suché smrkové dřevo

Tento druh paliva byl spalován pouze ve starších typech spalovacích zařízení.

ME PM_{0,1} (viz graf č. 8) - nejvyšší hodnoty ME PM_{0,1} bylo dosaženo u prohořivacího kotle při výkonu jmenovitém. Zástupci starších typů spalovacích zařízení (prohořivací a odhořivací kotel) produkují vyšší ME PM_{0,1} při jmenovitém výkonu než při výkonu sníženém. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME PM_{0,1} jsou v průměru v tomto pořadí: prohořivací > odhořivací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME PM_{0,1}).

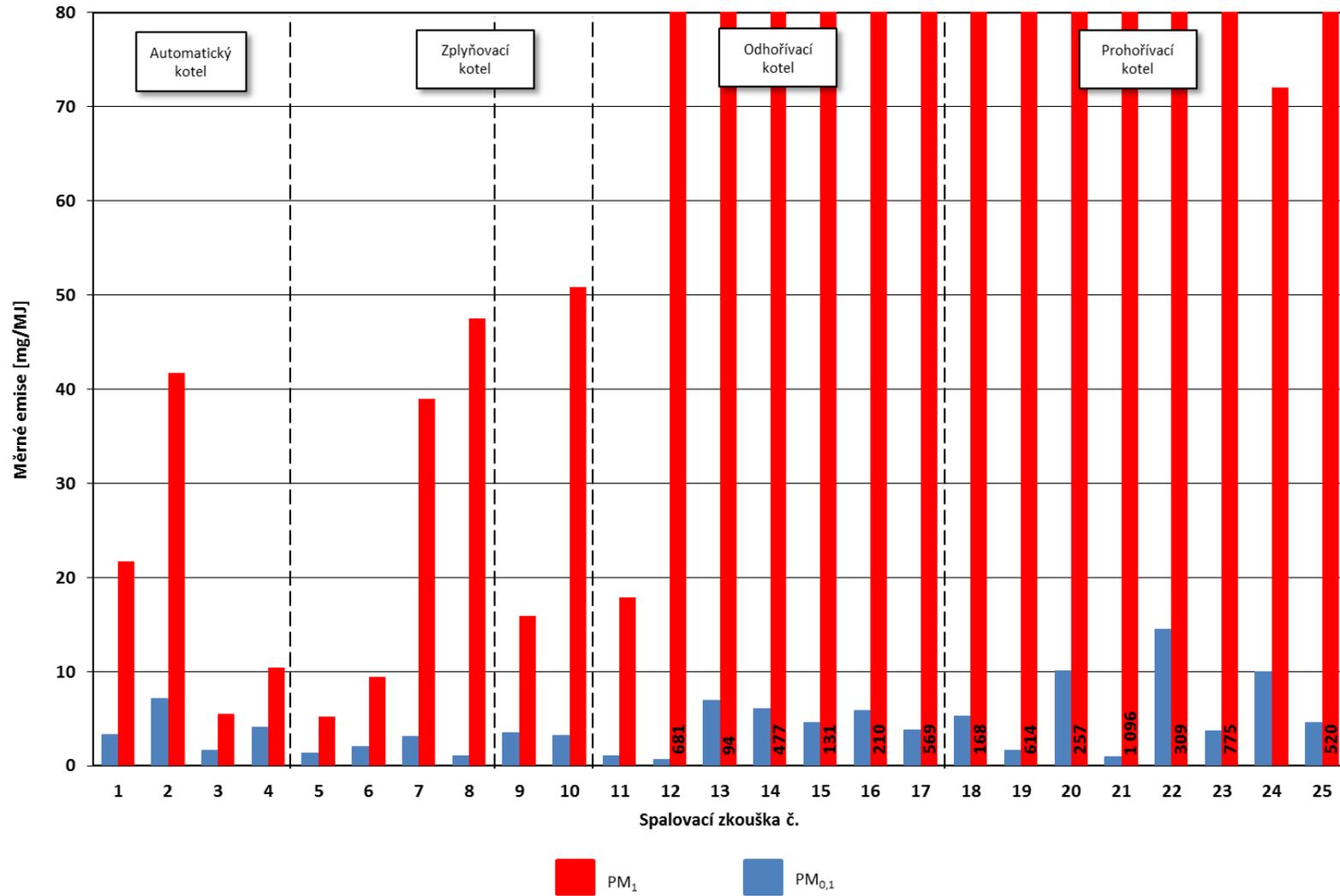
ME PM₁ (viz graf č. 9) - nejvyšší hodnoty ME PM₁ bylo dosaženo u odhořivacího kotle při sníženém výkonu. Zástupci starších i nových typů spalovacích zařízení produkují vyšší ME PM₁ při výkonu sníženém než při výkonu jmenovitém. Z porovnání typů spalovacích zařízení vyplývá, že hodnoty ME PM₁ jsou zhruba v tomto pořadí: odhořivací > prohořivací (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty ME PM₁).

Dřevěné pelety

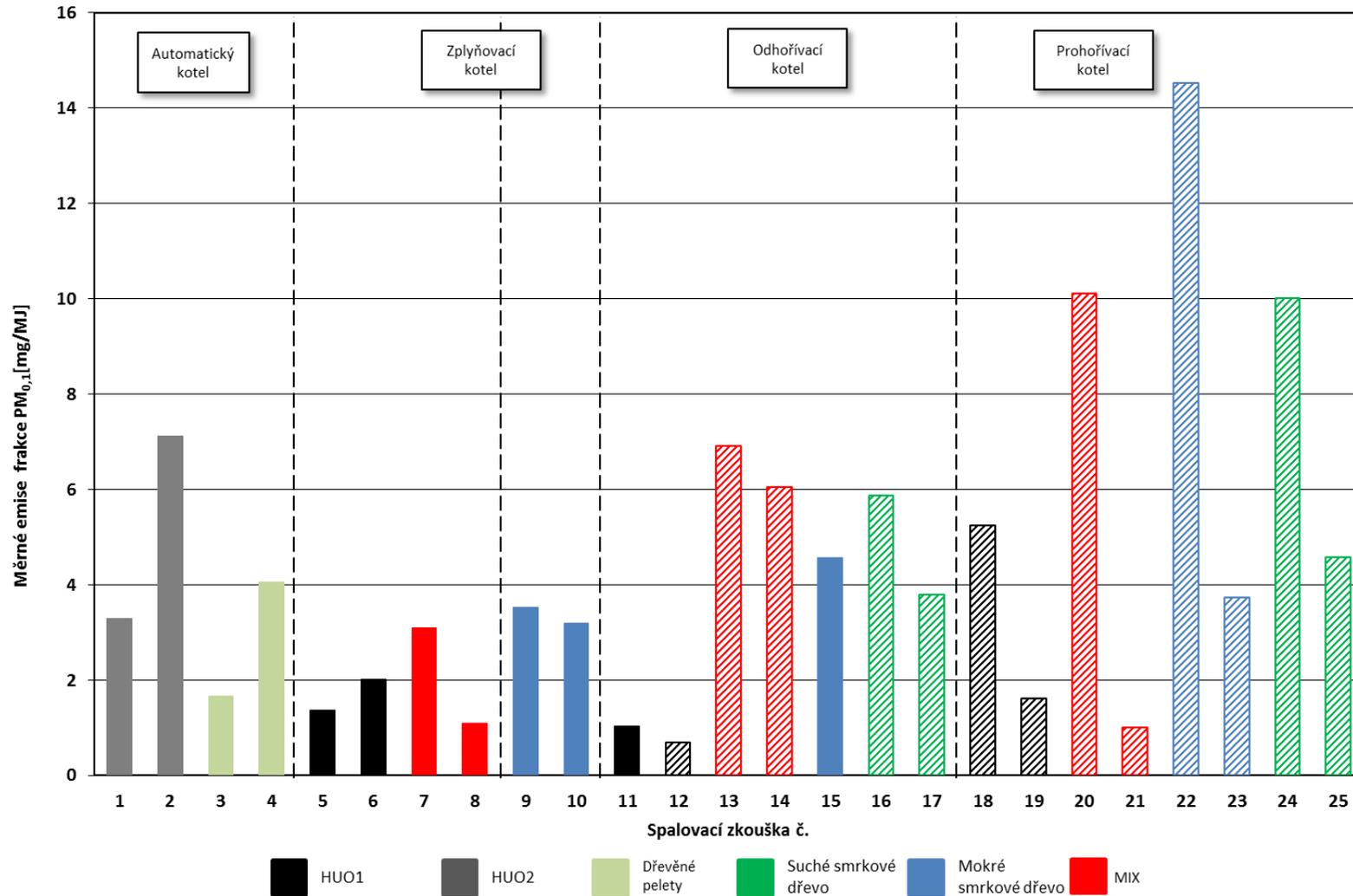
Tento druh paliva byl spalován pouze ve zplyňovacím kotli.

ME PM_{0,1} (viz graf č. 8) - nejvyšší hodnoty ME PM_{0,1} bylo dosaženo při výkonu sníženém.

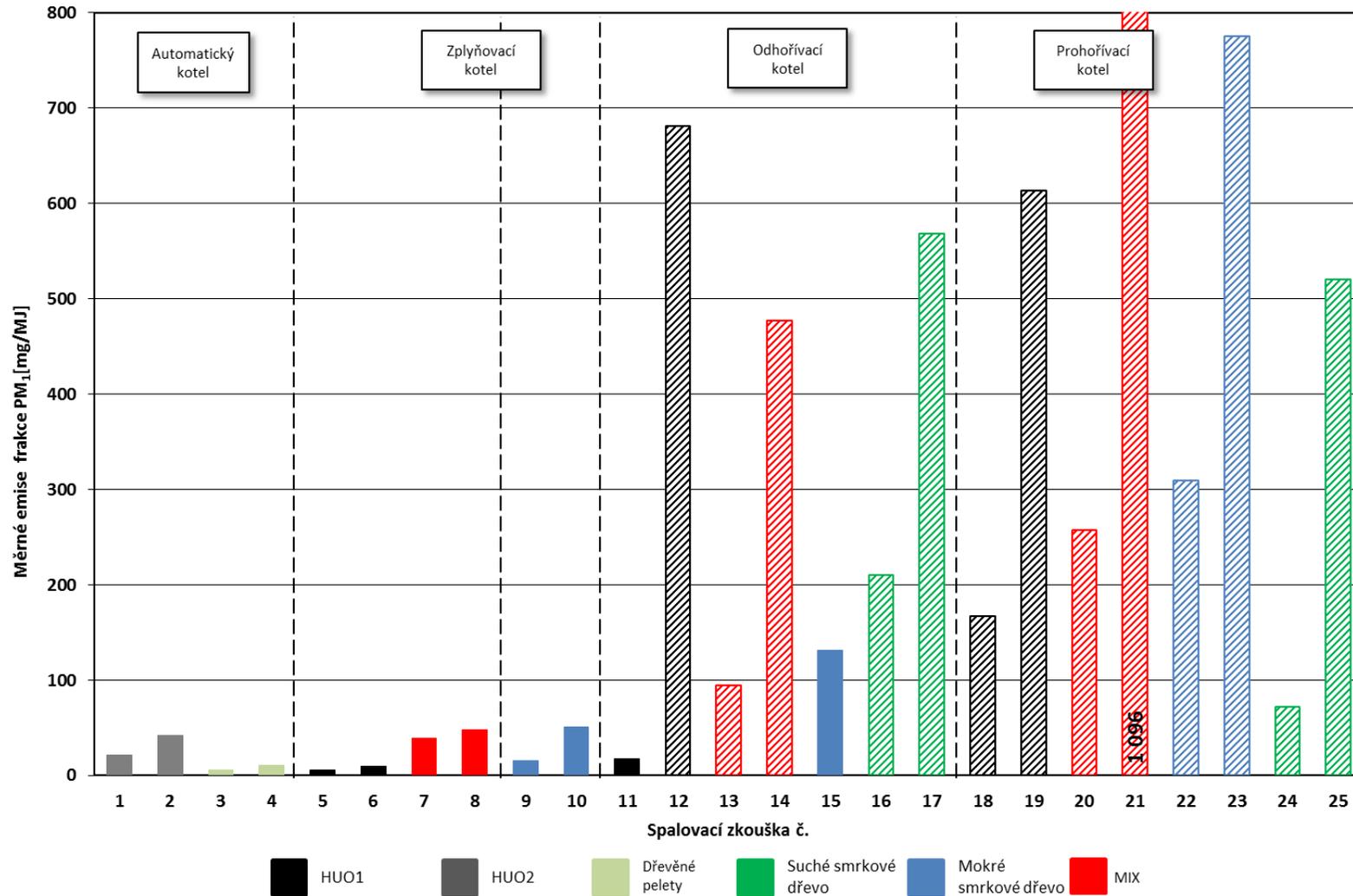
ME PM₁ (viz graf č. 9) - nejvyšší hodnoty ME PM₁ bylo dosaženo taktéž při výkonu sníženém.



graf č. 7 Porovnání hmotnostní koncentrace PM_{0,1} a PM₁, odebráno pomocí impaktoru DLPI



graf č. 8 Měrné emise velikostní frakce $PM_{0,1}$, pokrytí odběru impaktorem menší než 50 % - vyznačeno šrafovaně



graf č. 9 Měrné emise velikostní frakce PM₁, pokrytí odběru impaktorem menší než 50 % - vyznačeno šrafovane

V tab. č. 25 a tab. č. 26 je barevně označena hodnota od nejnižší (zelená barva) po nejvyšší (červená barva) naměřenou hodnotu.

Pokud se podíváme na absolutní hodnoty ME TZL a ME jednotlivých velikostních frakcí jsou mnohem horší kotle staršího typu spalování. Výjimku tvoří pouze kotel automatický, (viz tab. č. 25), který při porovnání frakce $PM_{0,1}$ má v průměru nejvyšší ME $PM_{0,1}$ při spalování hnědého uhlí.

Při spalování biomasy v MSZ se dle literatury [93],[94] hodnoty měrných emisí PM_1 pohybují v rozmezí 9 - 613 mg/MJ a to v závislosti na použitém typu spalovacího zařízení a druhu biomasy. Výsledky měrných emisí PM_1 u provedených spalovacích zkoušek při spalování biomasy jsou v tomto rozmezí, i když nebylo použito stejných měřicích přístrojů.

U novějších typů spalovacích zařízení je snížení ME TZL velmi výrazné. Avšak hodnoty ME $PM_{0,1}$ zůstaly v průměru stejné. Z hlediska zdravotního působení (depozice jednotlivých velikostních frakcí částic v plicích) nelze jednoznačně říci, že novější typy kotlů budou méně ovlivňovat negativním způsobem zdraví obyvatelstva, pokud se prokáže, že škodliviny v emisích sorbované na částicích jsou z velké části obsaženy právě na frakci $PM_{0,1}$.

tab. č. 25 Porovnání ME $PM_{0,1}$ [mg/MJ] v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování

kotel	výkon	HU	směs paliv	mokrý smrkové dřevo	suché smrkové dřevo	dřevěné pelety
Automatický kotel	jmenovitý	3,29				1,67
	snížený	7,13				4,06
Zplyňovací kotel C20S	jmenovitý	1,36	3,09			
	snížený	2,01	1,10			
Zplyňovací kotel DC25GS	jmenovitý			3,52		
	snížený			3,20		
Odhořivací kotel	jmenovitý	1,03	6,91		5,88	
	snížený	0,68	6,04	4,56	3,79	
Prohořivací kotel	jmenovitý	5,24	10,12	14,52	10,01	
	snížený	1,61	1,00	3,73	4,58	

Při porovnání procentuálního zastoupení $PM_{0,1}$ v TZL vychází, že více je procentuálně zastoupena frakce $PM_{0,1}$ v TZL u novějších typů spalovacích zařízení (viz tab. č. 26).

tab. č. 26 Porovnání procentuálního zastoupení $PM_{0,1}$ v TZL[%] v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování

kotel	výkon	HU	směs paliv	mokrý smrkové dřevo	suché smrkové dřevo	dřevěné pelety
Automatický kotel	jmenovitý	13,06				27,88
	snížený	14,53				33,52
Zplyňovací kotel C20S	jmenovitý	21,51	6,04			
	snížený	19,88	2,12			
Zplyňovací kotel DC25GS	jmenovitý			16,31		
	snížený			6,05		
Odhřívací kotel	jmenovitý	5,19	6,65		2,62	
	snížený	0,09	1,18	3,35	0,58	
Prohořívací kotel	jmenovitý	3,05	3,78	4,57	13,16	
	snížený	0,23	0,08	0,46	0,85	

7.2 Početní koncentrace částic naměřená SMPS

Přístrojem SMPS se měřila frekvenční spektra jednotlivých velikostí částic ($PM_{0,1}$ až PM_1) po celou spalovací zkoušku. Jedno frekvenční spektrum bylo naměřeno asi za dvě minuty.

Na základě použití přístroje SMPS bylo možno stanovit celkový počet částic. Avšak celé toto měření je založeno na řadě předpokladů (konstanty - tvar částic, hustota částic,...), tímto způsobem stanovená hmotnost částic není porovnatelná s výsledkem naměřeným impakční metodou (impaktorem DLPI).

Grafy početních koncentrací (PK) frakcí PM_1 a $PM_{0,1}$ ze spalovacích zkoušek byly vytvořeny v programu *Data Merge Software Module* [95], který pro vykreslení grafů používá hodnoty naměřené přístrojem SMPS.

Grafické porovnání jednotlivých početních koncentrací PM_1 a $PM_{0,1}$ bylo provedeno v závislosti na použitém palivu. V každém sloupci tab. č. 27, tab. č. 28, tab. č. 29, tab. č. 30, tab. č. 31 a tab. č. 32 je barevně označena hodnota početní koncentrace od nejnižší (zelená barva) po nejvyšší (červená barva) naměřenou hodnotu PK. V tab. č. 33 a tab. č. 34 jsou hodnoty početní koncentrace také označeny od nejnižší (zelená barva) po nejvyšší (červená barva) naměřenou hodnotu PK, ale komplexně bez rozlišení sloupců.

Porovnání početní koncentrace částic při spalování hnědého uhlí v jednotlivých typech spalovacích zařízení a při různých režimech spalování (viz graf č. 10)

U většiny spalovacích zkoušek měly křivky početních koncentrací částic bimodální rozdělení, kde první maximum se vyskytovalo v oblasti ultrajemných částic. Druhé maximum se vyskytovalo v rozmezí velikosti částic 150 nm až 300 nm.

- $PM_{0,1}$ - nejvyšší početní koncentrace (PK) dosáhl prohořívací kotel při jmenovitém výkonu, max. početní koncentrace 6×10^8 částic/cm³ bylo dosaženo při velikosti částic 100 nm. Nejnižší PK dosáhl automatický kotel při výkonu sníženém, jeho max. PK byla naměřena 1×10^7 částic/cm³ ve velikosti částic 60 nm. Z grafů lze vyčíst, že při jmenovitém výkonu dosahovaly PK maxima kolem velikosti částic 30 až 50 nm a 100 nm, při výkonu sníženém byly maxima PK posunuty do velikostí částic 50 až 60 nm.

- $PM_{0,1}$ - PM_1 - nejvyšší početní koncentrace (PK) dosáhl prohořivací kotel při jmenovitém výkonu, max. početní koncentrace $1,5 \times 10^8$ částic/cm³ bylo dosaženo ve velikosti částic 320 nm. Nejnižší PK dosáhl automatický kotel při výkonu sníženém, jeho max. PK 1×10^7 částic/cm³ ve velikosti částic 160 nm. Z grafů lze vyčíst, že při jmenovitém výkonu dosahovaly PK maxima kolem velikosti částic 150 nm a 320 nm, při výkonu sníženém byly maxima PK posunuty do velikostí částic 200 až 250 nm.

V tab. č. 27 je uvedena PK $PM_{0,1}$ a PM_1 při spalování hnědého uhlí.

Při porovnání typů spalovacích zařízení vychází, že hodnoty PK $PM_{0,1}$ jsou v tomto pořadí (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK $PM_{0,1}$):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > zplyňovací > odhořivací > automatický,
- při sníženém výkonu: odhořivací > prohořivací > zplyňovací > automatický,
- průměr obou režimů: prohořivací (spalovací zkouška č. 18 a 19) > odhořivací (spalovací zkouška č. 11 a 12) > zplyňovací (spalovací zkouška č. 5 a 6) > automatický (spalovací zkouška č. 1 a 2).

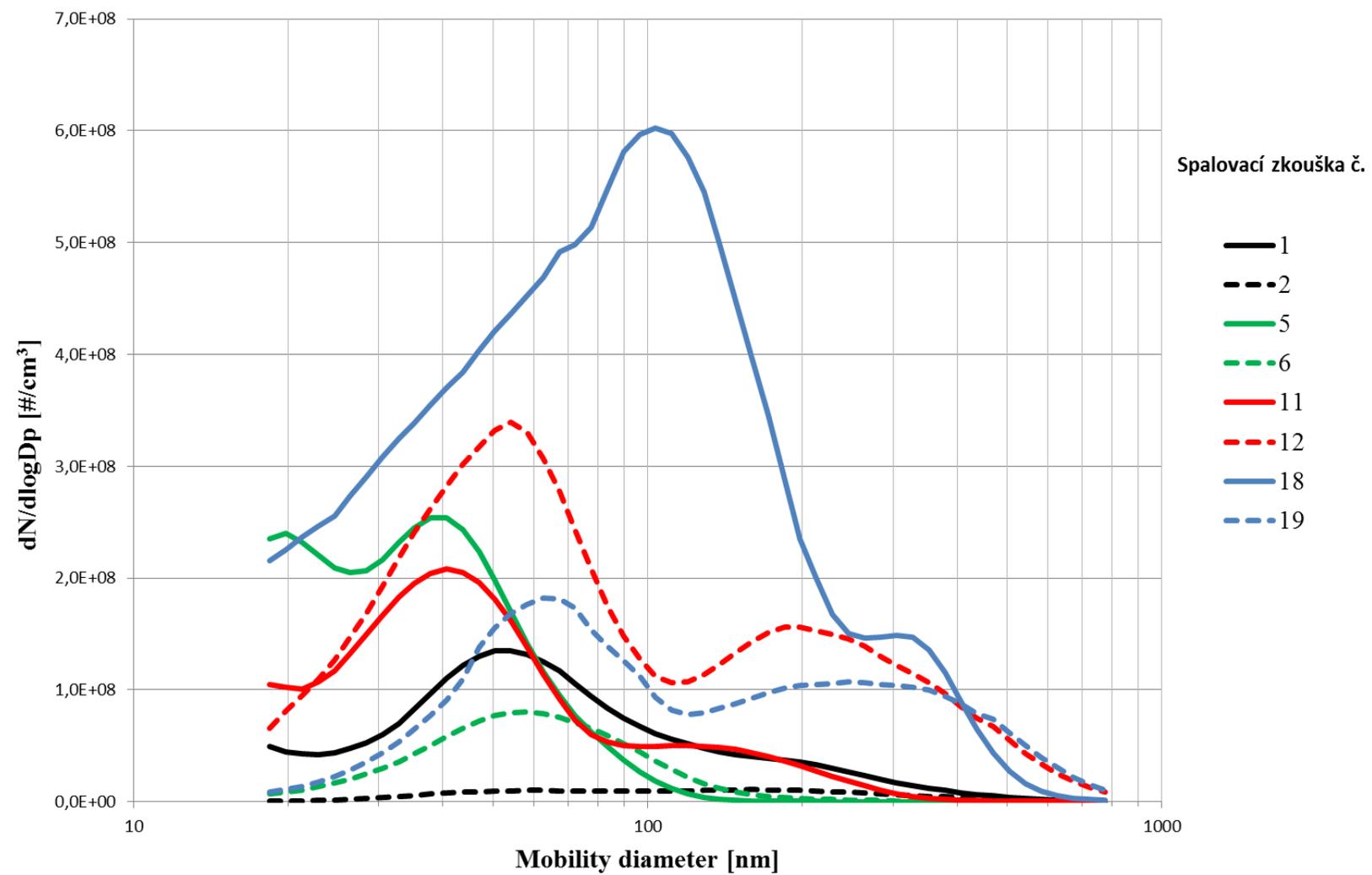
Při porovnání hodnot PK PM_1 (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM_1):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > zplyňovací > odhořivací > automatický,
- při sníženém výkonu: odhořivací > prohořivací > zplyňovací > automatický,
- v průměru obou režimů: prohořivací > odhořivací > zplyňovací > automatický.

tab. č. 27 Početní koncentrace $PM_{0,1}$ a PM_1 [# / cm³] při spalování hnědého uhlí

kotel	výkon	HU, $PM_{0,1}$	HU, PM_1
Automatický kotel	jmenovitý	2,13E+09	2,74E+09
	snížený	1,61E+08	3,35E+08
Zplyňovací kotel	jmenovitý	4,21E+09	4,24E+09
	snížený	1,17E+09	1,29E+09
Odhořivací kotel	jmenovitý	3,19E+09	3,71E+09
	snížený	5,21E+09	7,98E+09
Prohořivací kotel	jmenovitý	9,84E+09	1,54E+10
	snížený	2,38E+09	4,59E+09

Ze zdravotního hlediska při spalování hnědého uhlí je méně příznivý režim spalování - jmenovitý výkon, neboť vysoká PK $PM_{0,1}$ (vrchol) je posunuta k menším částicím než při výkonu sníženém. Také u všech kotlů (kromě odhořivacího kotle) je při jmenovitém výkonu celková PK $PM_{0,1}$ vyšší.



graf č. 10 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - hnědé uhlí

Porovnání početní koncentrace částic při spalování paliva MIX v jednotlivých typech spalovacích zařízení a při různých režimech spalování (viz graf č. 11)

U většiny spalovacích zkoušek měly křivky početních koncentrací částic bimodální rozdělení, kde první maximum se vyskytovalo v oblasti ultrajemných částic. Druhé maximum se vyskytovalo v rozmezí 110 nm až 400 nm.

- $PM_{0,1}$ - nejvyšší početní koncentrace (PK) dosáhl prohořivací kotel při jmenovitém výkonu, max. početní koncentrace $9,7 \times 10^8$ částic/cm³ bylo dosaženo při velikosti částic 100 nm. Z grafů lze vyčíst, že při jmenovitém výkonu dosahovaly PK maxima ve velikostech částic 30, 40 a 100 nm, při výkonu sníženém byly maxima PK posunuty do velikostí částic 50 a 60 nm.
- $PM_{0,1}$ - PM_1 - nejvyšší početní koncentrace (PK) dosáhl prohořivací kotel při jmenovitém výkonu, početní koncentrace $9,7 \times 10^8$ částic/cm³ bylo dosaženo ve velikosti částic 110 nm. Nejnižší PK dosáhl zplyňovací kotel při výkonu sníženém, jeho max. PK byla naměřena $4,6 \times 10^7$ částic/cm³ ve velikosti částic 150 nm. Z grafů lze vyčíst, že při jmenovitém výkonu dosahovaly PK maxima kolem velikosti částic 110 nm a 250 nm, při výkonu sníženém byly maxima PK posunuty do velikostí částic 150 nm až 350 nm.

V tab. č. 28 je uvedena PK $PM_{0,1}$ a PM_1 při spalování paliva MIX.

Při porovnání typů spalovacích zařízení vychází, že hodnoty PK $PM_{0,1}$ jsou v tomto pořadí (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK $PM_{0,1}$):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > odhořivací > zplyňovací,
- při sníženém výkonu: odhořivací > zplyňovací > prohořivací,
- průměr obou režimů: odhořivací (spalovací zkouška č. 13 a 14) > prohořivací (spalovací zkouška č. 20 a 21) > zplyňovací (spalovací zkouška č. 7 a 8).

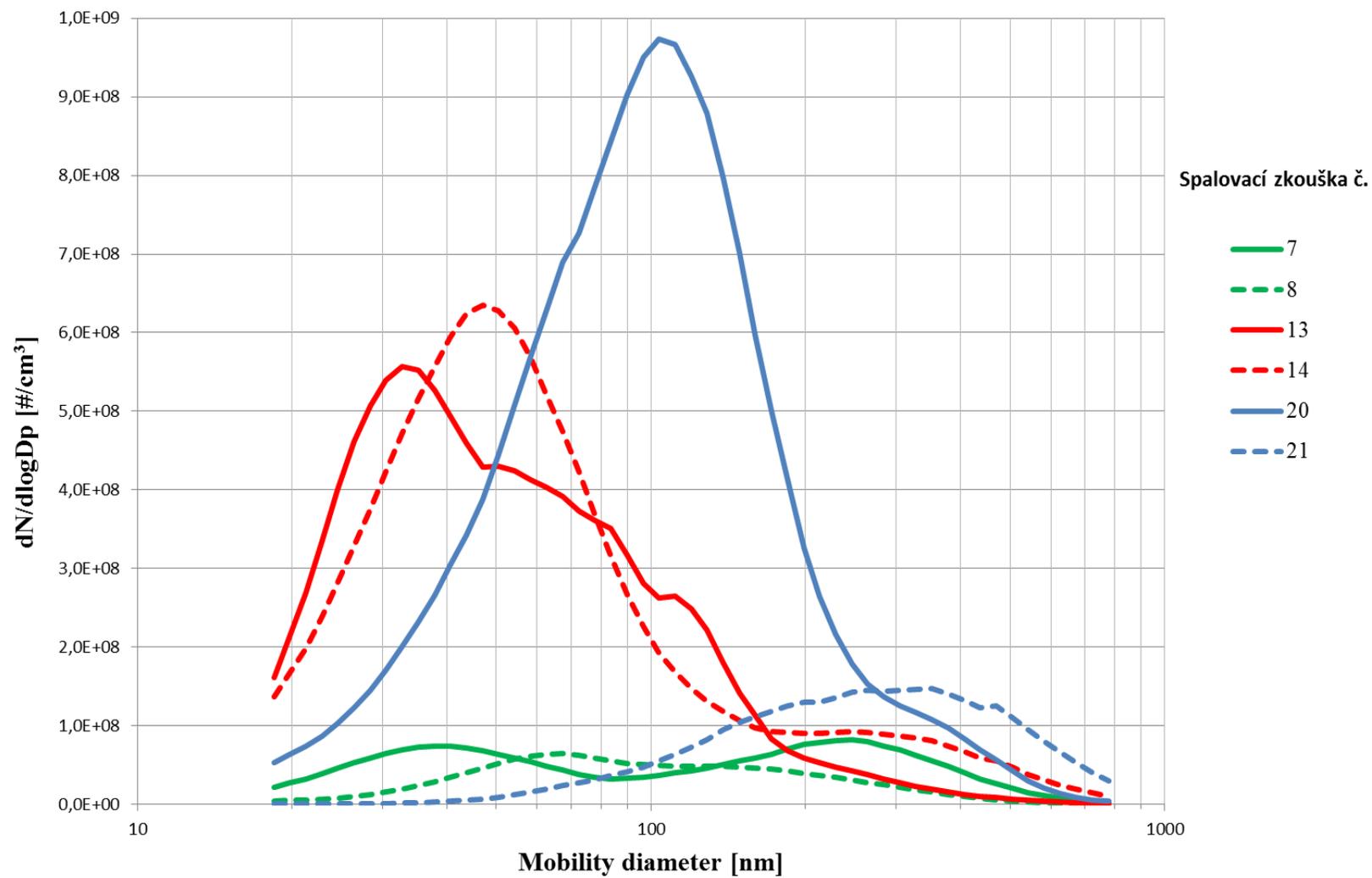
Při porovnání hodnot PK PM_1 (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM_1):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > zplyňovací > odhořivací,
- při sníženém výkonu: odhořivací > zplyňovací > prohořivací,
- v průměru obou režimů: odhořivací > prohořivací > zplyňovací.

tab. č. 28 Početní koncentrace $PM_{0,1}$ a PM_1 [# / cm³] při spalování paliva MIX (směs paliv)

kotel	výkon	směs paliv, $PM_{0,1}$	směs paliv, PM_1
Zplyňovací kotel	jmenovitý	1,25E+09	2,56E+09
	snížený	8,94E+08	1,57E+09
Odhořivací kotel	jmenovitý	9,91E+09	1,17E+10
	snížený	1,01E+10	1,23E+10
Prohořivací kotel	jmenovitý	1,06E+10	1,84E+10
	snížený	3,52E+08	3,38E+09

Ze zdravotního hlediska při spalování směsi paliv je méně příznivý režim spalování - jmenovitý výkon, neboť vysoká PK $PM_{0,1}$ (vrchol) je posunuta k menším částicím než při výkonu sníženém. U prohořivacího a zplyňovacího kotle je při jmenovitém výkonu celková PK $PM_{0,1}$ vyšší.



graf č. 11 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - MIX

*Porovnání početní koncentrace částic při spalování **mokrého smrkového dřeva** v jednotlivých typech spalovacích zařízení a při různých režimech spalování (viz graf č. 12)*

U spalovacích zkoušek měly křivky početních koncentrací částic unimodální rozdělení. Maxima PK u spalovacích zkoušek při jmenovitém výkonu se vyskytovaly v oblasti ultrajemných částic ve velikostech 60 nm. Maxima PK u spalovacích zkoušek při sníženém výkonu se vyskytovaly ve velikostech 100 nm a 200 nm.

- Nejvyšší početní koncentrace (PK) částic dosáhl prohořivací kotel při jmenovitém výkonu, početní koncentrace $6,2 \times 10^8$ částic/cm³ bylo dosaženo při velikosti částic 60 nm. Nejnižší PK dosáhl prohořivací kotel při výkonu sníženém, $1,5 \times 10^8$ částic/cm³ ve velikosti částic 90 nm.

V tab. č. 29 je uvedena PK PM_{0,1} a PM₁ při spalování mokrého smrkového dřeva.

Při porovnání typů spalovacích zařízení vychází, že hodnoty PK PM_{0,1} jsou v tomto pořadí (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM_{0,1}):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > zplyňovací,
- při sníženém výkonu: odhořivací > zplyňovací > prohořivací,
- průměr obou režimů: prohořivací (spalovací zkouška č. 22 a 23) > zplyňovací (spalovací zkouška č. 9 a 10) > odhořivací (spalovací zkouška č. 15).

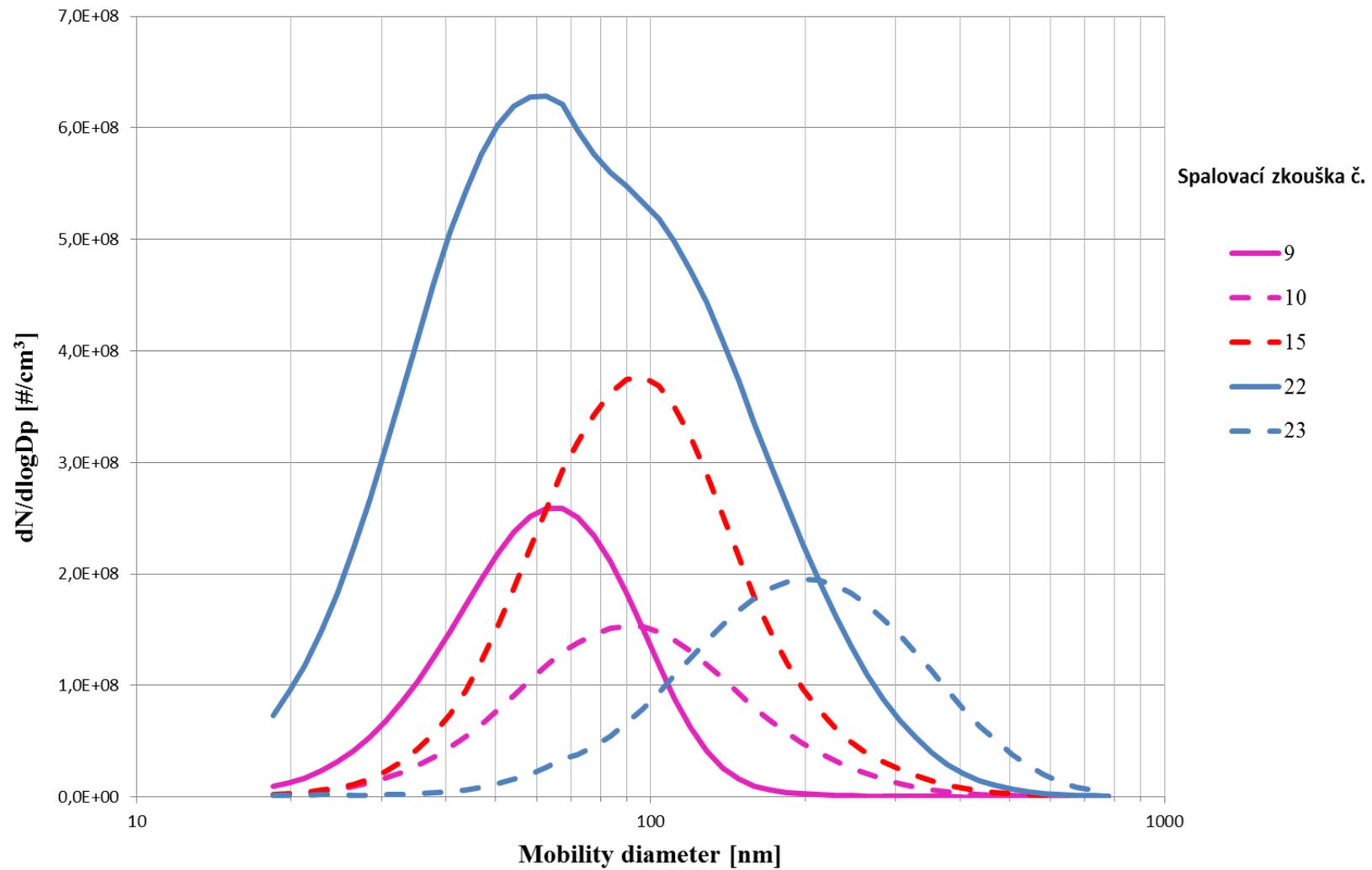
Při porovnání hodnot PK PM₁ (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM₁):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > zplyňovací,
- při sníženém výkonu: odhořivací > prohořivací > zplyňovací,
- v průměru obou režimů: prohořivací > odhořivací > zplyňovací.

tab. č. 29 Početní koncentrace PM_{0,1} a PM₁ [# / cm³] při spalování mokrého smrkového dřeva

kotel	výkon	mokrý smrkové dřevo, PM _{0,1}	mokrý smrkové dřevo, PM ₁
Zplyňovací kotel	jmenovitý	3,46E+09	3,72E+09
	snížený	1,86E+09	2,74E+09
Odhořivací kotel	jmenovitý		
	snížený	3,75E+09	6,08E+09
Prohořivací kotel	jmenovitý	1,07E+10	1,50E+10
	snížený	5,28E+08	3,67E+09

Ze zdravotního hlediska při spalování mokrého smrkového dřeva je méně příznivý režim spalování - jmenovitý výkon, neboť vysoká PK PM_{0,1} (vrchol) je posunuta k menším částicím než při výkonu sníženém. Také u prohořivacího a zplyňovacího kotle je při jmenovitém výkonu celková PK PM_{0,1} vyšší.



graf č. 12 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - Mokré smrkové dříví

Porovnání početní koncentrace částic při spalování suchého smrkového dřeva v jednotlivých typech spalovacích zařízení a při různých režimech spalování (viz graf č. 13)

U spalovacích zkoušek na prohořivacím kotli převládalo unimodální rozdělení PK částic a u spalovacích zkoušek na odhořivacím kotli převládalo bimodální rozdělení PK částic.

- U prohořivacího kotle bylo dosaženo největší PK částic při jmenovitém výkonu, $5,5 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 55 nm, u sníženého výkonu bylo dosaženo maximální PK částic $1,1 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 210 nm.
- U odhořivacího kotle bylo dosaženo největší PK částic při jmenovitém výkonu, $2,2 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 55 nm až 100 nm, u sníženého výkonu bylo dosaženo maximální PK částic $1,2 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 60 nm a $1,1 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 160 nm.

V tab. č. 30 je uvedena PK PM_{0,1} a PM₁ při spalování suchého smrkového dřeva.

Při porovnání typů spalovacích zařízení vychází, že hodnoty PK PM_{0,1} jsou v tomto pořadí (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM_{0,1}):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > odhořivací,
- při sníženém výkonu: prohořivací > odhořivací,
- průměr obou režimů: prohořivací (spalovací zkouška č. 24 a 25) > odhořivací (spalovací zkouška č. 16 a 17).

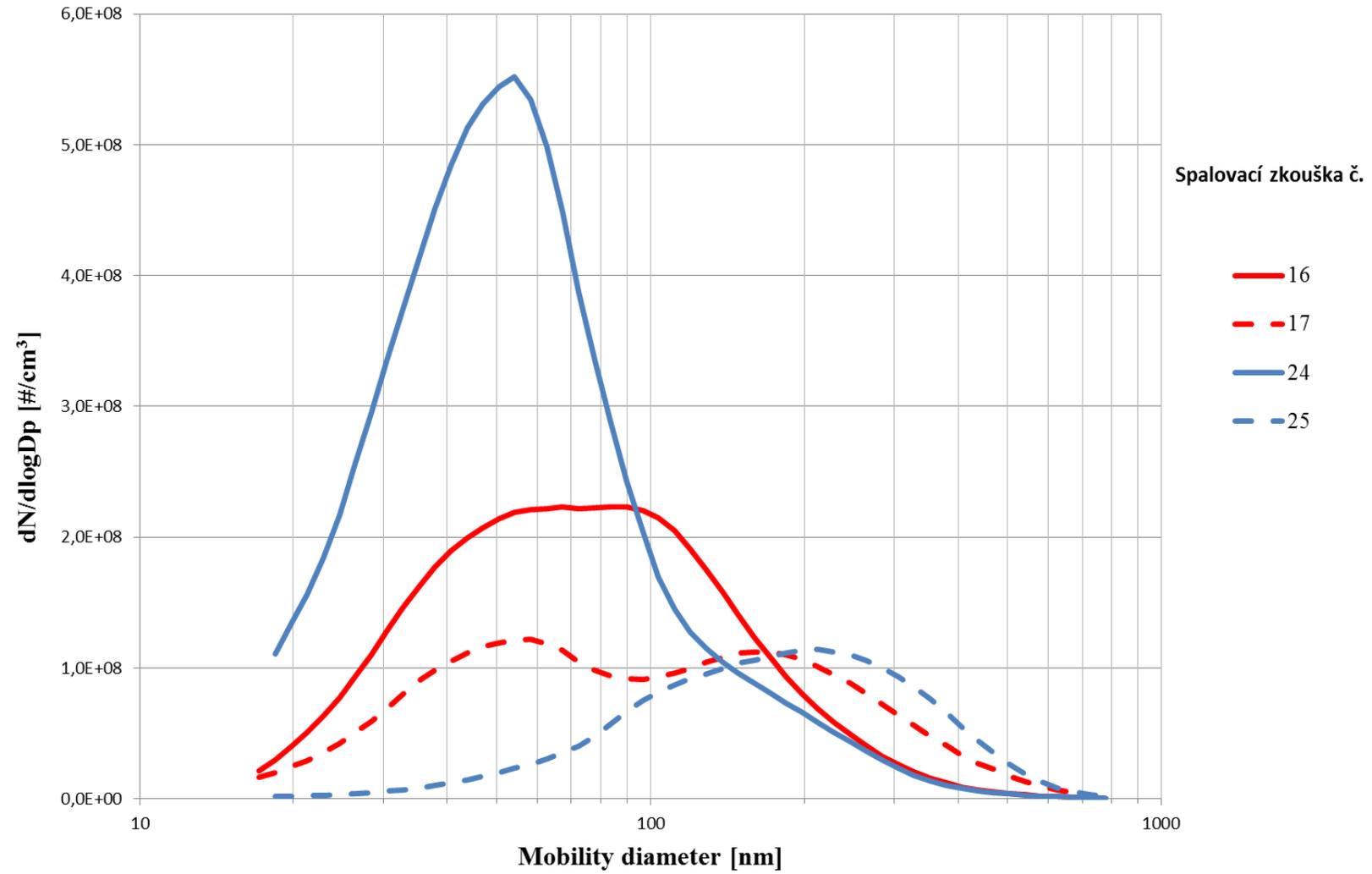
Při porovnání hodnot PK PM₁ (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM₁):

- při jmenovitém výkonu: prohořivací > odhořivací,
- při sníženém výkonu: odhořivací > prohořivací,
- v průměru obou režimů: prohořivací > odhořivací.

tab. č. 30 Početní koncentrace PM_{0,1} a PM₁ [# / cm³] při spalování suchého smrkového dřeva

kotel	výkon	suché smrkové dřevo, PM _{0,1}	suché smrkové dřevo, PM ₁
Odhořivací kotel	jmenovitý	3,91E+09	5,76E+09
	snížený	2,02E+09	3,87E+09
Prohořivací kotel	jmenovitý	8,66E+09	9,87E+09
	snížený	6,02E+08	2,60E+09

Ze zdravotního hlediska při spalování suchého smrkového dřeva je méně příznivý režim spalování - jmenovitý výkon, neboť vysoká PK PM_{0,1} (vrchol) je posunuta k menším částicím než při výkonu sníženém. Také při jmenovitém výkonu je celková PK PM_{0,1} vyšší.



graf č. 13 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - suché smrkové dříví

Porovnání početní koncentrace částic při spalování dřevěných pelet v automatickém kotli a při různých režimech spalování (viz graf č. 14)

U spalovacích zkoušek bylo unimodální rozdělení částic při výkonu sníženém a při výkonu jmenovitém bimodální rozdělení PK částic.

- Maxima PK částic bylo dosaženo při jmenovitém výkonu - $1,2 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 60 nm a při sníženém výkonu bylo dosaženo maxima PK částic $1,5 \times 10^8$ částic/cm³ u velikosti částic 70 nm.

V tab. č. 31 je uvedena PK PM_{0,1} a PM₁ při spalování dřevěných pelet v automatickém kotli.

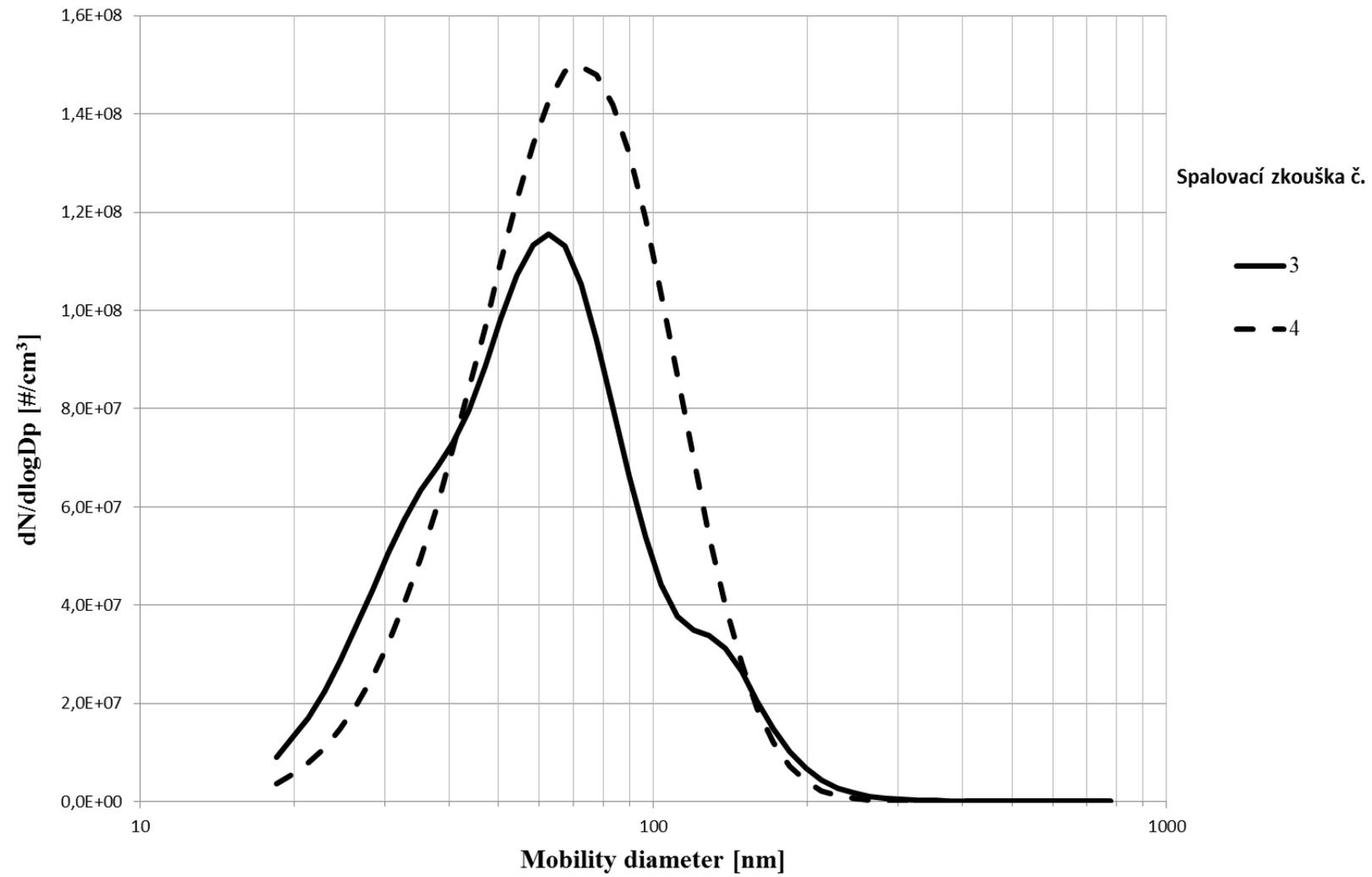
Při porovnání režimů spalování vychází, že hodnoty PK PM_{0,1} a PK PM₁ jsou v tomto pořadí (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty PK PM_{0,1}):

- snížený výkon > jmenovitý výkon

tab. č. 31 Početní koncentrace PM_{0,1} a PM₁ [# / cm³] při spalování dřevěných pelet

kotel	výkon	dřevěné pelety, PM _{0,1}	dřevěné pelety, PM ₁
Automatický kotel	jmenovitý	1,64E+09	1,87E+09
	snížený	1,97E+09	2,30E+09

Při spalování dřevěných pelet v automatickém kotli nelze jednoznačně určit, který režim spalování je méně příznivý ze zdravotního hlediska, neboť vysoká PK PM_{0,1} je u obou režimů v rozmezí velikosti částic 60 nm až 70 nm. Avšak celková PK PM_{0,1} je vyšší při sníženém výkonu spalování.



graf č. 14 Porovnání početní koncentrace částic v závislosti na palivu - dřevěné pelety

Porovnání početní koncentrace částic při spalování různých druhů paliv, v různých typech spalovacích zařízení a při různých režimech spalování (viz tab. č. 32, tab. č. 33 a tab. č. 34)

V tab. č. 33 je uvedeno procentuální zastoupení velikostní frakce PM_{0,1} ve frakci PM₁. Novější kotle i přes nižší hodnoty PK PM_{0,1} a PK PM₁ (viz tab. č. 32 a tab. 34), mají vyšší procentuální zastoupení velikostní frakce PM_{0,1} ve frakci PM₁. Kotle zplyňovací a automatické produkují cca 76 %_{poč.} PM_{0,1} v PM₁ a kotle prohořivací a odhořivací v průměru 58 %_{poč.} PM_{0,1} v PM₁. Celkově všechny kotle produkují v průměru 65 %_{poč.} PM_{0,1} ve frakci PM₁.

Ze zdravotního hlediska vyšel nejhůř prohořivací kotel při jmenovitém výkonu spalující různé druhy paliv. Obecně lze konstatovat, že novější typy spalovacích zařízení produkují v průměru menší PK PM_{0,1} a PM₁ než kotle staršího typu.

Při spalování biomasy v MSZ se dle literatury [48] hodnoty PK PM₁ pohybují v rozmezí 0,8x10⁷ - 5,5x10⁹ částic/cm³ a to v závislosti na použitém typu spalovacího zařízení a druhu biomasy. Výsledky PK PM₁ u provedených spalovacích zkoušek při spalování biomasy jsou v tomto rozmezí.

tab. č. 32 Početní koncentrace PM_{0,1} [# / cm³] v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování

kotel	výkon	HU	směs paliv	mokré smrkové dřevo	suché smrkové dřevo	dřevěné pelety
Automatický kotel	jmenovitý	2,13E+09				1,64E+09
	snížený	1,61E+08				1,97E+09
Zplyňovací kotel C20S	jmenovitý	4,21E+09	1,25E+09			
	snížený	1,17E+09	8,94E+08			
Zplyňovací kotel DC25GS	jmenovitý			3,46E+09		
	snížený			1,86E+09		
Odhořivací kotel	jmenovitý	3,19E+09	9,91E+09		3,91E+09	
	snížený	5,21E+09	1,01E+10	3,75E+09	2,02E+09	
Prohořivací kotel	jmenovitý	9,84E+09	1,06E+10	1,07E+10	8,66E+09	
	snížený	2,38E+09	3,52E+08	5,28E+08	6,02E+08	

tab. č. 33 Procentuální zastoupení početní koncentrace velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve velikostní frakci PM_1 [%], v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování

kotel	výkon	HU	směs paliv	mokrě smrkové dřevo	suché smrkové dřevo	dřevěné pelety
Automatický kotel	jmenovitý	77,6				87,7
	snížený	48,0				85,8
Zplyňovací kotel C20S	jmenovitý	99,3	49,1			
	snížený	90,8	57,0			
Zplyňovací kotel DC25GS	jmenovitý			92,9		
	snížený			67,9		
Odhořivací kotel	jmenovitý	86,1	85,1		67,9	
	snížený	65,3	82,2	61,7	52,4	
Prohořivací kotel	jmenovitý	63,9	57,4	71,5	87,7	
	snížený	51,9	10,4	14,4	23,2	

Při porovnání procentuálního zastoupení velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve frakci PM_1 , z hodnot početních (viz tab. č. 33) a hmotnostních koncentrací (viz tab. č. 34), vychází zastoupení velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve frakci PM_1 v závislosti na palivu pro:

- hnědé uhlí - 73 %_{poč.} a 11 %_{hm.},
- palivo MIX - 57 %_{poč.} a 4 %_{hm.},
- mokré smrkové dřevo - 62 %_{poč.} a 7,5 %_{hm.},
- suché smrkové dřevo - 58 %_{poč.} a 5 %_{hm.},
- dřevěné pelety - 87 %_{poč.} a 34 %_{hm.}.

tab. č. 34 Procentuální zastoupení hmotnostní koncentrace velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve velikostní frakci PM_1 [%], v závislosti na typu spalovacího zařízení, druhu paliva a režimu spalování

kotel	výkon	HU	směs paliv	mokrě smrkové dřevo	suché smrkové dřevo	dřevěné pelety
Automatický kotel	jmenovitý	15,2				30,0
	snížený	17,1				38,9
Zplyňovací kotel C20S	jmenovitý	26,1	7,9			
	snížený	21,3	2,3			
Zplyňovací kotel DC25GS	jmenovitý			22,1		
	snížený			6,3		
Odhořivací kotel	jmenovitý	5,7	7,3		2,8	
	snížený	0,1	1,3	3,5	0,7	
Prohořivací kotel	jmenovitý	3,1	3,9	4,7	13,9	
	snížený	0,3	0,1	0,5	0,9	

Procentuální porovnání ukazuje, že i přes nízké celkové hodnoty početních a hmotnostních koncentrací částic při spalování dřevěných pelet v automatickém kotli je procentuálně zastoupeno vysoké množství velikostní frakce $PM_{0,1}$ ve frakci PM_1 . V závislosti na palivu je zastoupení v tomto pořadí (uvedeno od nevyšší až po nejnižší hodnoty procentuálního zastoupení $PM_{0,1}$ v PM_1): dřevěné pelety > hnědé uhlí > mokré smrkové dřevo > suché smrkové dřevo > palivo MIX.

7.3 Detekce a porovnání hmotnostních koncentrací PAHs na PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ a PM_{0,1}

Metodou plynové chromatografie se detekovalo na částicích 16 PAHs - naftalen, acenaftalen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren, benz(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, indeno(123-cd)pyren, dibenz(ah)antracen, benzo(ghi)perylene.

Slepý odběr impaktorem DLPI a cyklonem byl proveden na zkušební VEC. Impaktorem byl prosáván vzduch v délce 30 minut a cyklonem cca 1 hodinu. Jednotlivé PAHs slepého odběru byly pod mezemi detekce.

Hmotnostní koncentrace PAHs jsou uvedeny v tab. č. 35 a tab. č. 36. V tab. č. 35 jsou uvedeny hmotnostní koncentrace sumy 4 PAHs (benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, indeno(123-cd)pyren) a v tab. č. 36 sumy 10 PAHs (fluoranten, pyren, benz(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, indeno(123-cd)pyren, dibenz(ah)antracen, benzo(ghi)perylene) a sumy 16 PAHs (naftalen, acenaftalen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren, benz(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, indeno(123-cd)pyren, dibenz(ah)antracen, benzo(ghi)perylene). Výběr jednotlivých PAHs (benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, benzo(a)pyrenu a indeno(1,2,3-c,d)pyrenu) v sumě 4 PAHs byl proveden dle zákona o ochraně ovzduší [61], který požaduje provádět jednorázové měření emisí těchto znečišťujících látek pro spalovací stacionární zdroje s jmenovitým tepelným příkonem 50 MW a vyšším, spalující kapalná či tuhá paliva (viz kap. 2.3). Hodnota molekulové hmotnosti zástupců sumy 4 PAHs se pohybuje od 252 g/mol a jejich molekulovou strukturu představuje pět benzenových jader u každého zástupce. Suma 10 PAHs představuje součet jednotlivých PAHs se čtyřmi nebo pěti benzenovými jádry a hodnota molekulové hmotnosti (MH) 10 PAHs začíná od 202 g/mol. Suma 16 PAHs zahrnuje i PAHs se dvěma a třemi benzenovými jádry s hodnotou MH od 128 g/mol. [96]

tab. č. 35 Hmotnostní koncentrace 4 PAHs na PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ a PM_{0,1}

Palivo	Spalovací zkouška č.	Pjm / Psn	Teplota spalin za kotlem	Teplota spalin v ŘT	O ₂ za kotlem	Ředící poměr	Pokrytí spalovací zkoušky odběrem pomocí impaktoru DLPI	Hmot. koncentrace 4 PAHs na PM ₁₀ cyklon	Hmot. koncentrace 4 PAHs na PM ₁₀ impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 4 PAHs na PM _{2,5} cyklon	Hmot. koncentrace 4 PAHs na PM _{2,5} impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 4 PAHs na PM ₁ Impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 4 PAHs na PM _{0,1} Impaktor DLPI	EF CO
[-]	[-]	[-]	[°C]	[°C]	[vol. %]	[-]	[%]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[mg/MJ]
Automatický kotel Benekov V-Ling 25														
HU O2	1	Pjm	238	64	11,2	4,5	56,9	14	4	12	4	4	1	492
HU O2	2	Psn	133	40	15,8	5,7	72,6	130	88	115	88	84	14	968
pelety	3	Pjm	219	73	8,0	4,4	65,8	7	1	5	1	1	0	158
pelety	4	Psn	128	68	14,6	7,4	78,6	75	2	74	2	1	0	1 468
Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S														
HU O1	5	Pjm	264	74	9,2	4,0	81,7	3	1	3	1	1	0	575
HU O1	6	Psn	139	34	9,8	8,1	74,9	73	13	66	12	12	3	2 875
MIX	7	Pjm	308	102	8,1	3,6	73,2	962	1 145	903	1 113	895	60	2 751
MIX	8	Psn	143	37	11,4	8,9	60,9	296	42	279	39	32	2	4 285
Zplyňovací kotel Atmos DC25GS														
Mokrě smrkové dřevo	9	Pjm	189	59	13,1	4,3	92,9	31	6	30	3	3	1	2 900
Mokrě smrkové dřevo	10	Psn	114	38	14,8	6,3	79,1	131	28	111	18	16	4	7 802
Odhořivací kotel Dakon DOR32 s														
HU O1	11	Pjm	248	82	11,0	3,2	75,6	42	250	30	246	208	1	2 902
HU O1	12	Psn	176	34	10,3	12,9	25,2	2 153	1 968	2 136	1 967	1 902	2	13 573
MIX	13	Pjm	238	56	10,4	6,3	34,4	261	590	167	589	548	31	3 892
MIX	14	Psn	205	36	9,6	15,6	20,5	2 098	973	2 027	967	889	16	6 198
Mokrě smrkové dřevo	15	Psn	180	63	15,6	3,5	55,9	210	144	183	141	130	7	4 814
Suché smrkové dřevo	16	Pjm	208	75	14,6	3,5	31,1	79	1 315	78	1 312	1 280	981	4 561
Suché smrkové dřevo	17	Psn	161	69	11,7	14,4	35,3	866	1 787	855	1 781	582	22	7 700
Prohořivací kotel Viadrus Hercules U26														
HU O1	18	Pjm	293	94	11,7	4,0	19,3	4 592	10	4 327	6	5	4	4 697
HU O1	19	Psn	130	35	11,7	10,7	8,9	4 080	552	4 042	545	438	2	8 078
MIX	20	Pjm	336	103	10,0	3,5	14,2	45 906	40	45 751	38	23	9	4 669
MIX	21	Psn	149	38	12,6	7,9	4,4	35 414	14 274	35 395	14 262	14 176	24	7 592
Mokrě smrkové dřevo	22	Pjm	231	95	15,6	2,7	17,4	1 690	3 166	1 640	3 160	3 139	30	6 652
Mokrě smrkové dřevo	23	Psn	127	38	12,7	7,7	6,7	2 623	549	2 563	546	532	12	10 767
Suché smrkové dřevo	24	Pjm	294	101	12,5	3,4	10,4	195	334	181	332	328	10	4 164
Suché smrkové dřevo	25	Psn	133	36	10,3	12,0	5,7	1 503	2 258	1 486	2 251	2 241	18	9 445

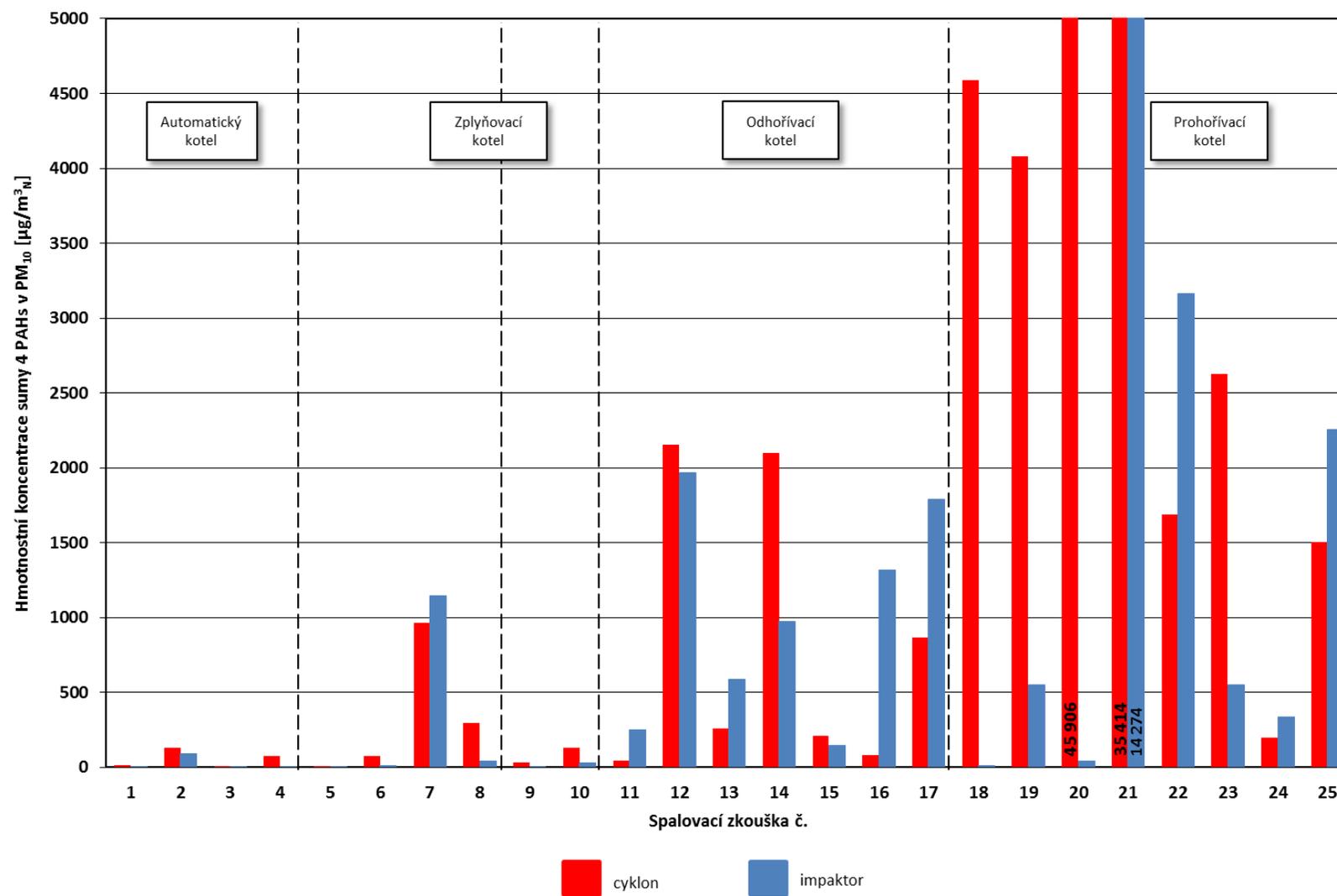
tab. č. 36 Hmotnostní koncentrace 16 a 10 PAHs na PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ a PM_{0,1}

Palivo	Spalovací zkouška č.	Pjm / Psn	Pokrytí spalovací zkoušky odběrem pomocí impaktoru DLPI	Koncentrace 16 PAHs na PM ₁₀ cyklon	Koncentrace 16 PAHs na PM ₁₀ impaktor DLPI	Koncentrace 16 PAHs na PM _{2,5} cyklon	Koncentrace 16 PAHs na PM _{2,5} impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 16 PAHs na PM ₁ impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 16 PAHs na PM _{0,1} impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 10 PAHs na PM ₁₀ cyklon	Hmot. koncentrace 10 PAHs na PM ₁₀ impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 10 PAHs na PM _{2,5} cyklon	Hmot. koncentrace 10 PAHs na PM _{2,5} impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 10 PAHs na PM ₁ impaktor DLPI	Hmot. koncentrace 10 PAHs na PM _{0,1} impaktor DLPI	EF CO
[-]	[-]	[-]	[%]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[µg/m ³ _N]	[mg/MJ]
Automatický kotel Benekov V-Ling 25																
HU O2	1	Pjm	56,9	59	25	50	25	13	3	18	14	15	12	11	2	492
HU O2	2	Psn	72,6	72	49	61	46	169	31	201	168	176	166	158	28	968
pelety	3	Pjm	65,8	10	6	10	6	2	1	9	2	7	2	2	1	158
pelety	4	Psn	78,6	13	12	12	12	11	2	79	9	77	9	8	1	1 468
Zplyňovací kotel Atmos kombi C20S																
HU O1	5	Pjm	81,7	26	6	21	6	3	2	5	2	4	2	2	1	575
HU O1	6	Psn	74,9	50	10	46	10	25	8	102	25	90	24	23	7	2 875
MIX	7	Pjm	73,2	573	51	562	50	3 969	117	2 688	4 353	2 607	4 264	3 663	113	2 751
MIX	8	Psn	60,9	96	52	88	52	59	6	553	76	533	71	56	5	4 285
Zplyňovací kotel Atmos DC25GS																
Mokrě smrkové dřevo	9	Pjm	92,9	47	22	43	21	6	3	60	15	57	8	5	2	2 900
Mokrě smrkové dřevo	10	Psn	79,1	178	53	175	53	28	7	246	44	222	30	26	6	7 802
Odhoňvací kotel Dakon DOR32 s																
HU O1	11	Pjm	75,6	31	20	31	20	400	3	110	460	77	450	373	2	2 902
HU O1	12	Psn	25,2	601	770	593	769	5 179	12	3 774	4 661	3 744	4 658	4 439	6	13 573
MIX	13	Pjm	34,4	39	104	33	103	2 226	54	543	2 084	403	2 079	1 900	52	3 892
MIX	14	Psn	20,5	757	512	752	511	2 295	36	3 718	2 230	3 543	2 212	2 014	26	6 198
Mokrě smrkové dřevo	15	Psn	55,9	202	136	191	135	285	15	439	309	376	302	266	13	4 814
Suché smrkové dřevo	16	Pjm	31,1	99	224	89	224	2 924	1 730	290	2 767	270	2 753	2 616	1 704	4 561
Suché smrkové dřevo	17	Psn	35,3	476	653	469	652	1 557	68	2 271	6 014	2 221	5 995	1 345	56	7 700
Prohoňvací kotel Viadrus Hercules U26																
HU O1	18	Pjm	19,3	743	172	720	171	24	13	8 061	29	6 180	16	12	10	4 697
HU O1	19	Psn	8,9	1 025	701	1 014	698	2 114	14	6 791	1 732	6 720	1 716	1 501	7	8 078
MIX	20	Pjm	14,2	622	268	603	267	166	39	54 878	135	54 640	128	81	32	4 669
MIX	21	Psn	4,4	2 138	1 270	1 541	1 269	28 885	72	54 560	27 801	54 536	27 755	27 436	48	7 592
Mokrě smrkové dřevo	22	Pjm	17,4	667	318	638	316	5 043	52	3 183	5 013	3 084	4 996	4 959	48	6 652
Mokrě smrkové dřevo	23	Psn	6,7	1 129	802	1 114	801	1 173	35	4 279	1 135	4 155	1 128	1 095	26	10 767
Suché smrkové dřevo	24	Pjm	10,4	148	76	121	75	1 022	43	496	886	431	875	853	21	4 164
Suché smrkové dřevo	25	Psn	5,7	652	536	641	535	5 168	56	4 083	4 946	4 045	4 906	4 888	36	9 445

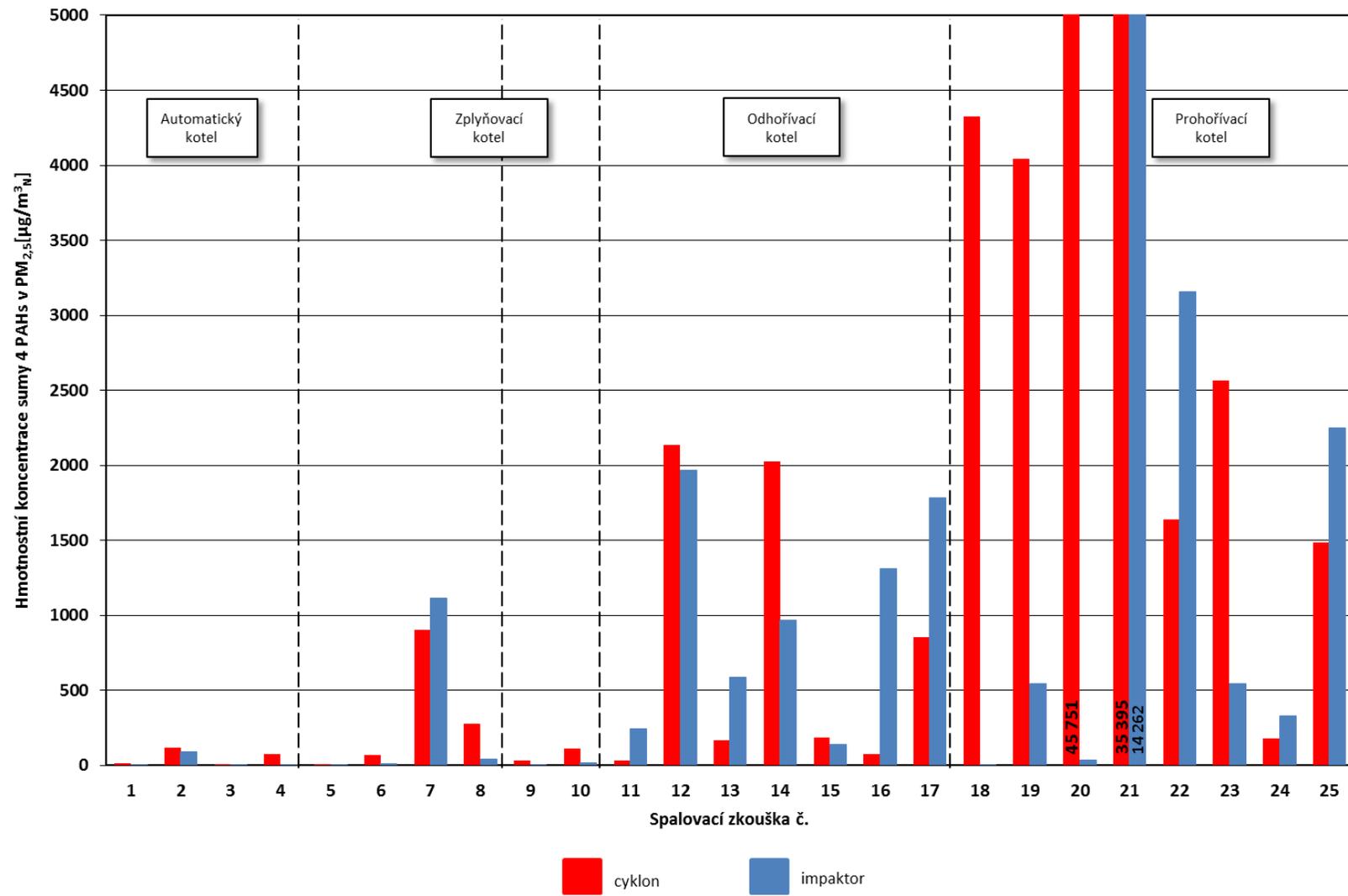
Porovnání hmotnostních koncentrací (HK) sumy 4 PAHs na PM₁₀ a PM_{2,5} graficky znázorňuje graf č. 15 a graf č. 16. Z grafů je patrné, že hodnoty HK sumy 4 PAHs jsou ze 70 % vyšší u cyklonu než u impaktoru. Menší hodnoty HK 4 PAHs na částicích odebrané pomocí impaktoru mohl způsobit vyskytující se nízkým tlak v impaktoru. Tlak za šestým patrem se rapidně snižuje až na absolutní tlak 10 kPa na posledním patře (tab. č. 37).

tab. č. 37 Tlak na jednotlivých patrech impaktoru DLPI

Patro	Tlak [kPa]
1	10,0
2	22,2
3	37,9
4	69,2
5	89,1
6	97,1
7	99,6
8	100,5
9	101,0
10	101,2
11	101,2
12	101,3
13	101,3



graf č. 15 Porovnání hmotnostních koncentrací 4 PAHs na PM_{10} , odběr cyklonem a impaktorem



graf č. 16 Porovnání hmotnostních koncentrací 4 PAHs na $PM_{2.5}$, odběr cyklonem a impaktorem

Nízký tlak mohl způsobit desorpci PAHs z částic a tím analyzovat menší hodnoty HK PAHs. PAHs s molekulovou hmotností menší než 202 g/mol se mohou vyskytovat, jak v plynné fázi, tak ve fázi kdy jsou sorbovány na částicích. Studie [97] uvádí, že nízký tlak by neměl mít velký vliv na desorpci PAHs s molekulovou hmotností od 202 g/mol s tlakem nasycených par menším než 0,001 Pa (10^{-9} atm) a záchyt těchto PAHs na částicích by měl mít 98 % účinnost. Toto tvrzení není podloženo měřením a autor příspěvku pouze doufal v tuto skutečnost. Výtěžnost PAHs na jednotlivých patrech impaktoru by se měla ověřit vhodným standardem PAHs. Standard PAHs by se naspikoval na jednotlivá patra impaktoru a poté se sestavený impaktor nechal prosát okolním vzduchem. Standardy [98] PAH MIX v methyl chloridu (katalogové číslo 10017), Fluoranthene d10 v methyl chloridu (katalogové číslo 71198) a benzo(a)pyrene d12 v methyl chloridu (katalogové číslo 71739) nejsou pro spikování aluminiových folií vhodné. Bylo provedeno spikování aluminiové folie těmito standardy. Každý PAHs byl spikován v množství 400 ng/vzorek a deuterované PAHs (fluoranthene d12, benzo(a)pyren d12) v množství 200 ng/vzorek. Směs standardů PAHs na folii se nechala zaschnout na okolním vzduchu a poté se folie analyzovala v akreditované laboratoři CNT. Výsledky analýzy a výtěžnost jednotlivých PAHs jsou uvedeny v tab. č. 38. Například karcinogenní benzo(a)pyren měl výtěžnost max. 56 %.

V současnosti se hledá standard PAHs sorbovaný na částicích, který by byl vhodný pro určení výtěžnosti PAHs z impaktoru DLPI. Standardy PAHs na částicích existují, avšak pouze jen na frakci PM₁₀ [99] a nejsou určeny pro kontroly odběrů impaktorem nebo jiným přístrojem. Zmiňovaný standard PAHs na PM₁₀ je prioritně určen ke kontrole analytických metod.

tab. č. 38 Výtěžnost standardů PAHs ve spiku na foliích bez odběru impaktorem

PAU	Aluminiová folie	Aluminiová folie	Interval procentuální výtěžnosti
	ng/vzorek	ng/vzorek	%
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	max a min hodnota ze vzorku č. 1 a 2
naftalen	224	293	95 - 39
acenaftylen	186	211	68 - 33
acenaften	226	302	98 - 39
fluoren	236	324	100 - 41
fenantren	239	326	100 - 42
antracene	248	332	100 - 43
fluoranten	226	261	85 - 40
fluoranthend12	113	132	85 - 40
pyren	225	250	81 - 39
benz(a)antracene	227	258	84 - 40
chrysen	248	333	100 - 43
benzo(b)fluoranten	188	153	61 - 27
benzo(k)fluoranten	179	175	58 - 31
benzo(a)pyren	173	158	56 - 28
benzo(a)pyrend12	74	93	60 - 26
indeno(123-cd)pyren	285	352	100 - 50
dibenz(ah)antracene	314	331	100 - 55
benzo(ghi)perylene	288	332	100 - 50
Suma	3900	4617	100 - 45

ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na problematiku měření ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení (MSZ). Jedná se o zdroje, které produkují velké množství emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) a nízká výška komínů MSZ způsobuje hromadění těchto TZL v dýchací zóně obyvatelstva. S rozvojem toxikologických znalostí o ultrajemných částicích (nanočásticích) se ubírá také pozornost na jejich možná rizika pro lidské zdraví. Částice menších velikostí mohou být rizikovější než částice větších rozměrů, protože pronikají hlouběji do dýchacího systému a bylo zjištěno [2],[57], že ultrajemné částice (částice menší než 100 nm) jsou schopny aktivně pronikat přímo do krevního řečiště. Na území Moravskoslezského kraje (MSK) je přes 55 000 kotlů, které spalují tuhá paliva. Největší hustota MSZ je v oblastech s nejhorší kvalitou ovzduší v České republice - Ostrava, Orlová a Bohumín. V topné sezóně je ovzduší v oblastech bez průmyslu podobné jako v průmyslových lokalitách (například Krnov). [6],[63] Dalším problémem v produkci velkého množství emisí z MSZ je skutečnost, že tato zařízení nemají prakticky žádné čištění spalin (filtry).

V současnosti je pro malá spalovací zařízení sledována pouze celková koncentrace prachu, bez rozlišení velikosti částic. Pro ultrajemné částice a PM_{10} emisní faktory doposud stanoveny nebyly. Chybí normované metody odběru jemných (PM_{10}) a ultrajemných částic ($PM_{0,1}$) z malých spalovacích zařízení a v České republice chybí i komplexní data o množství a procentuálním zastoupení jednotlivých velikostních frakcí částic menších než 10 μm v emisích z různých typů malých spalovacích zařízení při spalování různých druhů tuhých paliv a při různých režimech spalování. A to i přes skutečnost, že z předchozích studií [41],[65] je známo, že podstatnou část tuhých znečišťujících látek tvoří částice o velikosti PM_{10} .

Pochopení vztahu mezi množstvím emisí, jejich fyzikálně-chemickými vlastnostmi a biologickou aktivitou je nezbytné při navrhování a zavádění efektivních opatření pro snížení rizik exponovaného obyvatelstva. Cíl disertační práce byl zaměřen na identifikaci množství emisí TZL i jednotlivých velikostních frakcí částic a na stanovení početní a hmotnostní koncentrace jednotlivých velikostních frakcí částic vyskytujících se ve spalinách, které produkují MSZ. Koncentrace PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} a ultrajemných částic ($PM_{0,1}$) byly experimentálně stanoveny při spalování různých druhů tuhých paliv v různých typech malých spalovacích zařízení (prohořivací, odhořivací, zplyňovací a automatický kotel), které představují reprezentativní vzorek dnes používaných technologií. Při experimentech byl brán ohled na negativní vliv neodborné obsluhy - provoz spalovacího zařízení i při sníženém výkonu a vliv spalování nekvalitního paliva (domovní odpad). Izokinetický odběr byl proveden za pomoci ředícího tunelu dle EPA Metody 5G [76]. Pro stanovení početní koncentrace ultrajemných částic a PM_{10} byl použit skenovací třídič pohyblivosti částic (SMPS) a pro stanovení hmotnostní koncentrace jednotlivých velikostních frakcí částic byla současně použita tato odběrová zařízení - nízkotlaký kaskádový impaktor DLPI (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10} a $PM_{0,1}$) a cyklon (PM_{10} , $PM_{2,5}$). Naměřené hodnoty ME PM_{10} a $PM_{2,5}$ cyklonem byly využity pro porovnání naměřených hodnot ME PM_{10} a $PM_{2,5}$ pomocí impaktoru. V současnosti jsou na Výzkumném energetickém centru stanovány měrné emise (ME) PM_{10} a $PM_{2,5}$ jen pomocí cyklonu, pro MSZ byl impaktor DLPI použit poprvé. Z provedených experimentálních měření vychází, že u cyklonu byly v průměru hodnoty ME o 50 % větší než u impaktoru. Hodnoty ME TZL cyklonu a impaktoru byly ve většině případů ve stejných řádech.

Hodnoty procentuálního rozdělení frakce $PM_{2,5}$ k PM_{10} vychází u cyklonu menší než u impaktoru. U impaktoru je frakce $PM_{2,5}$ v PM_{10} zastoupena cca 97 %_{hm}. U cyklonu je tato frakce zastoupena pouze cca 84 %_{hm}.

Z dvaceti pěti provedených spalovacích zkoušek vyplývá, že v PM_{10} (odebráno impaktorem DLPI) jsou ultrajemné částice (UFP) zastoupeny v průměru 8 %_{hm}, a frakce PM_1 je zastoupena v průměru 90 %_{hm}. Z porovnání početní a hmotnostní koncentrace lze konstatovat, že procentuálně jsou ultrajemné částice v PM_1 zastoupeny v průměru 65 %_{poč}, a 10 %_{hm}, a u ultrajemných částic převládá početní koncentrace.

Absolutní hodnoty ME tuhých znečišťujících látek a ME jednotlivých velikostních frakcí jsou mnohem vyšší u kotlů staršího typu spalování (prohořivací a odhořivací kotle). U novějších typů spalovacích zařízení (automatické a zplyňovací kotle) je snížení ME TZL velmi výrazné. Avšak hodnoty ME $PM_{0,1}$ zůstaly v průměru stejné. Z hlediska zdravotního působení (depozice jednotlivých velikostních frakcí částic v plicích) nelze jednoznačně říci, zda novější typy spalovacích zařízení budou mít v budoucnu lepší dopad na zdraví obyvatelstva, pokud se prokáže, že škodliviny v emisích sorbované na částicích jsou z velké části obsaženy právě na frakci $PM_{0,1}$.

Přínos pro praxi

Byl kvantifikován rozdíl mezi množstvím emisí znečišťujících látek při optimálních (jmenovitý výkon kotle) a reálných podmínkách (snížený výkon kotle). Stanovené emisní faktory budou využity při aktualizaci bilance emisí z malých spalovacích zařízení. Výzkumné energetické centrum (VEC) Vysoké školy báňské vypracovalo metodiku, kterou Ministerstvo životního prostředí přijalo jako metodiku pro bilancování emisí z MSZ. VEC aktivně ve spolupráci s Českým hydrometeorologickým ústavem metodiku pravidelně aktualizuje, a jak již bylo konstatováno, stanovené emisní faktory v disertační práci budou do metodiky zapracovány. Tím se výrazně zvýší reprezentativnost a důvěryhodnost bilance emisí z MSZ a umožní kvalitnější plánování nástrojů pro snížení emisí z této kategorie zdrojů i s ohledem na jejich rizikovost pro lidské zdraví. Tento způsob plní cíl programu v oblasti životního prostředí [22], který byl definován jako získání odborných podkladů pro zdokonalení metodik, které budou určeny pro výkon státní správy a povede ke zkvalitnění rozhodovacích, hodnotících a řídicích procesů.

Přínos pro vědu a výzkum

Předkládaná práce přináší nový pohled na mobilitu ultrajemných částic, PM_1 , $PM_{2,5}$ a PM_{10} přítomných v emisích z malých spalovacích zařízení. V České republice se jedná o pilotní studii, ve které byla vytvořena databáze hmotnostních a početních koncentrací jednotlivých velikostních frakcí částic, která charakterizuje jednotlivé typy malých spalovacích zařízení s ohledem na použité palivo a režim spalování. Byla vyvinuta vhodná a v praxi využitelná metoda odběru jednotlivých velikostních frakcí částic pro stanovení, jak hmotnostní, tak početní koncentrace částic ($PM_{0,1}$ - PM_{10}). V budoucnu mohou být výsledky disertační práce využity pro porovnávání emisí produkovaných spalováním paliv, které byly využity v disertační práci a nových syntetických nanomateriálů nebo nanoaditiv přidávaných k palivům, které se v současnosti používají ve velkém měřítku. Po určité době používání se ze syntetických nanomateriálů stane odpad a naskytne se možnost je spalovat v MSZ. Tím by se mohl zvýšit procentuální výskyt ultrajemných částic v emisích a jejich možné negativní působení na člověka a ŽP.

CONCLUSION

This dissertation thesis was focused on measuring ultrafine particles from small combustion equipments (SCE). These resources produce large quantities of total suspended particles (TSP), the low height of the chimneys of SCE causes accumulation of the TSP in the breathing zone of the population. With the development of toxicological knowledge about the ultrafine particles (nanoparticles), the attention of their potential risks to human health is falling. Particles of smaller size may be more dangerous than larger particle sizes, as they penetrate deeper into the respiratory system. It was found [2],[57], that the ultrafine particles (particles smaller than 100 nm) are able to actively penetrate directly into the bloodstream. The Moravian-Silesian Region (MSR) has over 55,000 boilers burning solid fuel. SCE is of the highest number in areas with the worst air quality in the Czech Republic - Ostrava, Orlova, and Bohumin. In the heating season, the atmosphere in areas without industry is similar to those in industrial sites (e.g. Krnov). [6],[63] Another problem in the production of large amounts of emissions from SCE is the fact, that these devices without filters.

Currently, for small combustion equipments, only the TSP is monitored, regardless the size of the particles. For ultrafine particles and PM_{10} , emission factors have not yet been determined. In the worldwide standardized methods of collecting fine (PM_{10}) and ultrafine particles ($PM_{0.1}$) are missing. In the Czech Republic are missing also the data on the number and percentage of different size fractions of particles smaller than 10 microns in emissions from different types of small combustion equipment when burning different kinds of solid fuels, and in various combustion modes. This is despite the fact that it is known from previous studies [40], [65] that a substantial portion of particulate matter consists of particles of size PM_{10} .

Understanding the relationship between the amount of emissions, their physicochemical properties, and biological activity is essential when designing and implementing effective measures to reduce the risk of exposure to the population. The aim of the thesis was focused on identifying the amount of TSP emissions on the individual particle size of fractions, as well as the determination of numerical and mass concentration of individual particle sizes of particles present in flue gases produced by SCE. Concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10} , and ultrafine particles ($PM_{0.1}$) have been experimentally determined by the combustion of various types of solid fuels in different types of small combustion equipment (over-fire, down-draught, gasification, and automatic boilers), which provides a representative sample of the technologies used today. In experiments, we took into account the negative impact of improper operation - operation of the incinerator, reduced power, and the influence of nonquality fuel on combustion (household waste). Isokinetic sampling was carried out using a dilution tunnel, according to EPA Method 5G [76]. To determine the number concentration of ultrafine particles and PM_{10} , a Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) was used, and to determine the mass concentration of individual particle size fractions these samplers were used together - a low pressure cascade impactor DLPI (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10} and $PM_{0.1}$), cyclone (PM_{10} , $PM_{2.5}$). Measured values of specific emissions (SE) PM_{10} and $PM_{2.5}$ cyclone were used to compare the measured values of SE PM_{10} and $PM_{2.5}$ using the impactor. At present, the Energy Research Center sets SE PM_{10} , and $PM_{2.5}$ using a cyclone, the SCE impactor DLPI was used for the first time. The performed experimental measurements showed that in the cyclone were averages of SE 50% greater than that of the impactor. SE TSP values of the cyclone and impactor were in most cases of the same order. Values of the percentage distribution of $PM_{2.5}$ to PM_{10} in the cyclone are less than

in the impactor. At the impactor, $PM_{2.5}$ in PM_{10} is represented with 97%_{wt.}. In the cyclone, this fraction is represented with 84 %_{wt.}

From the twenty five combustion tests performed, we can conclude that in PM_{10} (collected from impactor DLPI). The ultrafine particles (UFP) are represented by an average of 8%_{wt.}, PM_1 fraction is represented by an average of 90%_{wt.}. From a comparison of the amount and mass concentration, it indicates that the percentage of ultrafine particles from PM_1 is represented with by 65%_{num.} and 10%_{wt.}. It follows that for ultrafine particles, number concentrations prevail.

Absolute values of SE TSP and SE of individual particle sizes are much higher among older types of combustion equipments (burners and incinerators). With the newer types of combustion equipments (automatic and gasification burners) the reduction of SE TSP is very significant. However, the ME value of $PM_{0.1}$ average remained the same. In terms of health effects (deposition of various size fractions of particles in the lungs), we cannot unequivocally say whether newer types of combustion equipment will in the future have a better impact on public health if it is proven that the emissions of pollutants sorbed on particles are largely contained to just fraction $PM_{0.1}$.

Practical benefits

There was a quantified difference between the amounts of pollutant emissions with optimal (nominal output) and real terms (reduced output). The required emission factors will be used for updating the balance of emissions from small combustion equipment. The Energy Research Center of VŠB (ERC) developed methodology with the Ministry of the Environment has adopted as a methodology for balancing emissions from SCE. ERC actively cooperating with the Czech Hydrometeorological Institute methodology on regular update of this methodology and emission factors set out in this dissertation thesis will be incorporated into this methodology. This will increase the representativeness and credibility of the emission of SCE, and allow better planning tools for reducing emissions from this category of sources with respect to their risk to human health. This method meets the objective of the programme on the environment [22], which was defined as the acquisition of professional materials for the improvement of methodologies, designed for the state administration, and will enhance the quality of decision-making, evaluation, and management processes.

Benefits for science and research

The presented dissertation thesis provides new insight into the mobility of ultrafine particles, PM_1 , $PM_{2.5}$, and PM_{10} from small combustion equipments. In the Czech Republic, this is a pilot study, where the database was created for the mass and number concentration of individual particle size fractions, which describes the various types of small combustion equipment with respect to the used fuel and combustion mode. A suitable and practical usable sampling method of individual particle size fractions was developed to determine both the mass and number concentration of particles ($PM_{0.1}$ - PM_{10}). In the future, the results from the dissertation thesis can be utilised for comparison of emissions produced by burning fuels with new synthetic nanomaterials or nanoadditives, currently with are used on a large scale. When of synthetic nanomaterials, became a waste, possibly they will open up the possibility of being burned in SCE. This could increase the percentage incidence of ultrafine particles in emissions, and their possible negative effects on humans and on the Environment.

SOUPIS BIBLIOGRAFICKÝCH CITACÍ

- [1] HOLOUBEK, Ivan, et al. Troposférická chemie. Irena Holoubková. 2005. vyd. Brno-Krávı Hora: Vydavatelství MU, 2005. 159 s. ISBN 80-210-3656-7.
- [2] BUZEA, C., PACHECO-BLANDINO, I., ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases* Vol. 2 [online], 2007, č. 4, s. MR17-MR71. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z [www: http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0801/0801.3280.pdf](http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0801/0801.3280.pdf)
- [3] WHO. Ambient (outdoor) air quality and health, Fact sheet N°313. In: World Health Organization [online]. 2014 [cit. 2015-03-07]. Updated March 2014. Accessible from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- [4] WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. Geneva, 2006.
- [5] EEA. Particulate Matter (PM2.5): annual mean concentrations in Europe. European Environment Agency [online]. 2014 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://www.eea.europa.eu/themes/air/interactive/pm2_5
- [6] ČHMU. [online]. 2014 [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: http://chmu.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3_0_Informace_p_o_Vas/P3_17_Vyuka_a_prezentace&last=false
- [7] WHO. Health risks of air pollution in Europe - HRAPIE project (Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide), WHO Regional Office for Europe 2013.
- [8] WHO: Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP, Technical Report, WHO. 2013
- [9] KIM, K. H., JAHAN, S. A., KABIR, E., BROWN, R. J. C. (2013): A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*. 2013, vol. 60, s. 71-80.
- [10] ATSDR. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons. In: U.S. Department of health and human services: Agency for Toxic Substances and Disease Registry [online]. Atlanta, Georgia, August 1995 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp69.pdf>
- [11] CAMBELL, P., FEHRINGER, G., HALAPY, E., SLOAN, P., THEIS, B., KREIGER, N., 2005. Insight on cancer environmental exposures and cancer, *Environmental Exposures and Cancer*, vol. 4, Toronto, Canadian Cancer Society (Ontario Division).
- [12] POPE, C. A. Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation* [online]. 2003-12-15, vol. 109, issue 1, s. 71-77 [cit. 2014-05-26].
- [13] LI, N., XIA, T., NEL, A. E. The role of oxidative stress in ambient particulate matter-induced lung diseases and its implications in the toxicity of engineered nanoparticles. *Free Radic Biol Med*. 2008, roč. 44, s. 1689-1699.

- [14] OBERDORSTER, G., OBERDORSTER, E., OBERDORSTER, J. Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives*. 2005, vol. 113, issue 7, s. 823-839.
- [15] ICRP. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. A Report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection. International Commission on Radiological Protection (1994). Oxford: Pergamon, ICRP Publication 66
- [16] DONALDSON, K.; TRAN, L.; JIMENEZ, L. A.; DUFFIN, R.; NEWBY, D. E.; MILLS, N.; MACNEE, W.; STONE, V. Combustion-derived nanoparticles: a review of their toxicology following inhalation exposure part. *Particle and Fibre Toxicology*, 2005, Vol. 2, č. 10.
- [17] TNI ISO/TR 12885. Nanotechnologie - Zdravotní a bezpečnostní směrnice relevantní pro pracovní prostředí nanotechnologií. 2011. Praha: ÚNMZ.
- [18] KLOUDA, K., KUBÁTOVÁ, H. Vyráběné nanomateriály: Analýza rizik jejich přípravy, dopadu na zdraví a životní prostředí. *BOZP info* [online]. 2009, č. 3 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://www.bozpinfo.cz/win/josra/josra-03-2009/klouda_kubatova-nano.html
- [19] TNI ISO/TR 12885. Nanotechnologie: Zdravotní a bezpečnostní směrnice a relevantní pro pracovní prostředí nanotechnologií. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [20] ŠEVČÍK, J., BENEŠ, I., LENÍČEK, J., ŠUBRT, P., SKORKOVSKÝ, TUNA, J. Tuna jako tuna - úvaha o hodnocení emisí tuhých částic. *Ochrana ovzduší*. 2009, roč. 21, č. 2, s. 29-30.
- [21] DOKUMENTY VLÁDY 2010. Vláda České republiky [online]. [cit. 2012-12-19]. Dostupné z: http://kormoran.vlada.cz/usneseni/usneseni_webtest.nsf/web/cs?Open&2010&04-09
- [22] PROGRAM BETA. Program veřejných zakázek ve výzkumu, experimentálním vývoji a inovacích pro potřeby státní správy: „BETA“. In: Technologická agentura České republiky. 2012.
- [23] IUPAC Compendium of Chemical Terminology (Gold Book) [online]. Verze 2.3.3, 24.2.2014 [cit. 2014-12-29]. Dostupný na WWW: <<http://goldbook.iupac.org/PDF/goldbook.pdf>>.
- [24] BARTLOVÁ, I., BALOG, K. Analýza nebezpečí a prevence průmyslových havárií. *SPBI Spektrum*, Ostrava 2007, 2. vydání, 191 s., ISBN 978- 80-7385-005-0
- [25] ISO Guide 73:2009, Risk management — Vocabulary.
- [26] ORAVEC, Milan. Teoretické základy bezpečnosti - základné pojmy. Zlín: 2012. 20s.
- [27] BLÁHA, K. Hodnocení rizik chemických látek. *Chemické listy* [online]. Praha: Česká společnost chemická, 1997, č. 97 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_10_824-827.pdf
- [28] U.S. EPA: The Risk Assessment Guidelines, EF'A/600/8-87/045. Washington D.C. 1987

- [29] ZÁKON č. 258/200 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů, Česká republika
- [30] WILLIAMS, R. A., KULINOWSKI, K. M., WHITE, R., LOUIS, G. Risk Characterization for Nanotechnology Risk Analysis. Society for Risk Analysis [on line]. 2010, Vol. 30, č. 11 [cit. 2011-06-05]. Dostupný z [www: http://mercatus.org/sites/default/files/publication/Risk%20Characterization%20for%20Nanotechnology.pdf](http://mercatus.org/sites/default/files/publication/Risk%20Characterization%20for%20Nanotechnology.pdf)
- [31] CORNELISSEN, R., JONGENEELLEN, F., BROEKHUIZEN, P. Handleiding veilig werken met nanomaterialen en-producten [online]. Zurich : Ministerie van Sociale zaken en Werkgelegenheid 2010. [cit. 2014-01-18]. Dostupné z http://www.fnv.nl/site/nieuws/webassistent/h.hubregtse/wereldprimeur_handleiding_nanodeeltjes/handleiding_omgaan_met_nanodeeltjes.pdf
- [32] BRAUER M. et al. Air pollution from traffic and the development of respiratory infections and asthmatic and allergic symptoms in children. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2002, 166:1092-1098
- [33] ČHMU. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2013. In: Český hydrometeorologický ústav [online]. 2014 [cit. 2015-03-07]. Accessible from: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Obsah_CZ.html
- [34] FARA, M. Toxikologicky závažné látky v emisích PM10, [online]. Praha, [cit. 2012.12.19]. Projekt. ČHMU. 2003 Dostupné z: http://old.chmi.cz/uoco/prj/vav_740_3_02/dp1dod.pdf
- [35] ATDSR. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons. U.S. department of Health and Human Services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1995.
- [36] IARC. Agents Classified by the IARC Monographs - Lists of classifications sorted by Group [on-line databáze]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, last updated 2015-02-15 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z WWW: <<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsGroupOrder.pdf>>
- [37] FARA, M. Toxikologicky závažné látky v emisích PM10, [online]. Praha, [cit. 2012.12.19]. Projekt. ČHMU. 2003 Dostupné z: http://old.chmi.cz/uoco/prj/vav_740_3_02/dp1dod.pdf
- [38] U.S. EPA. Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, Oct 2004). US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 600/P-99/002aF-bF, 2004.
- [39] LESKINEN, J., J. TISSARI, O. USKI, A. VIRÉN, T. TORVELA, T. KAIIVOSOJA, H. LAMBERG, I. NUUTINEN, T. KETTUNEN, J. JOUTSENSAARI, P.I. JALAVA, O. SIPPULA, M.-R. HIRVONEN a J. JOKINIEMI. Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance - Particulate physico-chemical properties and induced cell death. Atmospheric Environment. 2014, vol. 86, s. 129-139.
- [40] KAIIVOSOJA, T., P.I. JALAVA, H. LAMBERG, A. VIRÉN, M. TAPANAINEN, T. TORVELA, U. TAPPER, O. SIPPULA, J. TISSARI, R. HILLAMO, M.-R. HIRVONEN a J. JOKINIEMI. Comparison of emissions and toxicological properties

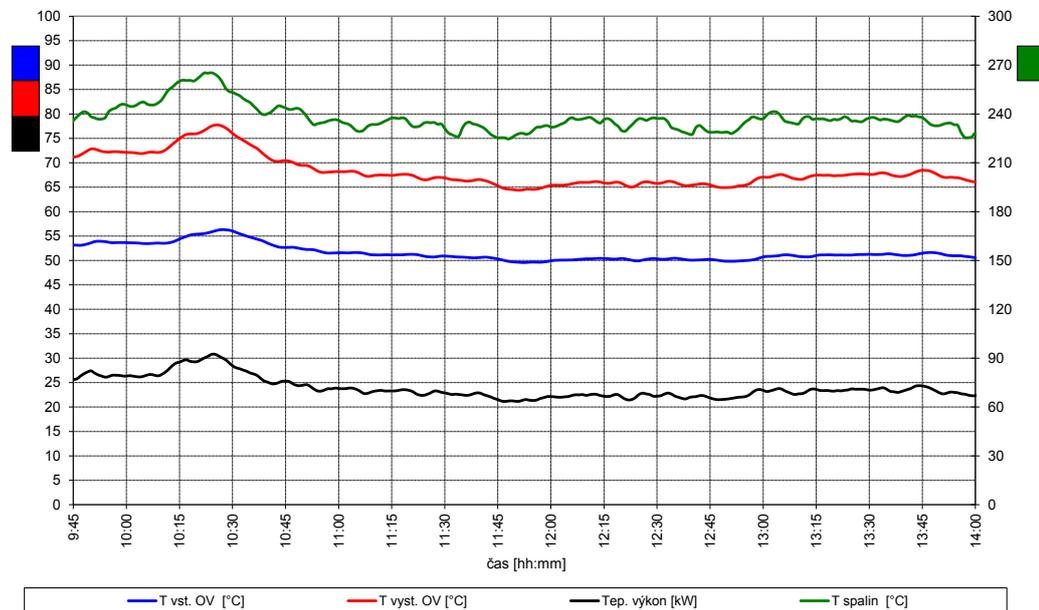
- of fine particles from wood and oil boilers in small (20–25 kW) and medium (5–10 MW) scale. *Atmospheric Environment*. 2013, vol. 77, s. 193-201. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.014
- [41] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK J., JANKOVSKÁ, Z., KRPEC, K., KUBESA, P., HOPAN, F., KALIČÁKOVÁ, Z. Spalování odpadní biomasy v malých zařízeních. *Chemické listy*, 2014, roč. 108, č. 2/2014, s. 156-162.
- [42] SIPPULA, O. Fine particle formation and emission in biomass combustion. Ph D thesis. Department of Environmental Science. University of Eastern Finland. Finland. 2010. ISBN 978-952-5822-14-4.
- [43] OBERNBERGER, I., BRUNNER, T., BARNTHALER, G. Fine particle emissions from Modern Austrian small scale biomass combustion plants. 15th European biomass conference and exhibition. 7-11 May 2007, Germany:1546-57.
- [44] WHO. Air Quality Guidelines for Europe. 2th edition. WHO Regional Office for Europe, WHO Regional Publications, European Series, No. 91, 2000.
- [45] TISSARI, J., HYTONEN, K., LYYRANEN, J., JOKINIEMI, J. A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. *Atmospheric Environment*. 2007, vol. 41, issue 37, s. 8330-8344.
- [46] TISSARI, Jarkko, Olli SIPPULA, Jyrki KOUKI, Kari VUORIO, Jorma JOKINIEMI, John D. MCKENNA, James H. TURNER a James P. MCKENNA. Fine Particle and Gas Emissions from the Combustion of Agricultural Fuels Fired in a 20 kW Burner. *Energy*. 2008, vol. 22, issue 3, s. 185-210.
- [47] SIPPULA, Olli, Jouni HOKKINEN, Harri PUUSTINEN, Pasi YLI-PIRILÄ a Jorma JOKINIEMI. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers. *Atmospheric Environment*. 2009, vol. 43, issue 32, s. 4855-4864.
- [48] OBAIDULLAH, M et al. A Review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion. *International journal of renewable energy research*. 2012, roč. 2, č. 1.
- [49] BOMAN, CH., NORDIN, A., BOSTRÖM, D., ÖHMAN, M. Characterization of Inorganic Particulate Matter from Residential Combustion of Pelletized Biomass Fuels. *Energy*. 2004, vol. 18, issue 2, s. 338-348.
- [50] IRZ. Informace o látkách ohlašovaných do IRZ, [cit. 2015-01-12] Dostupné z <http://irz.cz/obsah/ohlasovane-latky>
- [51] ČSN EN 481 (833621). Ovězení na pracovišti. Vymezení velikostních frakcí pro měření poletavého prachu. Praha, Český normalizační institut, 1994.
- [52] ČSN ISO 7708. Kvalita ovzduší - Definice velikostních částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik, 1/1998.
- [53] CMA. Hygroscopic particles Lung Deposition Model. Helmholtz Zentrum München [online]. 2012, 3.8 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.helmholtz-muenchen.de/ioec/lung-deposition/hpldb06_d/index3d.php
- [54] OBERDORSTER, G. Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies. *Phil. Trans. R. Soc Lond A*. 2000, roč. 58, č. 2719–2740.
- [55] PUTAUD, J.-P., RAES, F., VAN DINGEREN, R. et al. A European aerosol phenomenology - 2: 10 chemical characteristics of particulate matter at kerbside,

- urban, rural and background sites in Europe. *Atmos. Env.* 2004, roč. 38, s. 2579–2595.
- [56] PAKOW, J. F. An absorption model of gas/particle partitioning of organic compounds in the atmosphere. *Atmos Environ.* 1994, roč. 28, s. 185–188.
- [57] SKŘEHOT, P., RUPOVÁ M. Nanobezpečnost. Vyd. 1. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2011, 238 s. ISBN 978-80-86973-89-0.
- [58] HOET, P. H. M., BRUSKE-HOHLFELD, I., SALATA, O. V. Nanoparticles - known and unknown health risks. *Journal of Nanobiotechnology*, 2004, Vol. 2, č. 1, s. 12-27.
- [59] OBERDÖRSTER, G. et al. Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles. *Inhalation Toxicology*, 1995, Vol. 7, č. 1, s. 111-124
- [60] OBERDÖRSTER, G., FERIN, J., LEHNERT, B. E. Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. *Environmental Health Perspectives*, 1994, Vol. 102, Suppl. 5, s. 173-179.
- [61] ZÁKON č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů.
- [62] KRPEC, Kamil a kol. Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. 2012 In: TZB info [online]. [cit. 2012-12-19]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/ochrana-ovzdusi/8200-mereni-emisi-znecistujicichlatek-z-kotlu-malych-vykonu>.
- [63] PROČ ŘEŠIT KOTLE. 2015. Lokální topeniště [online]. [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: <http://lokalni-topeniste.kr-moravskoslezsky.cz/proc-resit-kotle>
- [64] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., KUBESA, P., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V. Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě, Tzb-info [online]. 2013 [cit. 2014-08-23]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [65] SHEN, G., WEI, S., ZHANG, Y., WANG, B., WANG, R., SHEN, H., LI, W., HUANG, Y., CHEN, Y., CHEN, H., TAO, S., SHEN, G., SHEN, G. Emission and size distribution of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from residential wood combustion in rural China. *Biomass and Bioenergy*. 2013, vol. 55, s. 85-137. DOI: 10.1007/978-3-642-39762-2.
- [66] ISO 9096:2003. Stationary source emissions - Manual determination of mass concentration of particulate matter.
- [67] EN 13284-1:2002. Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method.
- [68] ČSN EN ISO 23210:2010. Stationary source emissions - Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas - Measurement at low concentrations by use of impactors
- [69] ISO 12141:2002 Stationary source emissions - Determination of mass concentration of particulate matter (dust) at low concentrations - Manual gravimetric method
- [70] VDI 2066 Blatt 1:2006-11. Particulate matter measurement - Dust measurement in flowing gases - Gravimetric determination of dust load.

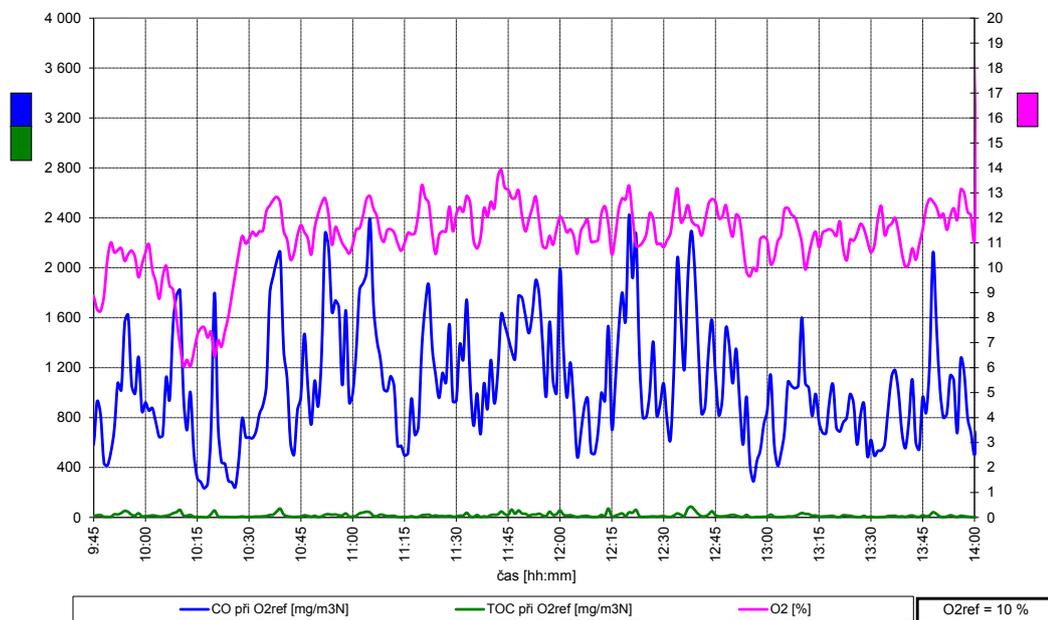
- [71] CTM-039. Conditional test method (CTM) 039 Measurement of PM 2.5 and PM 10 emissions by dilution sampling (Constant Sampling Rate Procedures). USA: EPA, 2004.
- [72] ČSN EN 1948-1. Stationary source emissions - Determination of mass concentration of PCDD/PCDFs and dioxin-like PCBs, Part 1: Sampling of PCDD/PCDFs. CZE: EU, 2006.
- [73] ISO 11338-1. Stationary source emissions — Determination of gas and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons: Part 1: Sampling. EU, 2003.
- [74] METHOD 429. Determination of Polycyclic Aromatic. California Environmental Protection Agency: ARB, 1997. Dostupné z: http://www.arb.ca.gov/testmeth/vol3/m_429.pdf
- [75] KUBESA, P., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., MARTINÍK, L. Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení. TZB-info, 2013, č. 1, s. 1-8. ISSN 1801-4399
- [76] U.S. EPA Method 5G. Determination of particulate matter emissions from wood heaters (dilution tunnel sampling location).
- [77] SHEN, G., WANG, W., YANG, Y., DING, J. et al. Emissions of PAHs from Indoor Crop Residue Burning in a Typical Rural Stove: Emission Factors, Size Distributions, and Gas-Particle Partitioning. Environmental Science. 2011, vol. 45, issue 4, s. 1206-1212.
- [78] SHEN, G., Wei WANG, YANG, Y., ZHU, CH. et al. Emission factors and particulate matter size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustions in rural Northern China. Atmospheric Environment. 2010, vol. 44, issue 39, s. 1-10..
- [79] IRZ. Metody měření znečišťujících látek v únicích do ovzduší: Stanovení polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH). In: Integrovaný registr znečišťování [online]. 2013 [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: <http://www.irz.cz/node/178>
- [80] BENEKOV [online]. 2015 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: www.benekov.cz
- [81] ATMOS [online]. 2015 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: www.atmos.eu
- [82] DAKON [online]. 2015 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: www.dakon.cz
- [83] VIADRUS [online]. 2015 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: www.viadrus.cz
- [84] KADLEC, Z. Termomechanika. Ostrava, 2001. Skripta. VŠB - TU Ostrava.
- [85] NOSKIEVIČ, P. Spalování uhlí. 2. vydání. Ostrava. VŠB - TU Ostrava, 2002. 68 s.
- [86] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. Základy sdílení tepla. Ostrava. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000. 110 s.
- [87] ČSN 07 0302. Přejímací zkoušky parních kotlů. Praha: Český normalizační institut, 1996. 56 s.
- [88] IBLER, Z. Technický průvodce energetika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, s. 163. ISBN 80-7300-026-1.

- [89] DEKATI. Uživatelský manuál: DLPI user manual ver. 3.62, Finland, 2010.
- [90] TSI. Electrostatic Classifiers: Series 3080. Revision K. USA, 2011.
- [91] TSI. Condensation Particle Counter: Model 3775. Revision G. USA, 2010
- [92] HOPAN, F., HORÁK, J. Výpočet emisních faktorů znečišťujících látek pro léta 2001 až 2012 a tři varianty pro rok 2022 na základě experimentálních a statistických dat ČHMÚ, 2014 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/VypocetEF.pdf>.
- [93] MEYER, N.K. Particulate, black carbon and organic emissions from small-scale residential wood combustion appliances in Switzerland. *Biomass and Bioenergy*. 2012, č. 36, s. 31-42.
- [94] USKI, O., P.I. JALAVA, M.S. HAPPO, J. LESKINEN, O. SIPPULA, J. TISSARI, J. MÄKI-PAKKANEN, J. JOKINIEMI a M.-R. HIRVONEN. Different toxic mechanisms are activated by emission PM depending on combustion efficiency. *Atmospheric Environment*. 2014, č. 89, s. 623-632.
- [95] TSI. Data Merge Software Module: Model 390069. Revision D. USA, 2011.
- [96] HOLOUBEK, Ivan. Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs) v prostředí. 1. vyd. Praha: Český ekologický ústav. ISBN 80-850-8744-8.
- [97] VENKATARAMAN, Ch. et al. Size Distributions of PAHs and Elemental Carbon. 1. Sampling, Measurement Methods, and Source Characterization. *Environ. Sci. Technol.* 1994, vol. 28, č. 4.
- [98] ABSOLUTE STANDARDS, Inc. Absolute standards [online]. 2015 [cit. 2015-04-22]. ISBN 800-368-1131. Dostupné z: <http://absolutestandards.com/>.
- [99] SIGMA ALDRICH. Fine dust (PM10-like) (PAH's). [online]. 2015 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.sigmaldrich.com/catalog/product/fluka/ermcz100?lang=en®ion=CZ>

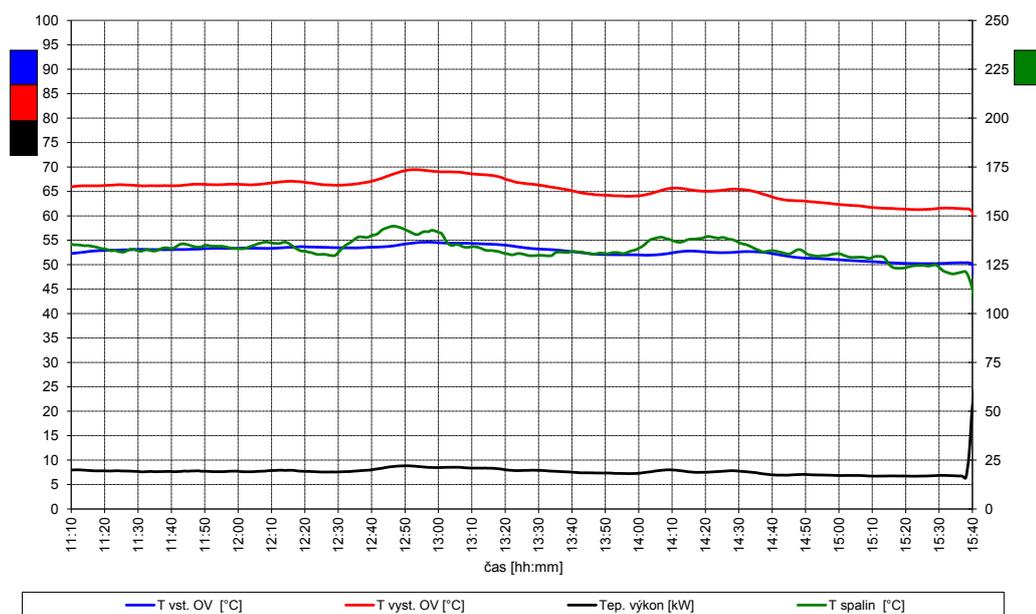
PŘÍLOHA A PRŮBĚHY HLAVNÍCH SLEDOVANÝCH PARAMETRŮ KOTLŮ



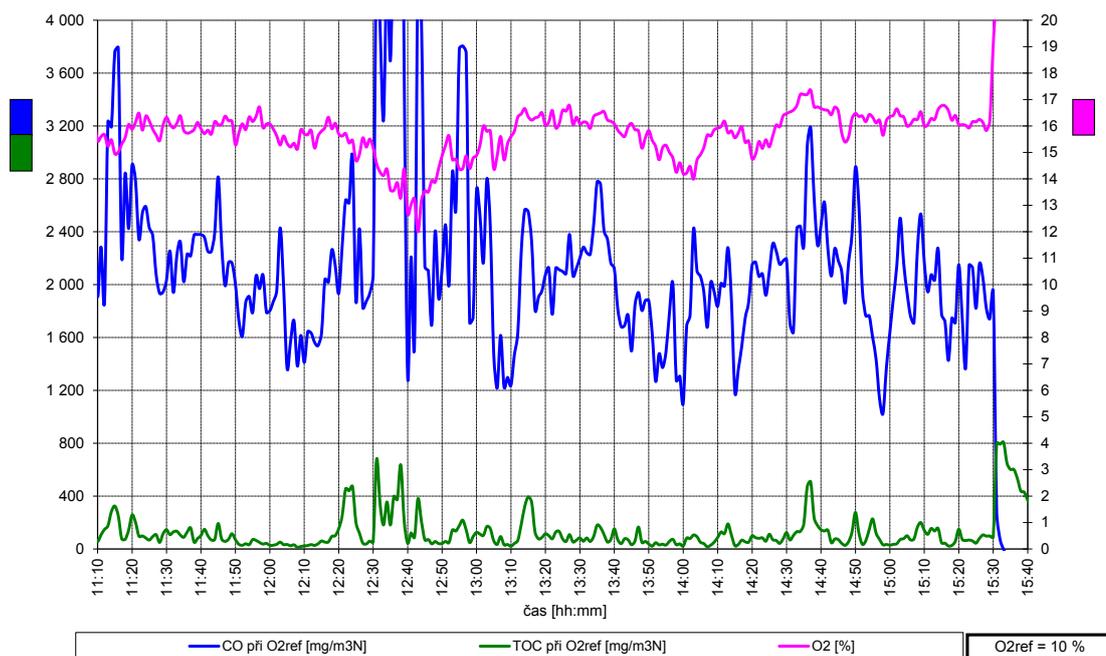
A graf č. 1 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Benekov V-Ling 25, HU, jmenovitý výkon



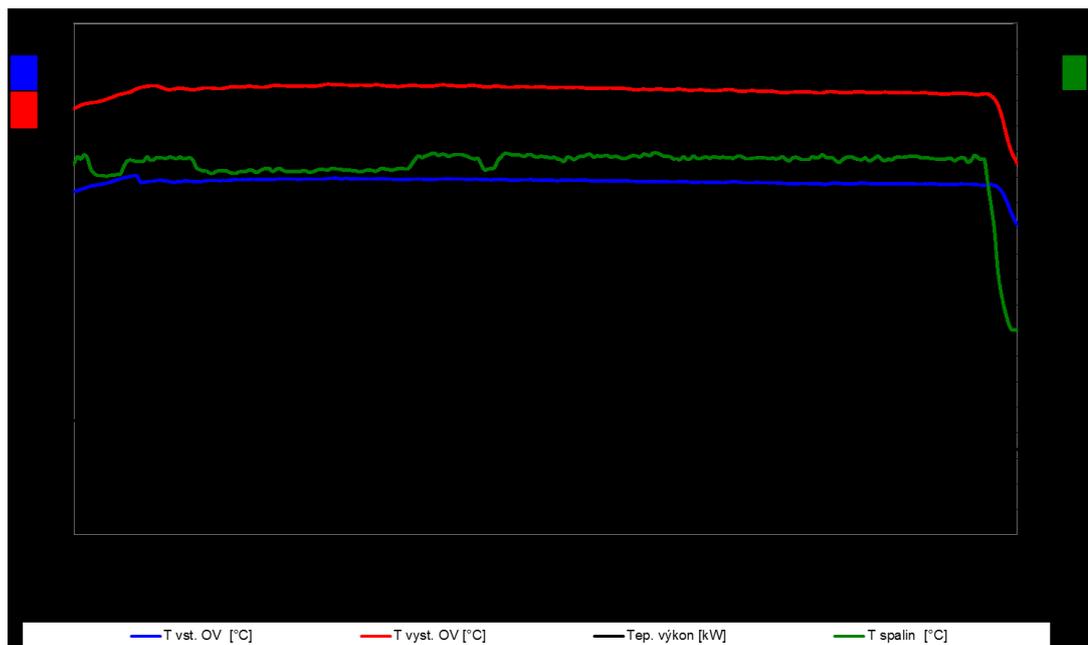
A graf č. 2 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Benekov V-Ling 25, HU, jmenovitý výkon



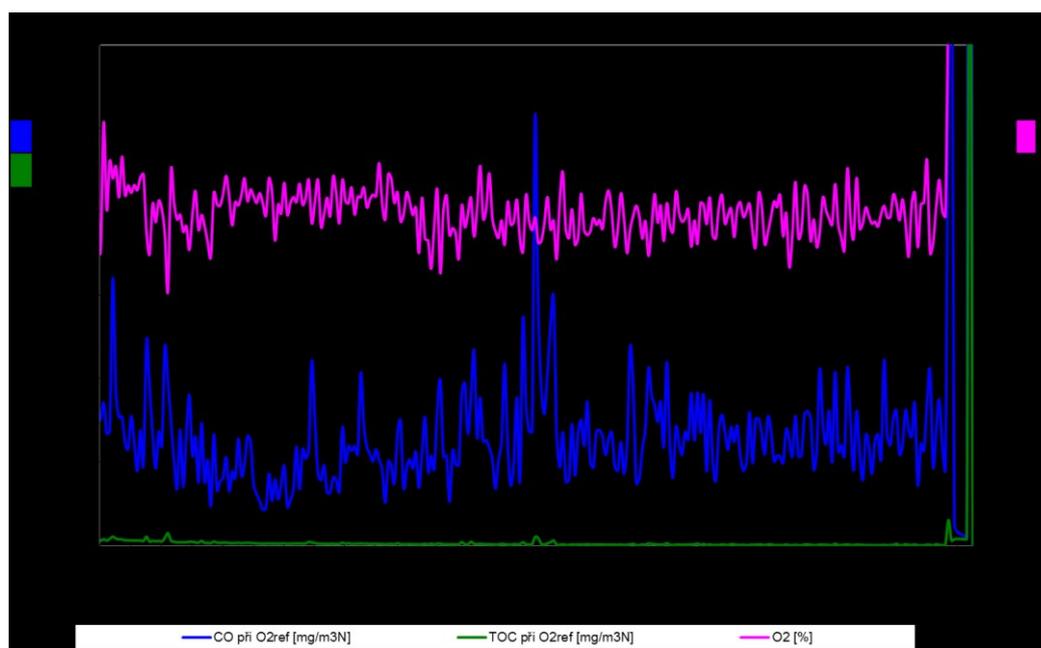
A graf č. 3 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Benekov V-Ling 25, HU, snížený výkon



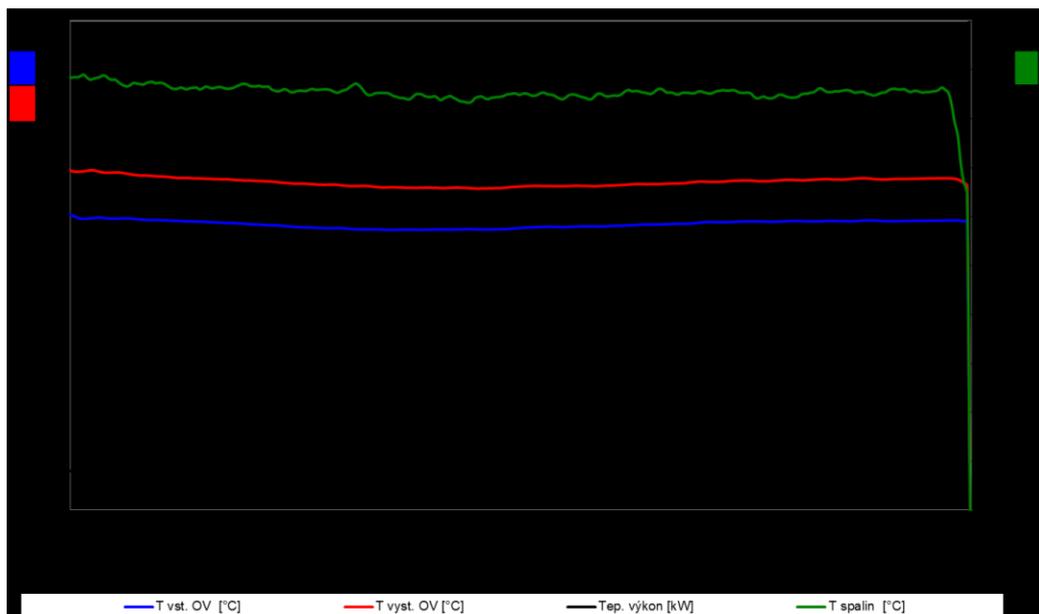
A graf č. 4 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Benekov V-Ling 25, HU, snížený výkon



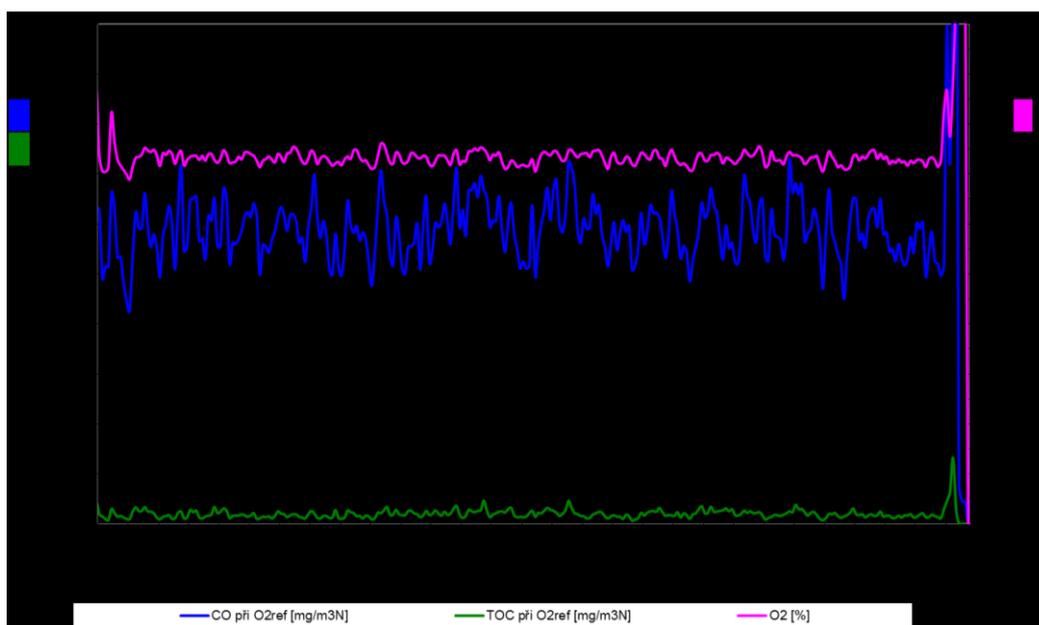
A graf č. 5 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Benekov V-Ling 25, dřevěné pelety, jmenovitý výkon



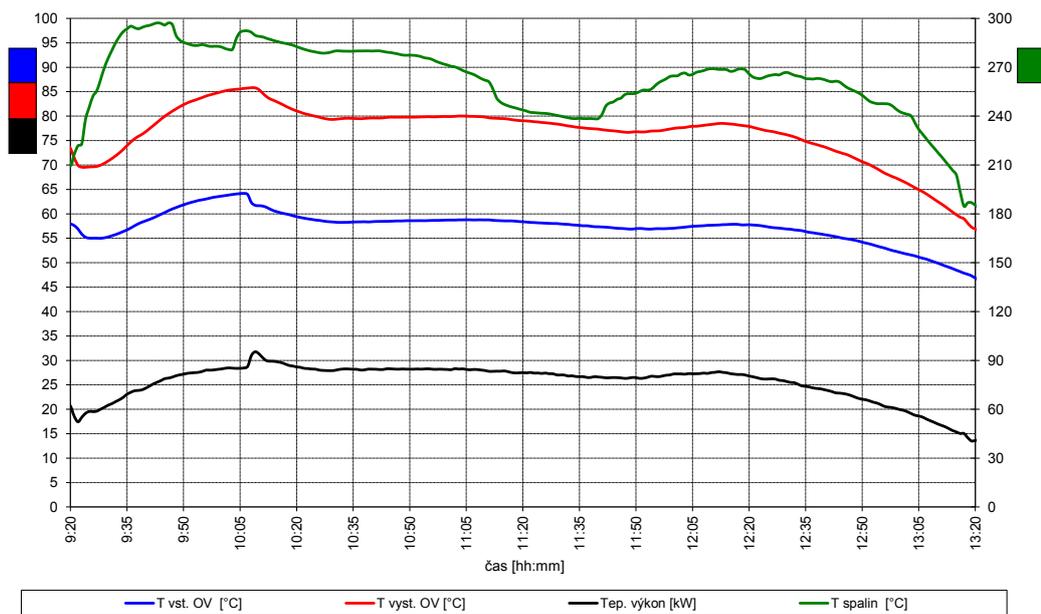
A graf č. 6 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Benekov V-Ling 25, dřevěné pelety, jmenovitý výkon



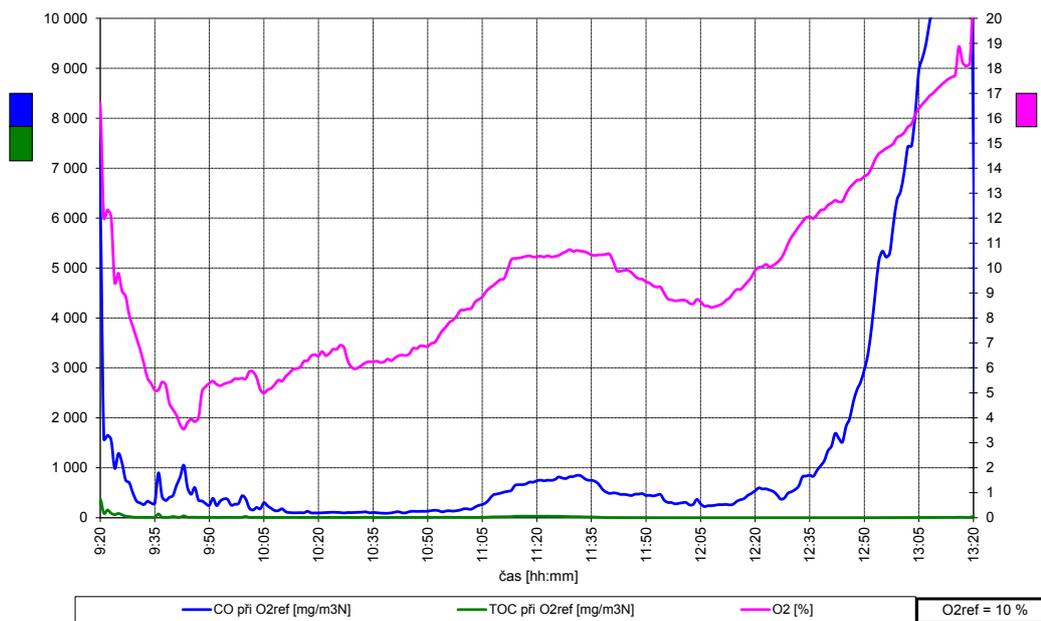
A graf č. 7 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Benekov V-Ling 25, dřevěné pelety, snížený výkon



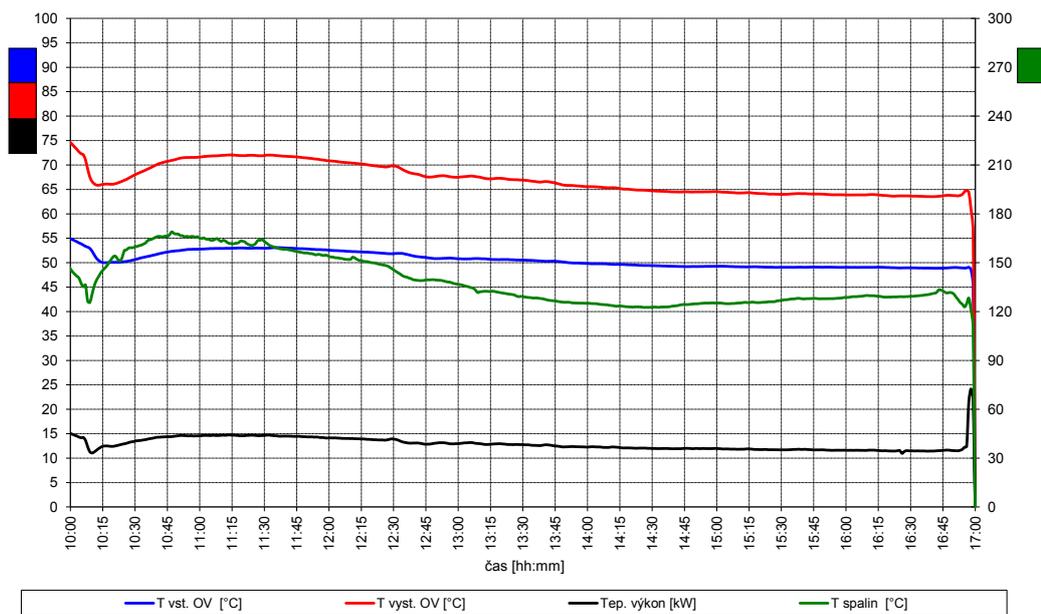
A graf č. 8 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Benekov V-Ling 25, dřevěné pelety, snížený výkon



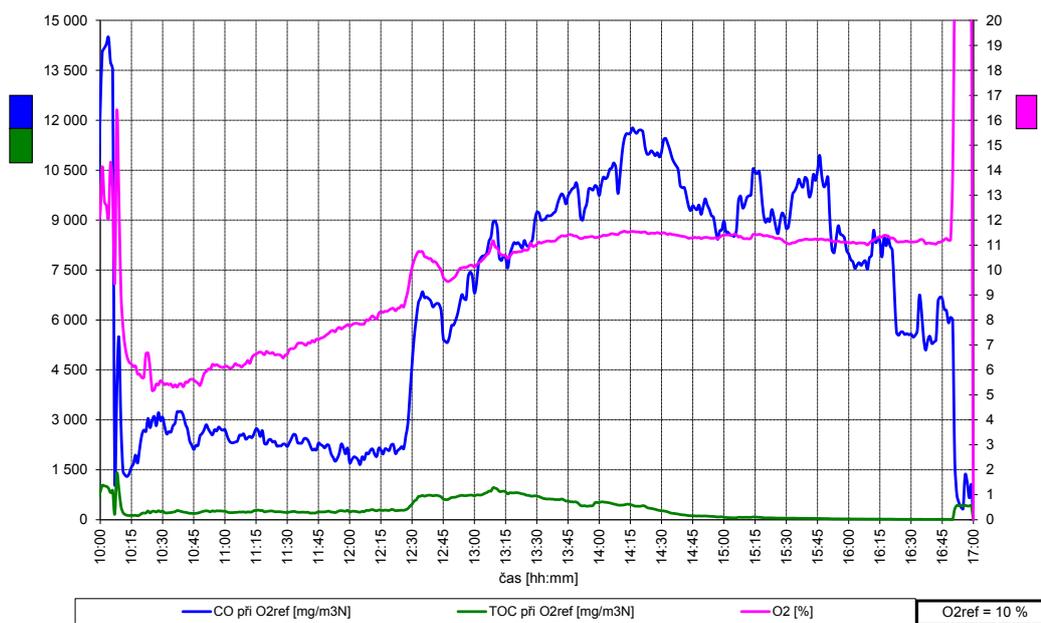
A graf č. 9 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Atmos kombi C20S, HU, jmenovitý výkon



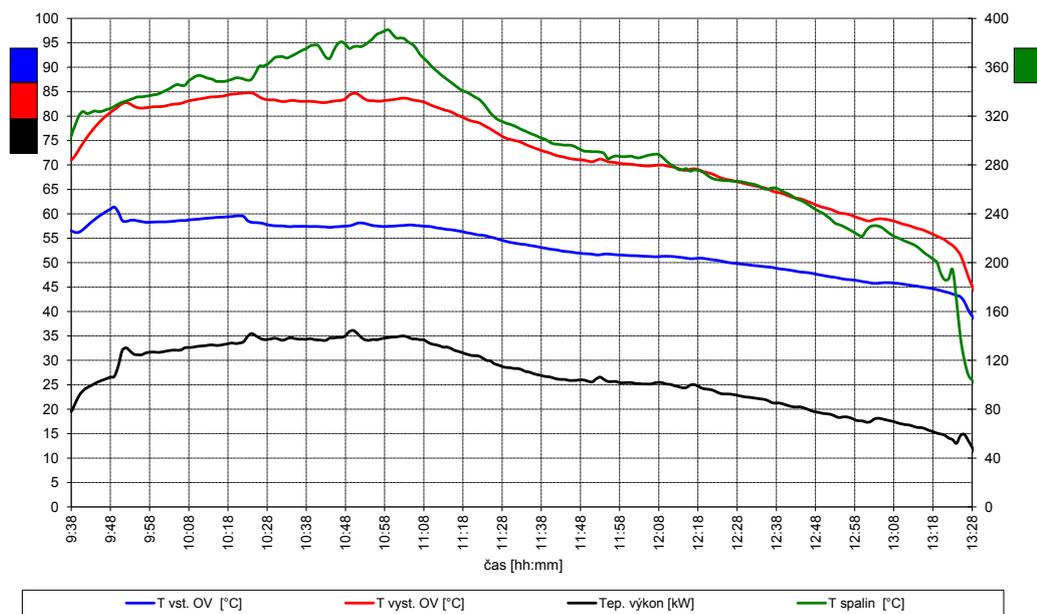
A graf č. 10 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Atmos kombi C20S, HU, jmenovitý výkon



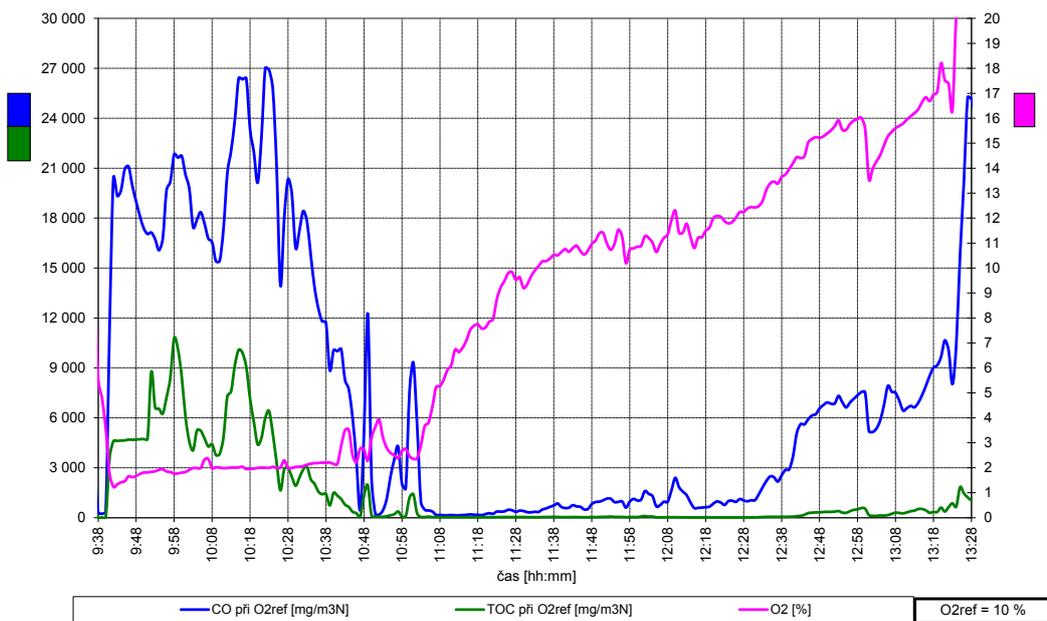
A graf č. 11 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Atmos kombi C20S, HU, snížený výkon



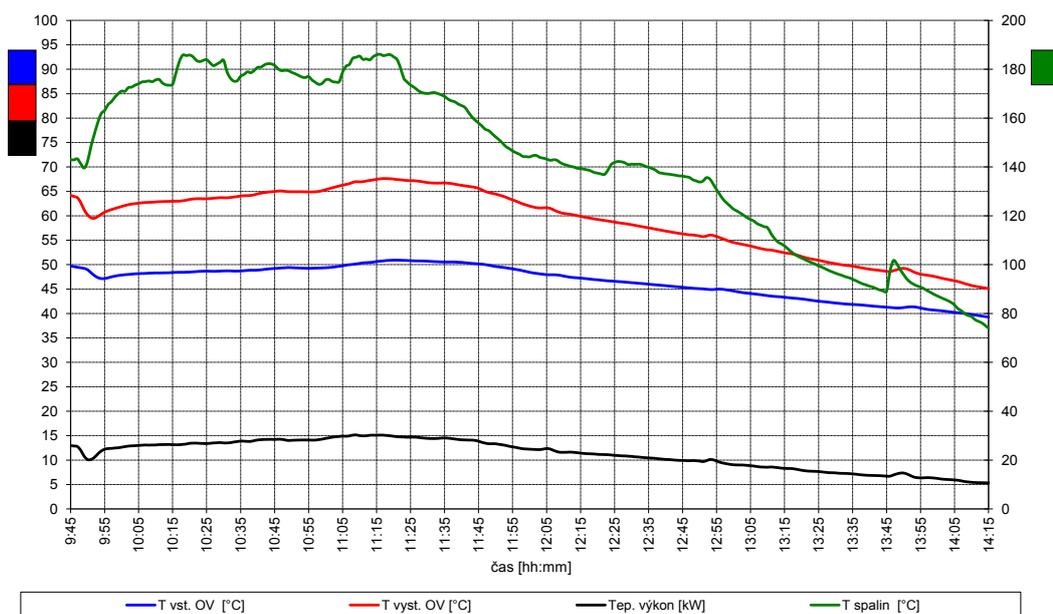
A graf č. 12 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Atmos kombi C20S, HU, snížený výkon



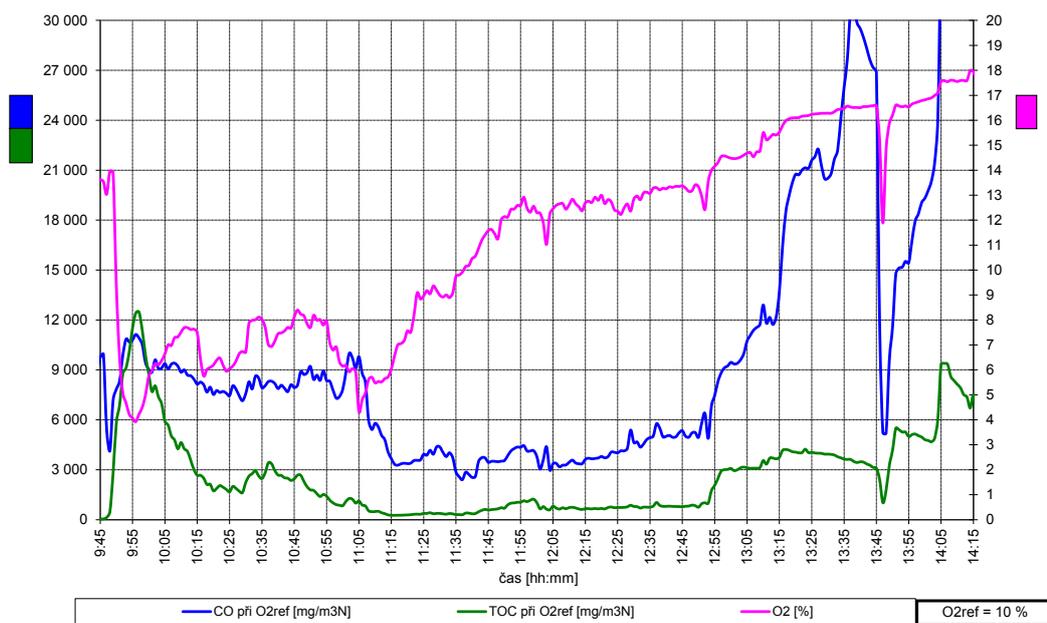
A graf č. 13 Průběh teploty spalín, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Atmos kombi C20S, MIX, jmenovitý výkon



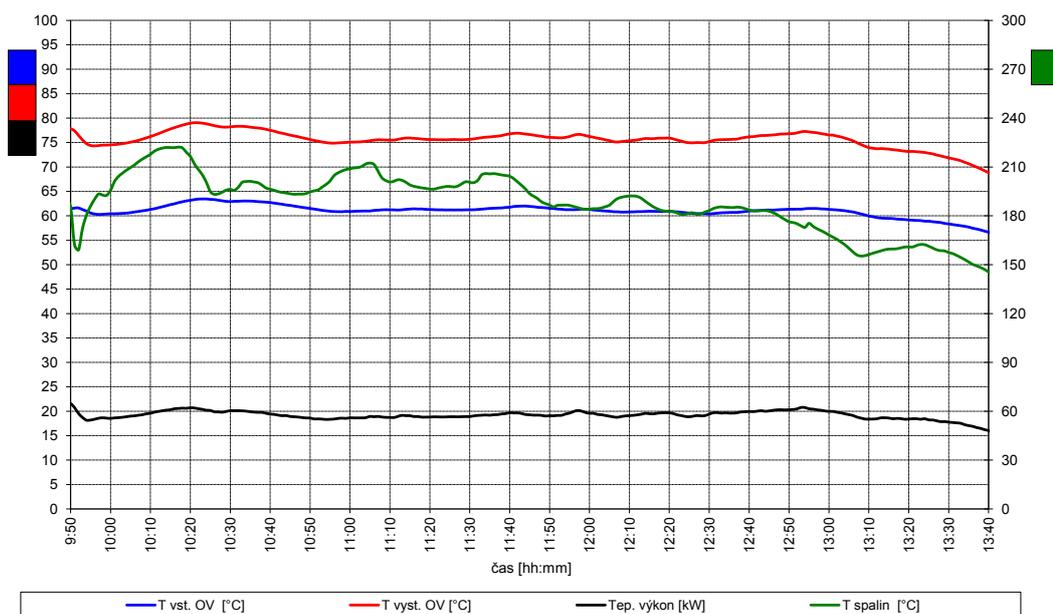
A graf č. 14 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Atmos kombi C20S, MIX, jmenovitý výkon



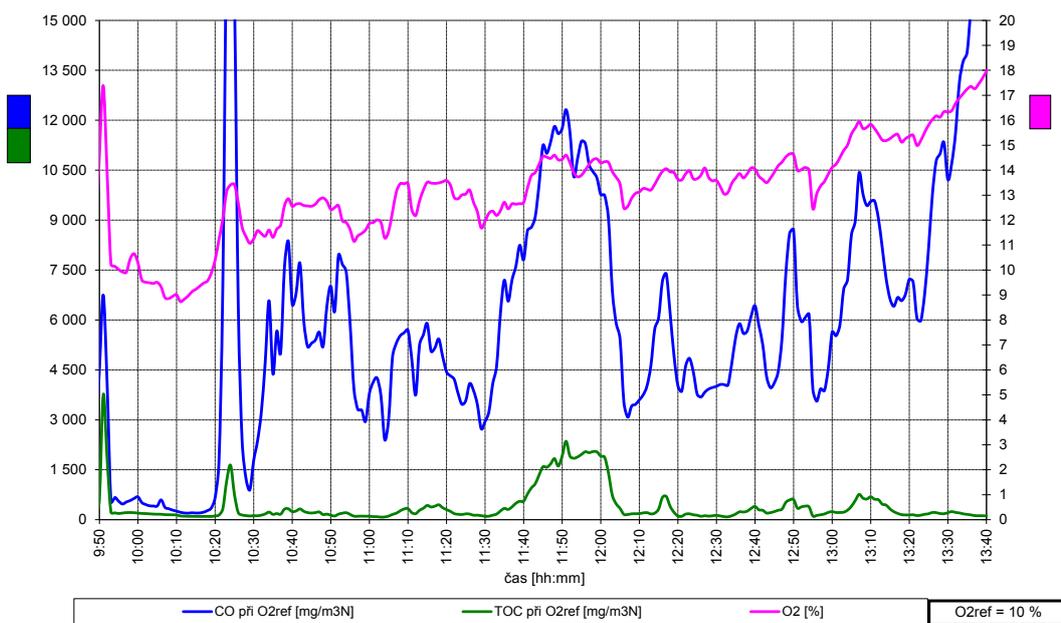
A graf č. 15 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Atmos kombi C20S, MIX, snížený výkon



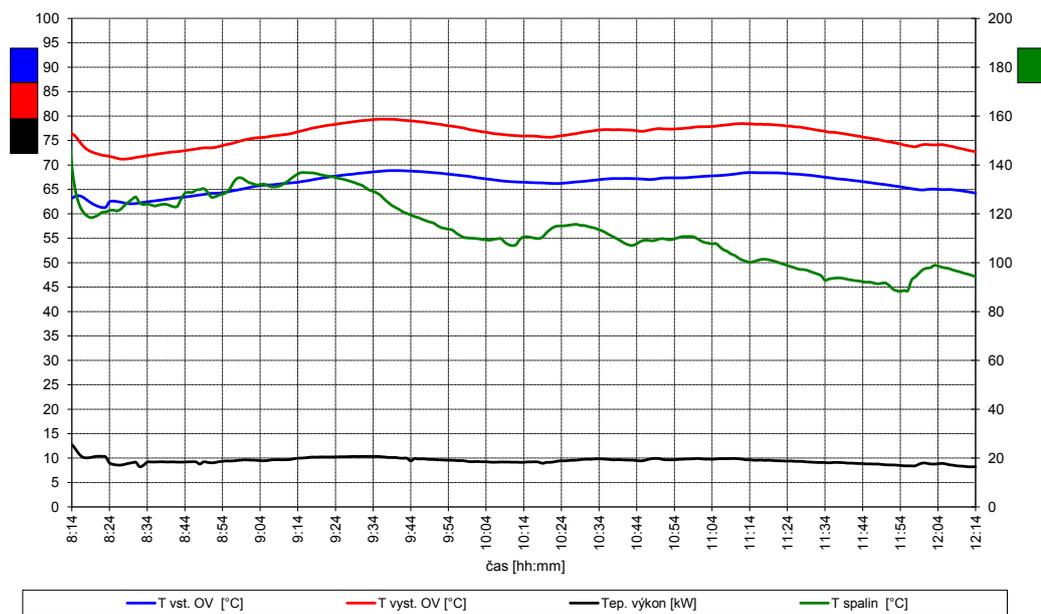
A graf č. 16 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Atmos kombi C20S, MIX, snížený výkon



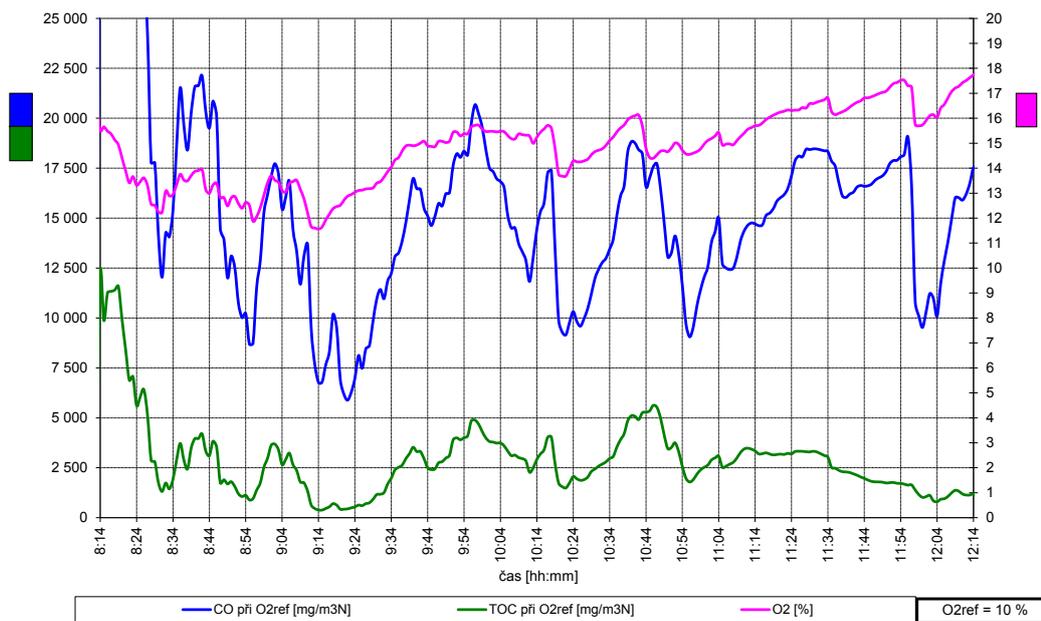
A graf č. 17 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Atmos DC25GS, mokré smrkové dřevo, jmenovitý výkon



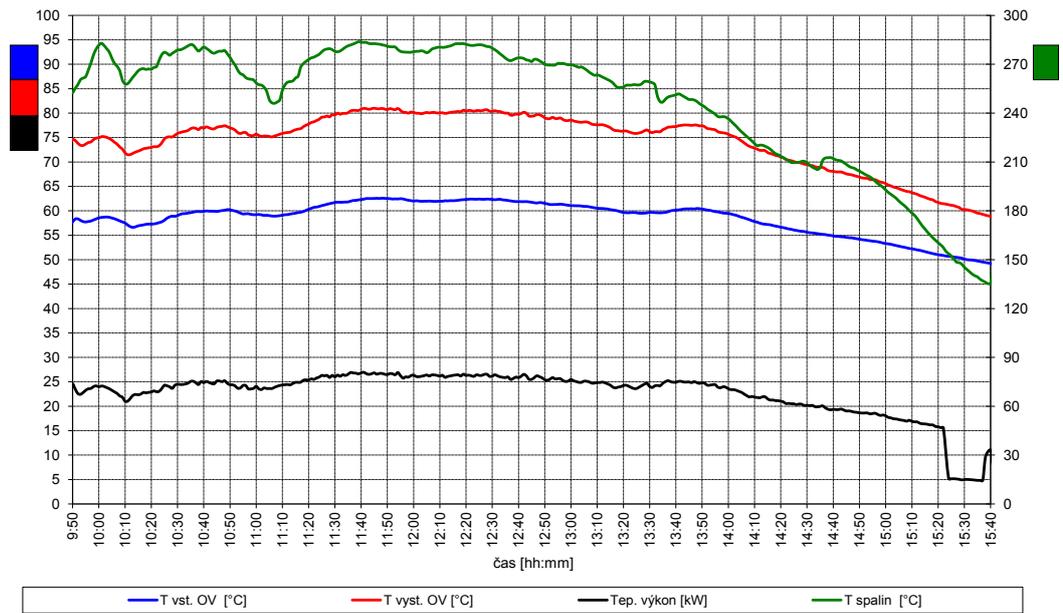
A graf č. 18 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Atmos DC25GS, mokré smrkové dřevo, jmenovitý výkon



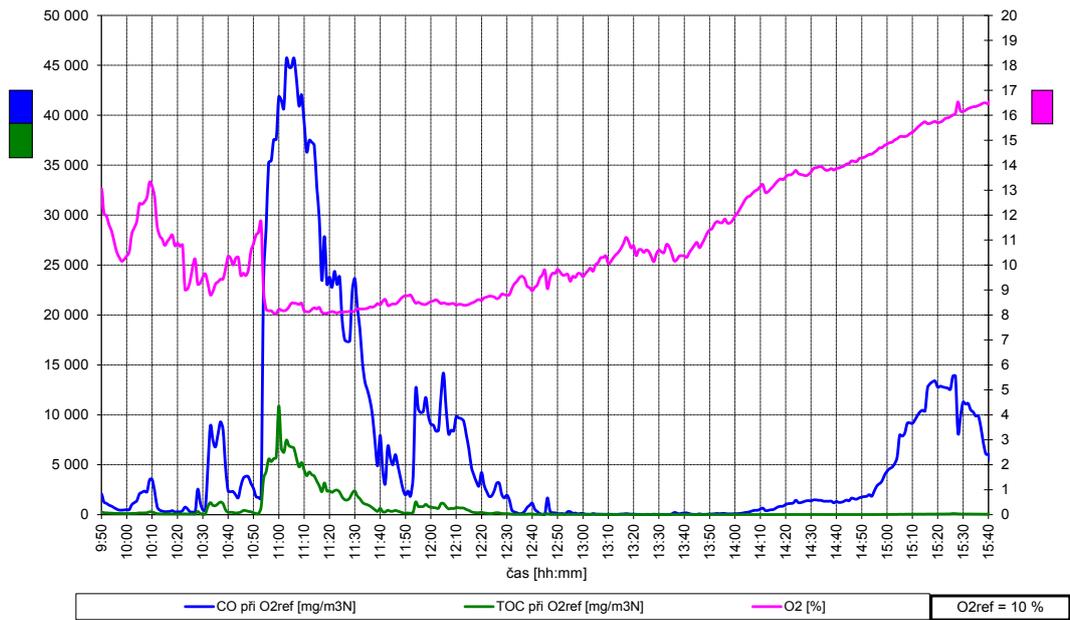
A graf č. 19 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Atmos DC25GS, mokré smrkové dřevo, snížený výkon



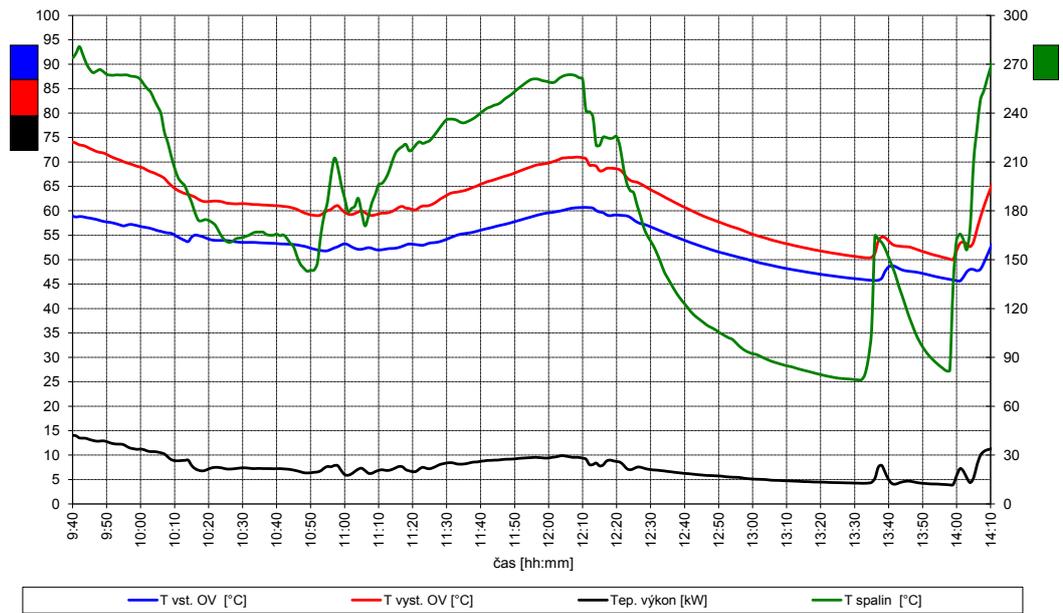
A graf č. 20 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Atmos DC25GS, mokré smrkové dřevo, snížený výkon



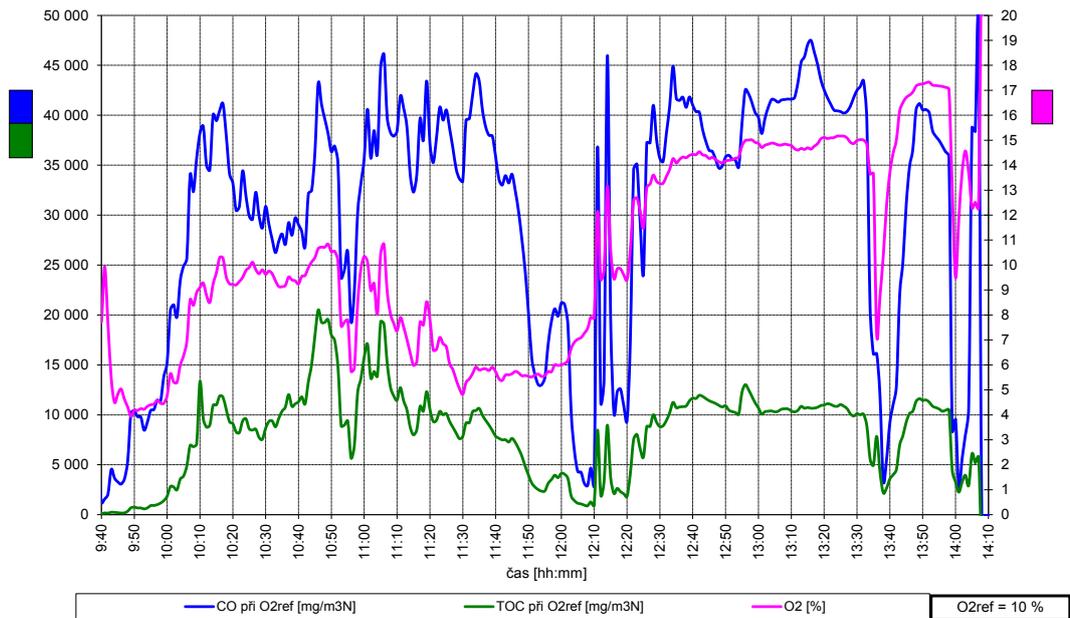
A graf č. 21 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, HU, jmenovitý výkon



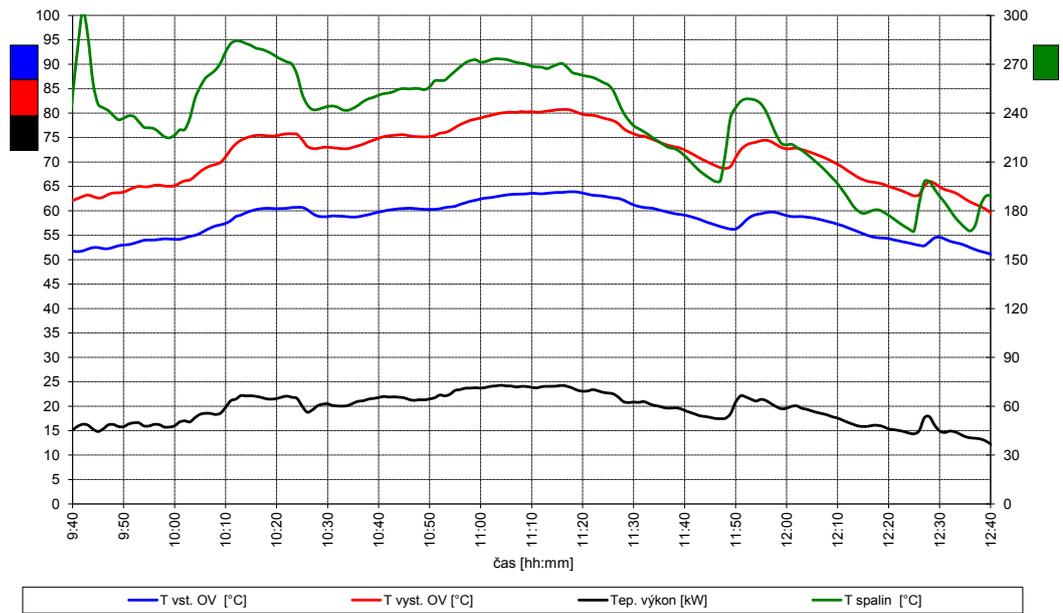
A graf č. 22 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, HU, jmenovitý výkon



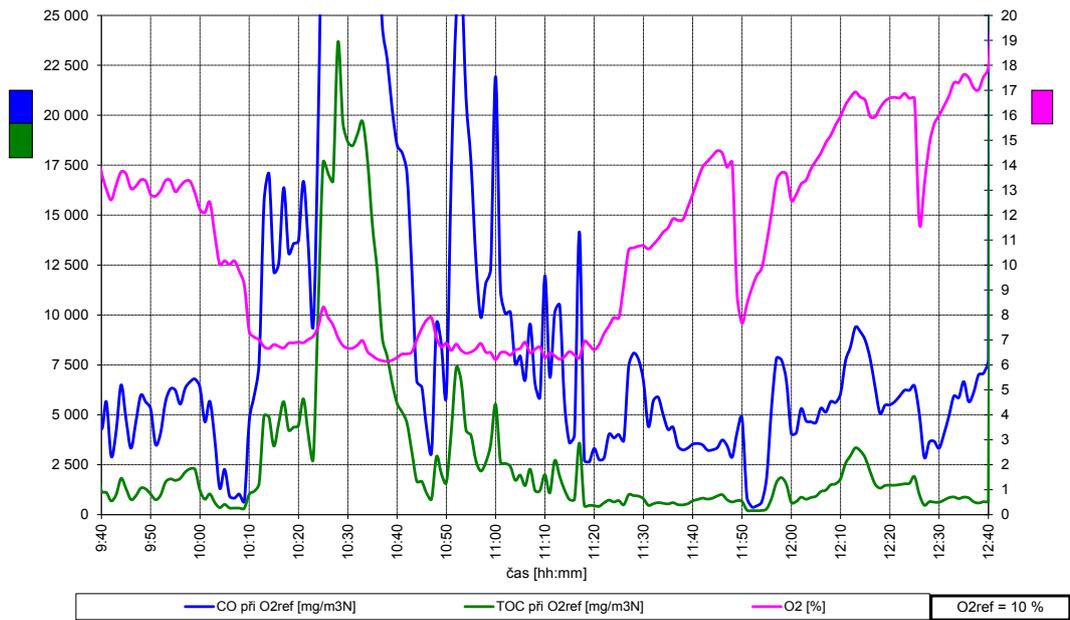
A graf č. 23 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, HU, snížený výkon



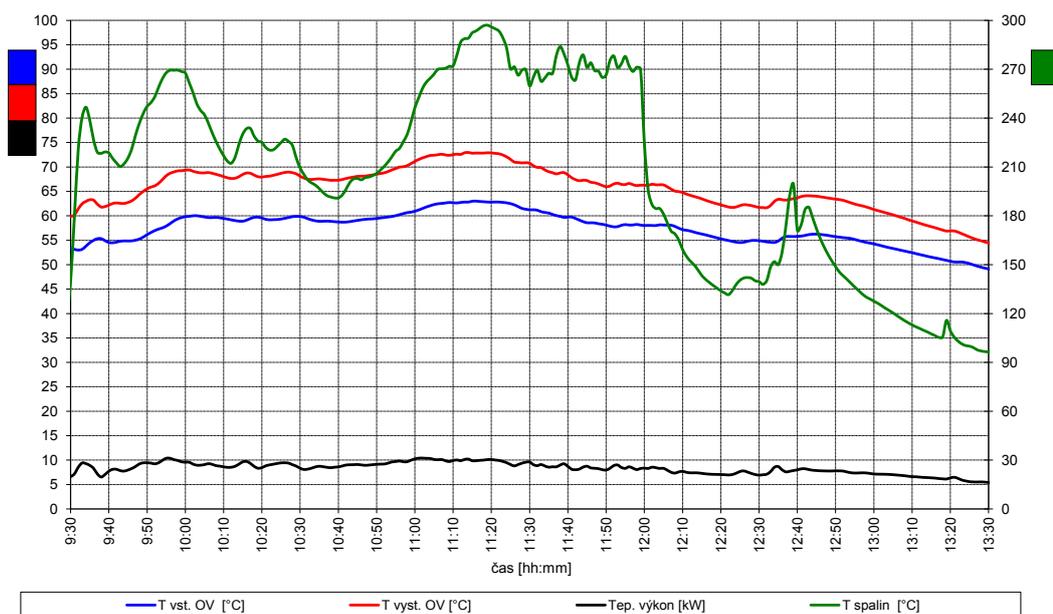
A graf č. 24 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, HU, snížený výkon



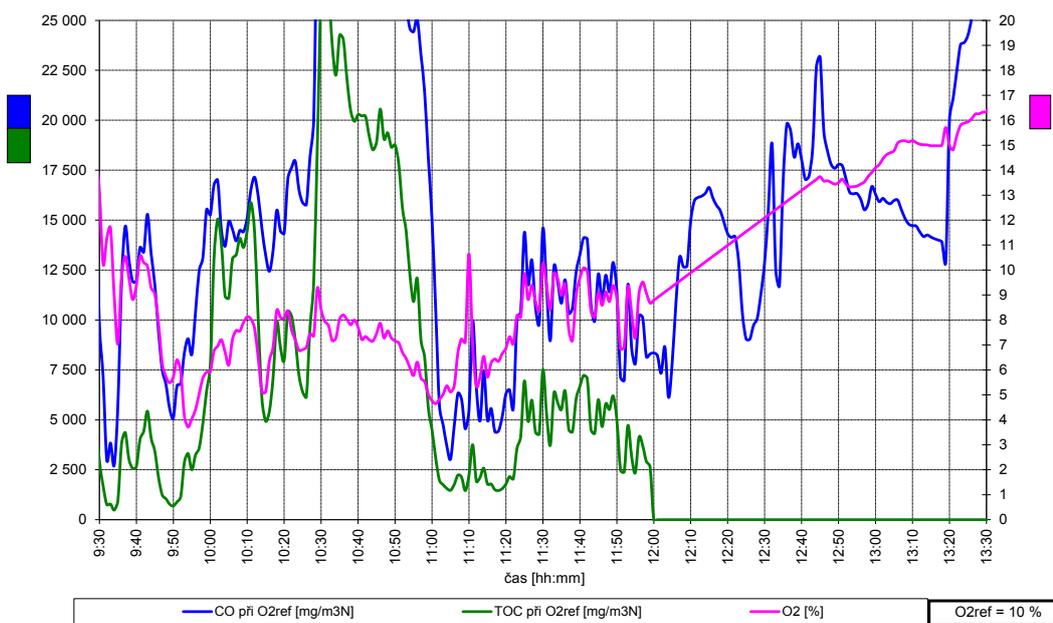
A graf č. 25 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, MIX, jmenovitý výkon



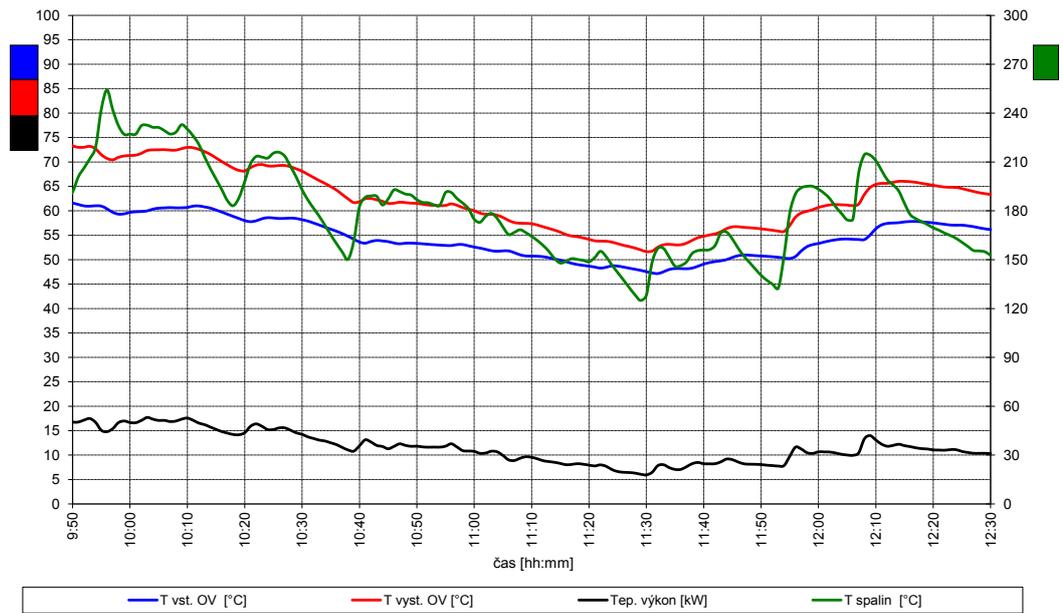
A graf č. 26 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, MIX, jmenovitý výkon



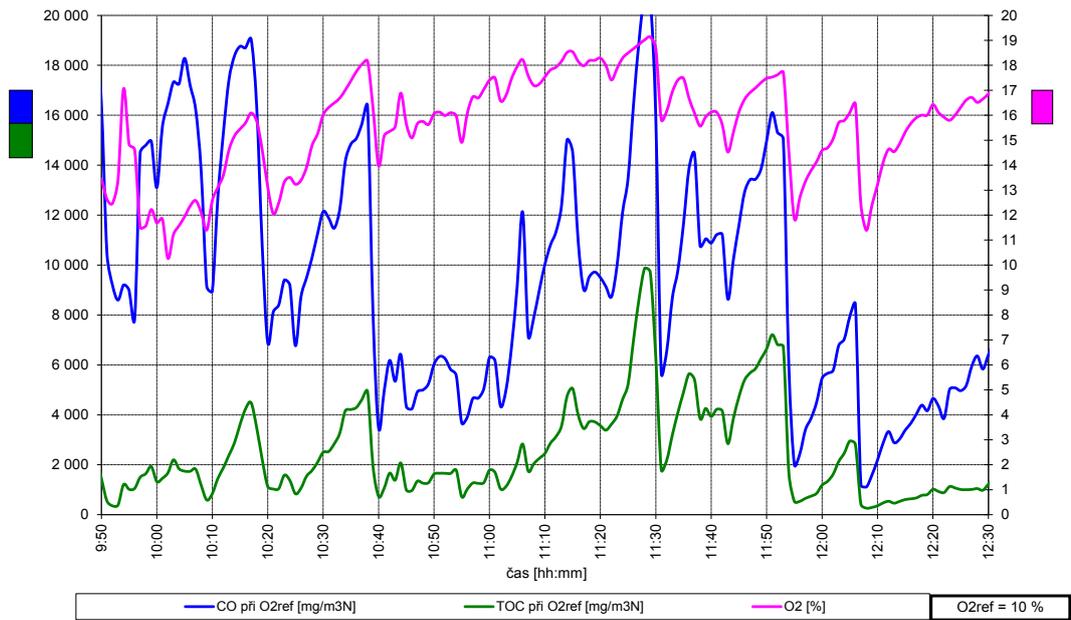
A graf č. 27 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, MIX, snížený výkon



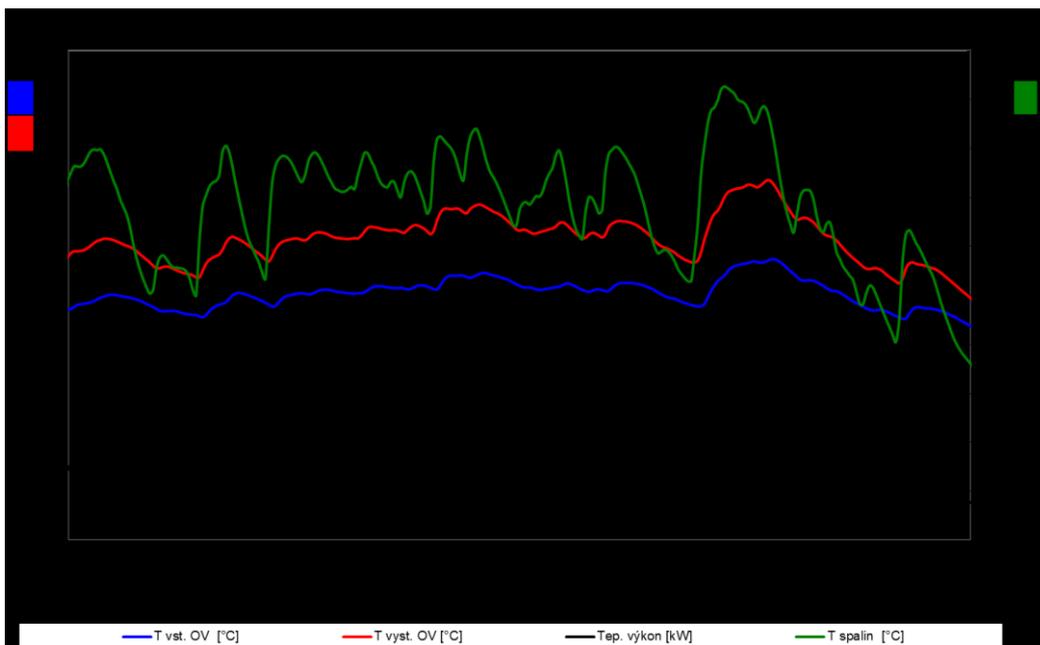
A graf č. 28 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, MIX, snížený výkon



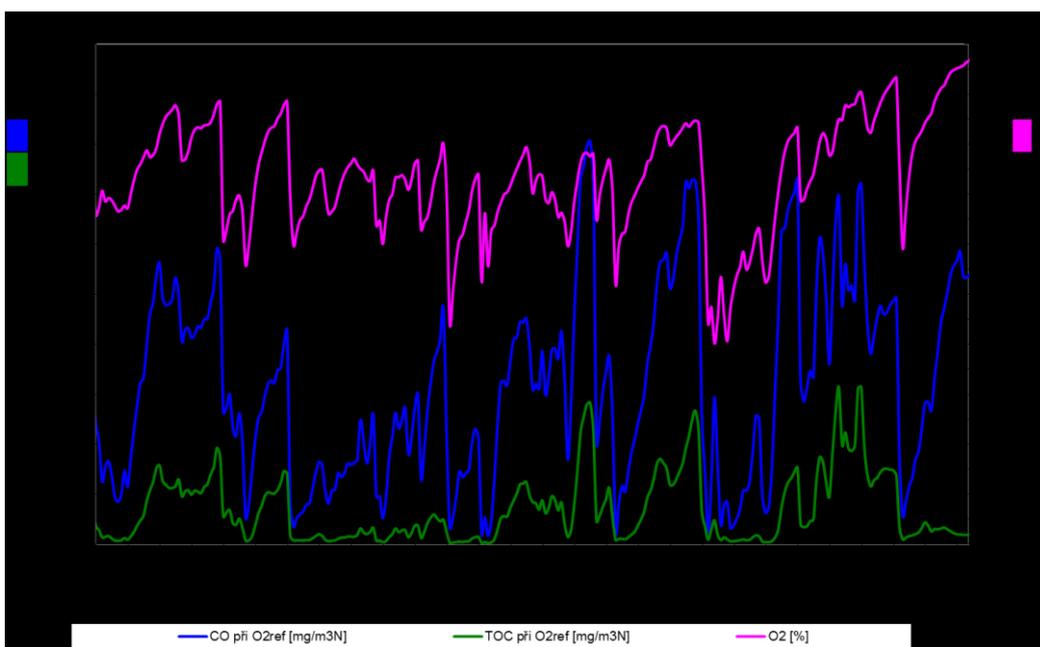
A graf č. 29 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, mokré smrkové dřevo, snížený výkon



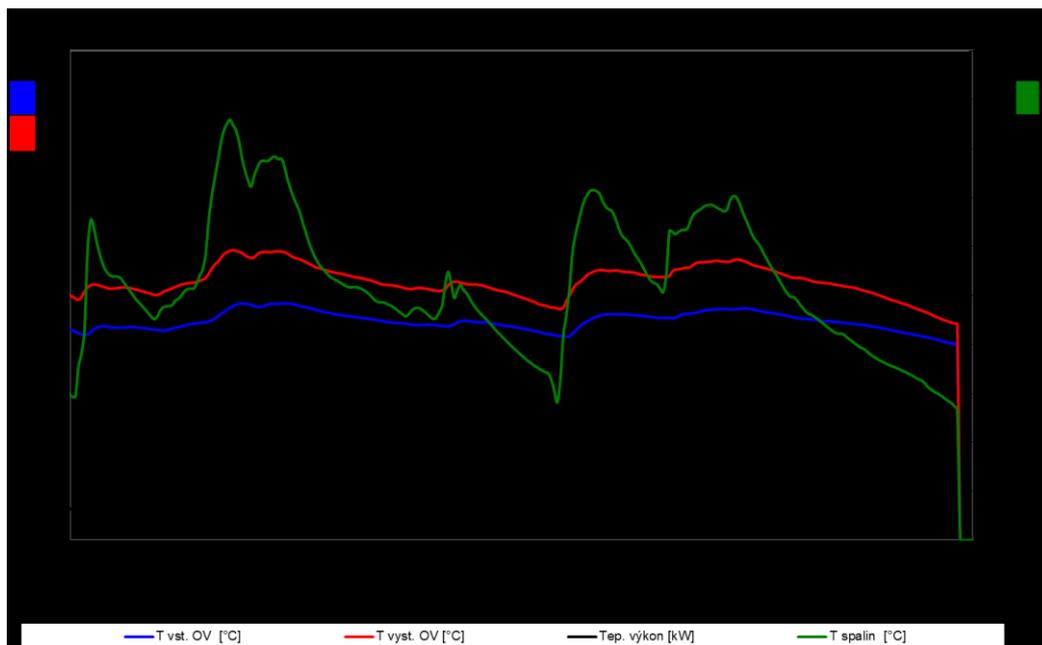
A graf č. 30 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, mokré smrkové dřevo, snížený výkon



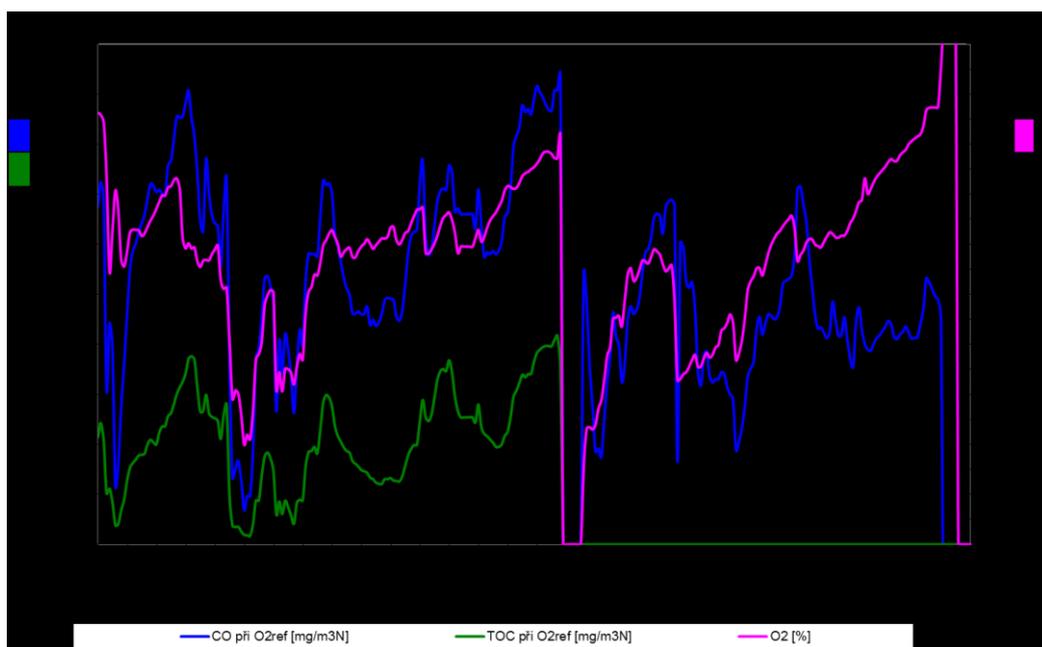
A graf č. 31 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, suché smrkové dřevo, jmenovitý výkon



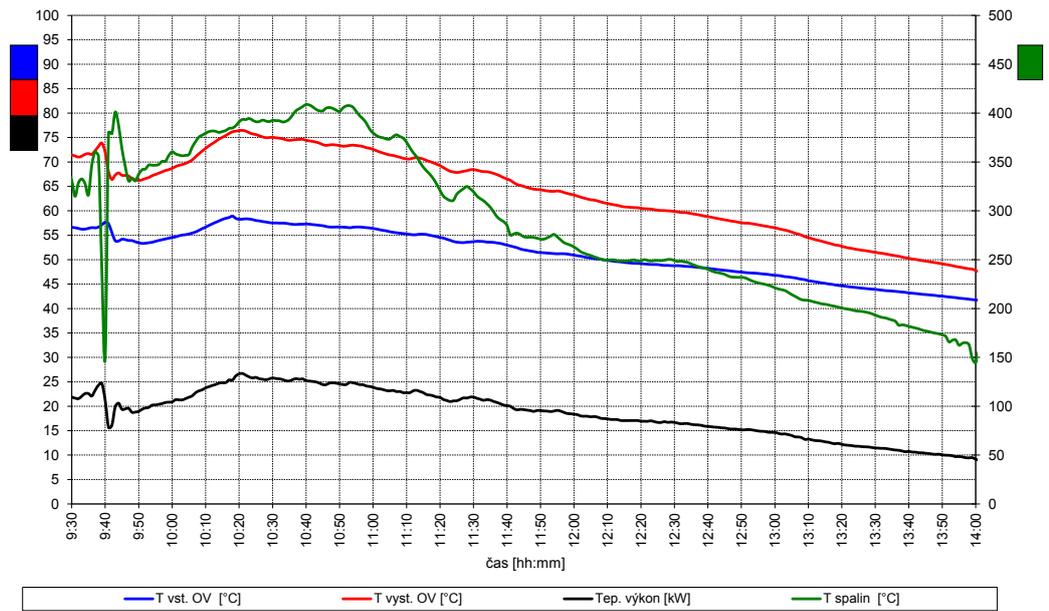
A graf č. 32 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, suché smrkové dřevo, jmenovitý výkon



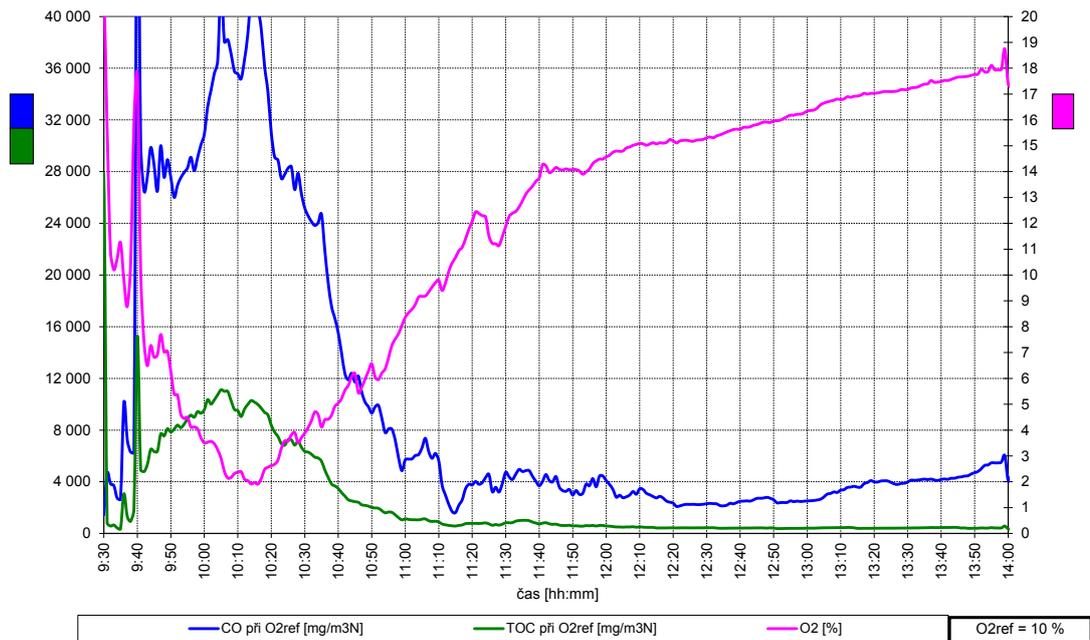
A graf č. 33 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Dakon DOR32 s, suché smrkové dřevo, snížený výkon



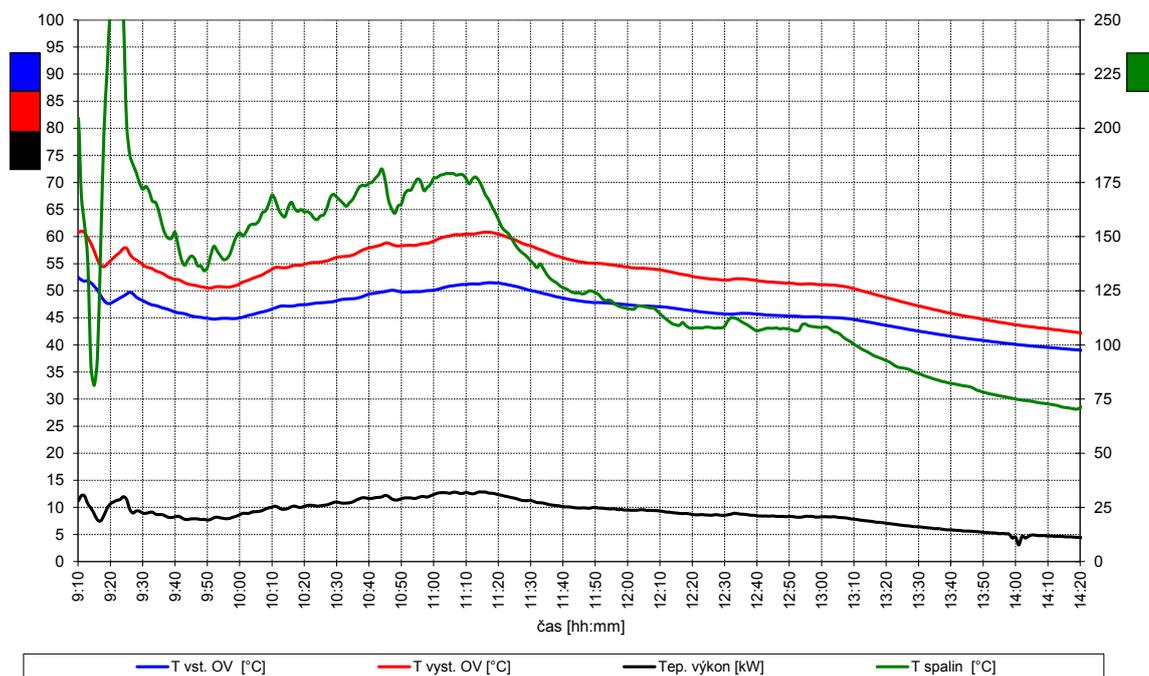
A graf č. 34 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Dakon DOR32 s, suché smrkové dřevo, snížený výkon



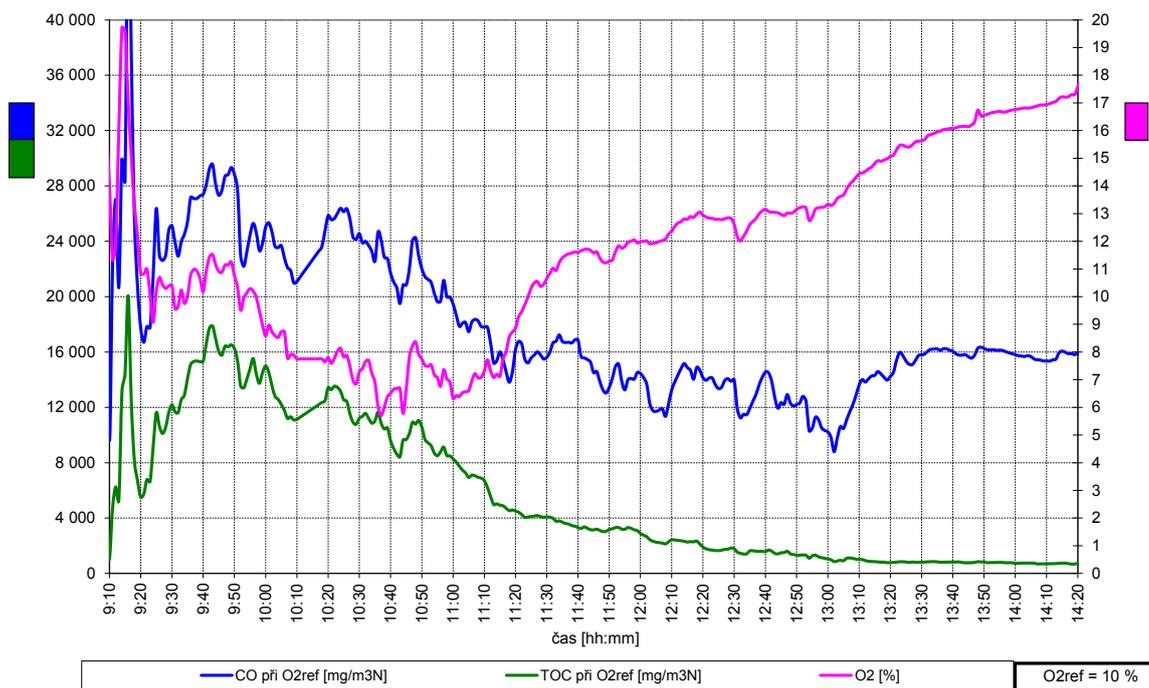
A graf č. 35 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, HU, jmenovitý výkon



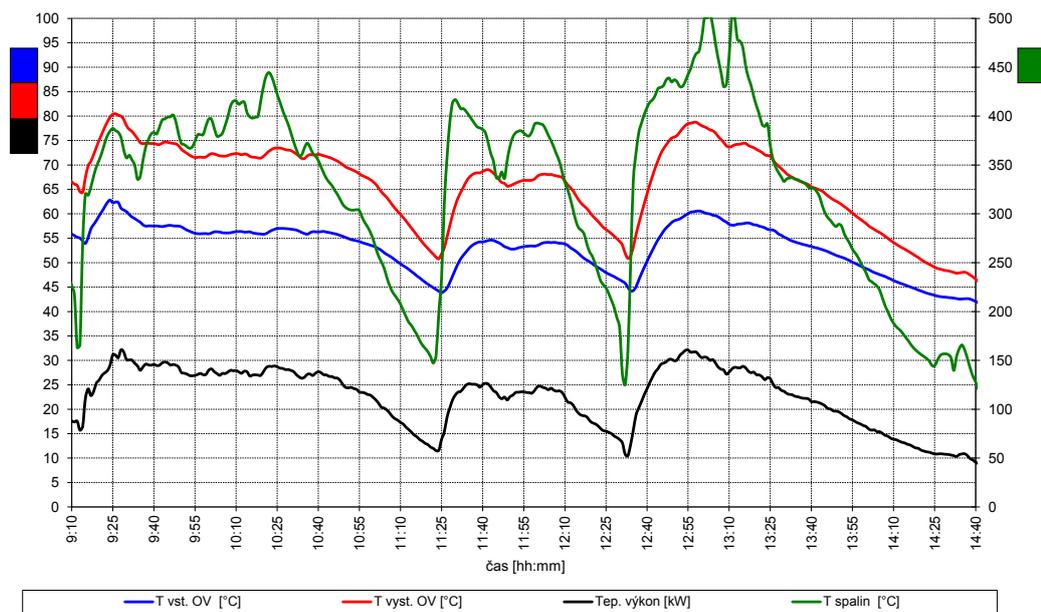
A graf č. 36 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, HU, jmenovitý výkon



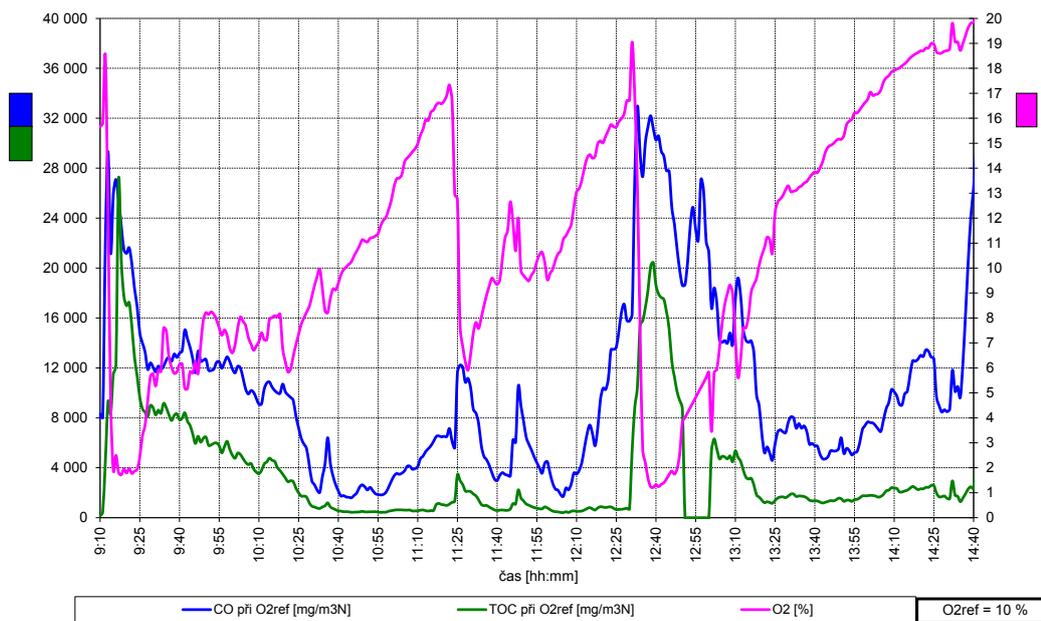
A graf č. 37 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, HU, snížený výkon



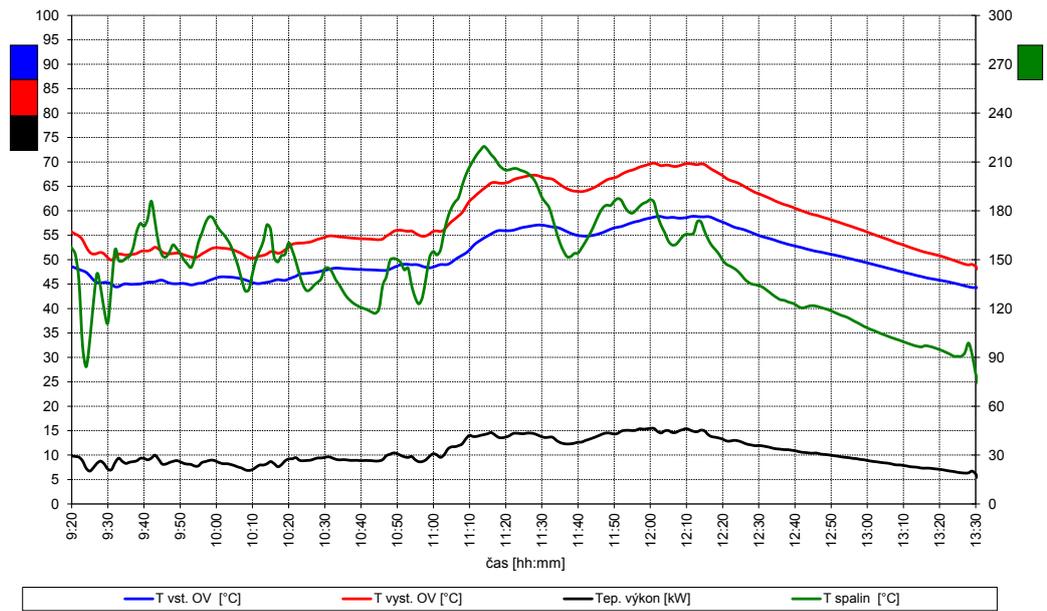
A graf č. 38 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, HU, snížený výkon



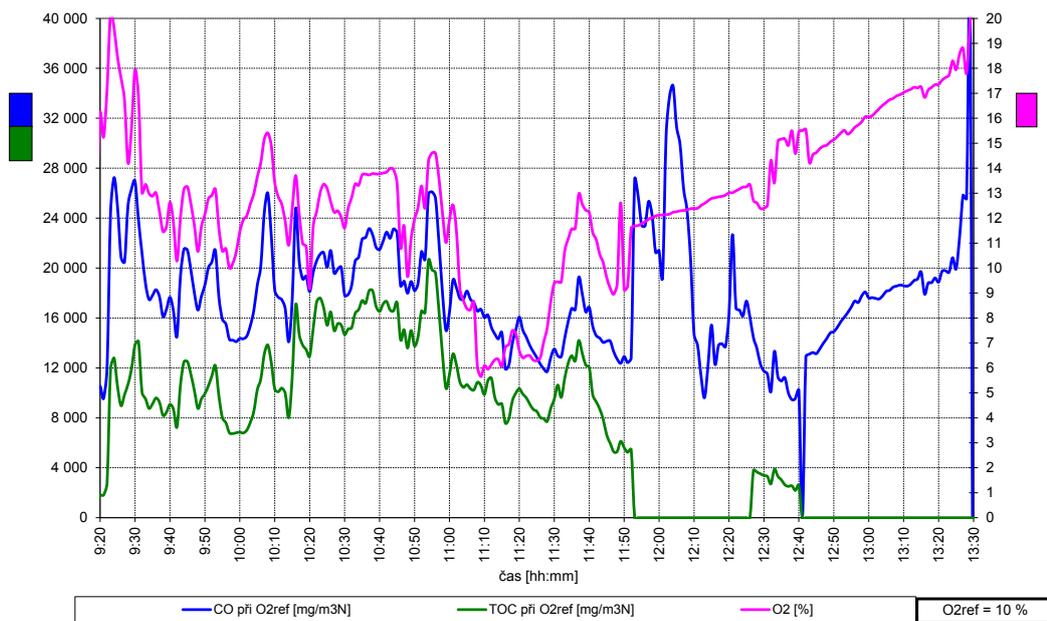
A graf č. 39 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, MIX, jmenovitý výkon



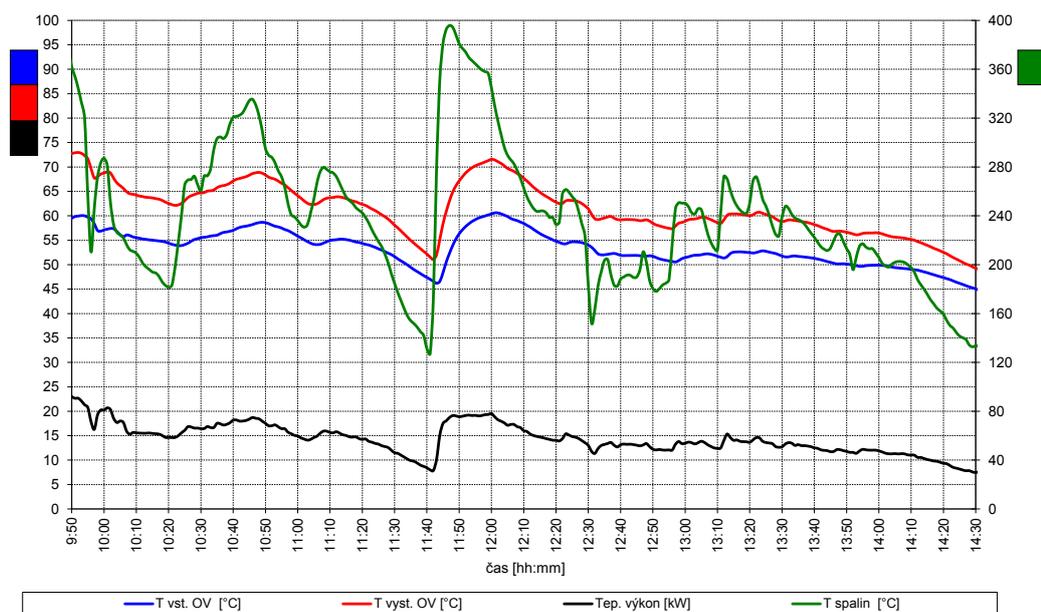
A graf č. 40 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, MIX, jmenovitý výkon



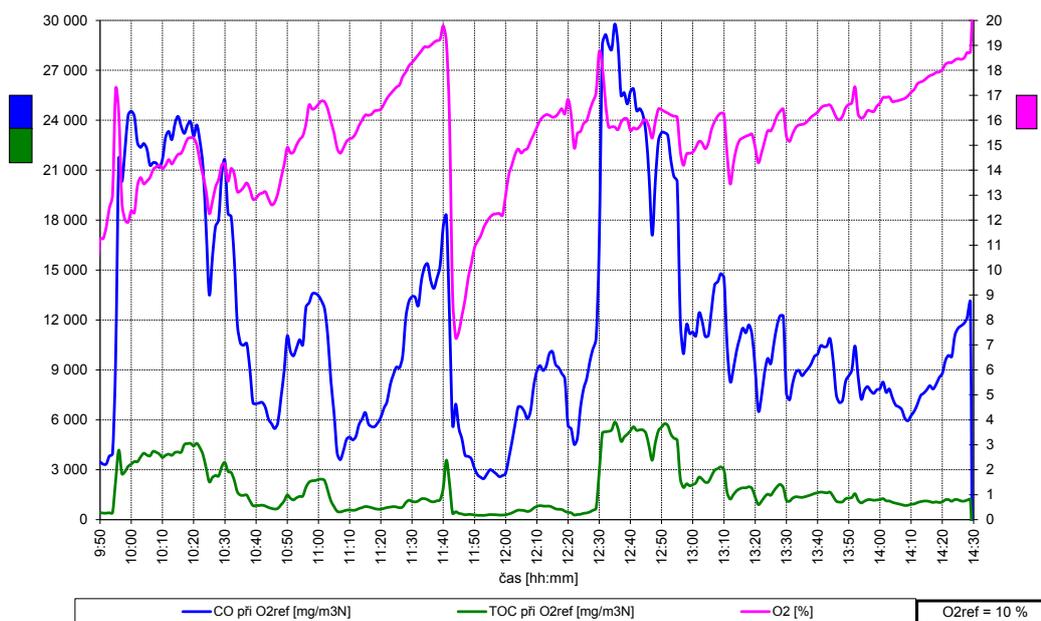
A graf č. 41 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, MIX, snížený výkon



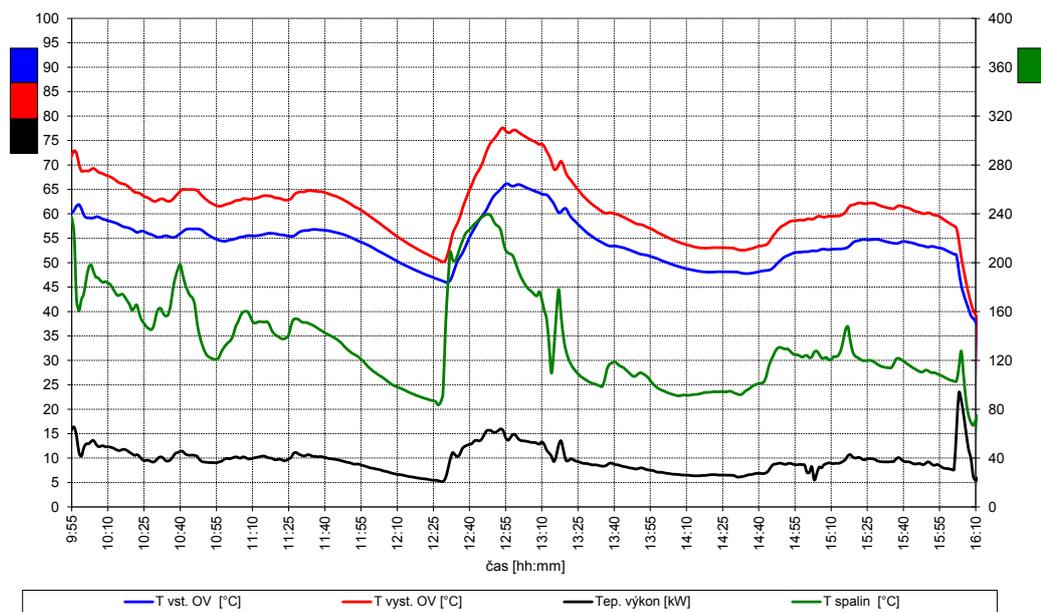
A graf č. 42 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, MIX, snížený výkon



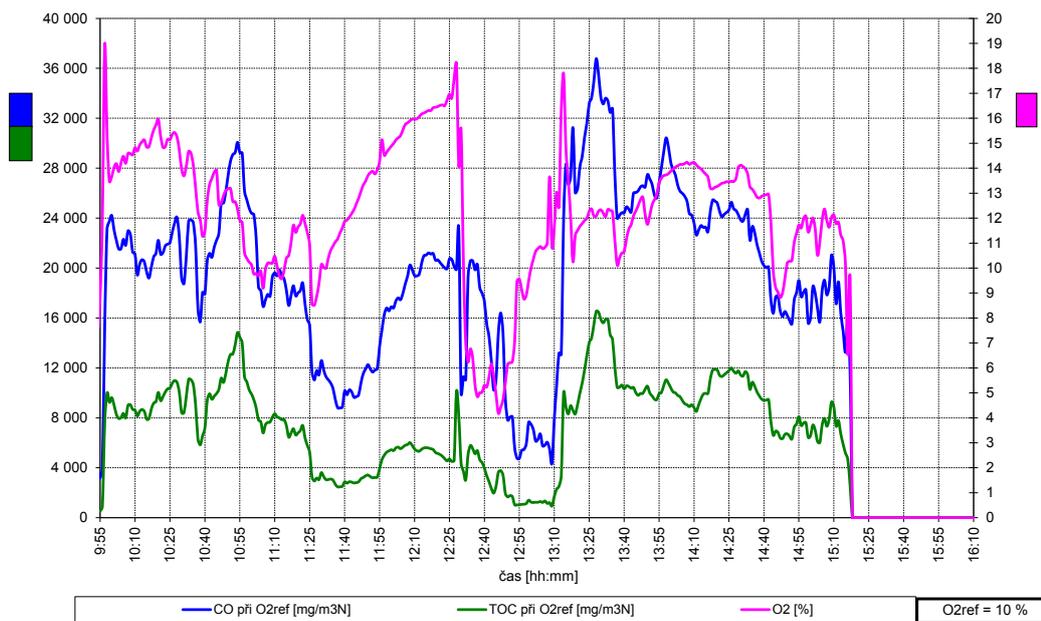
A graf č. 43 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, mokré smrkové dřevo, jmenovitý výkon



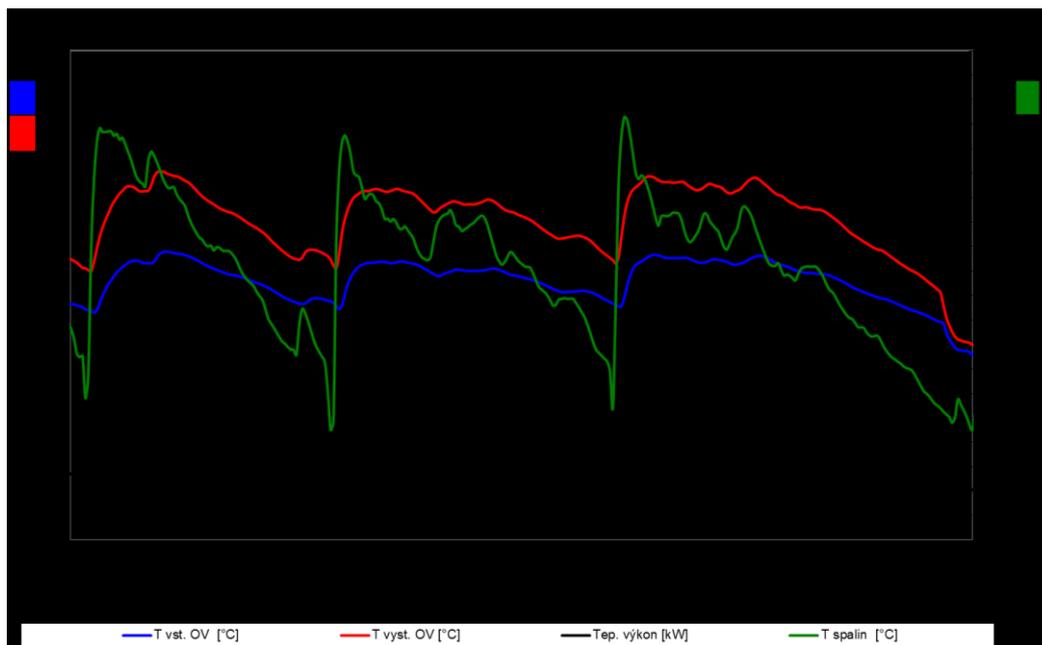
A graf č. 44 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, mokré smrkové dřevo, jmenovitý výkon



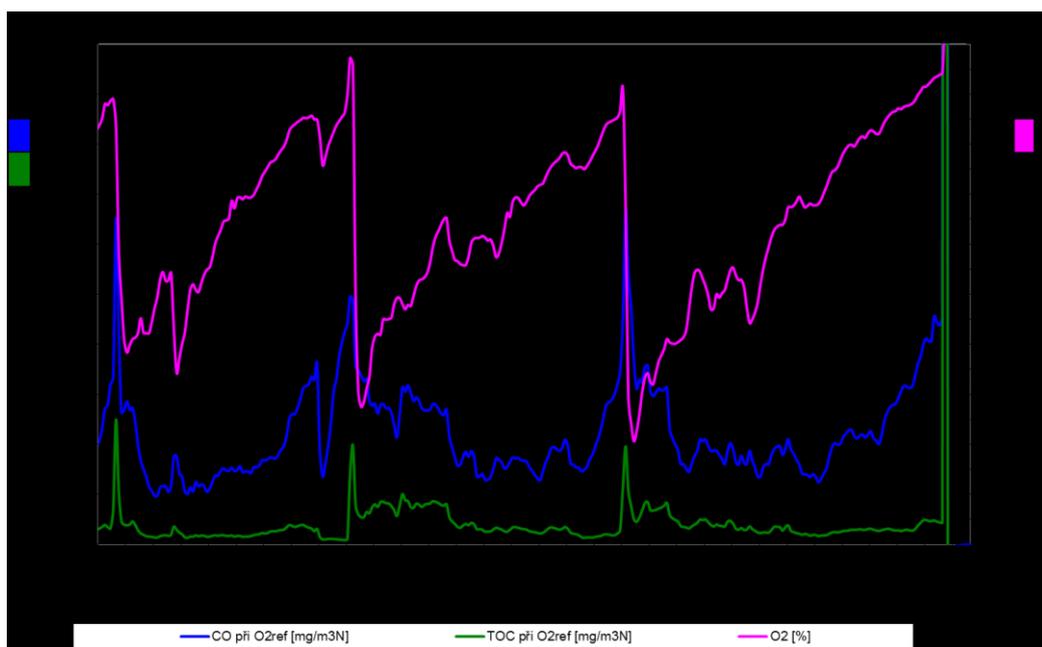
A graf č. 45 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, mokré smrkové dřevo, snížený výkon



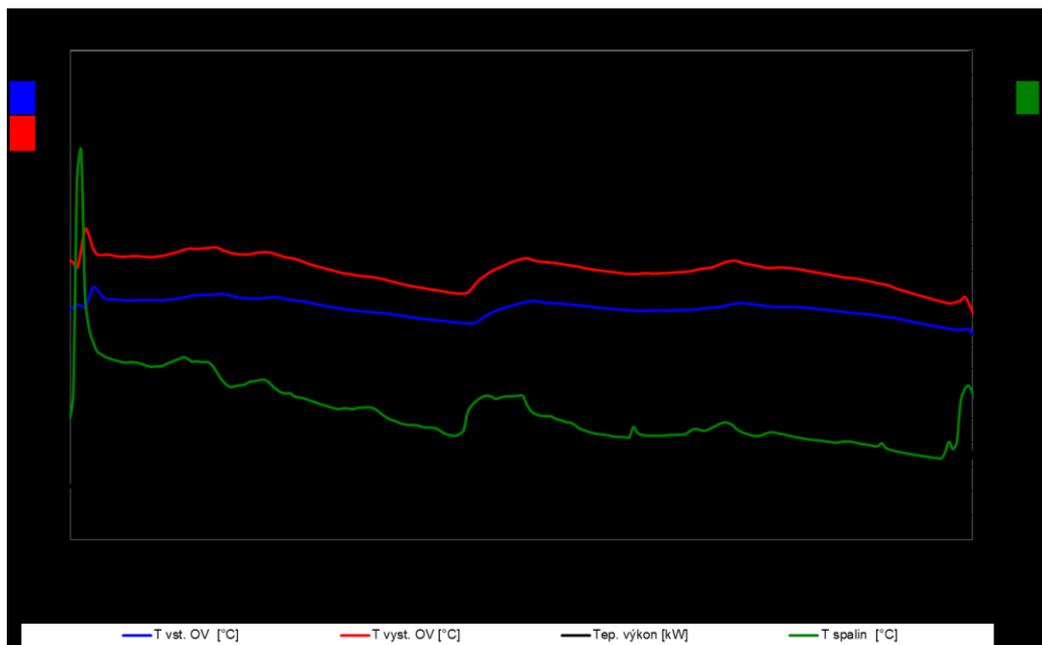
A graf č. 46 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, mokré smrkové dřevo, snížený výkon



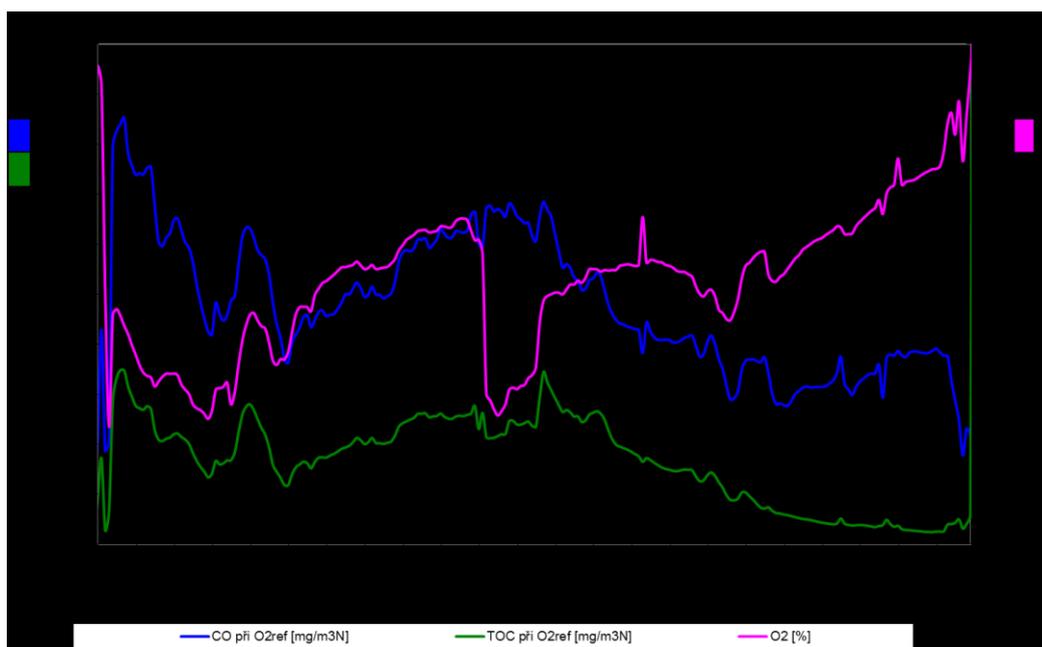
A graf č. 47 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu - Viadrus Hercules U26, suché smrkové dřevo, jmenovitý výkon



A graf č. 48 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ - Viadrus Hercules U26, suché smrkové dřevo, jmenovitý výkon



A graf č. 49 Průběh teploty spalin, teploty vstupní a výstupní otopné vody, tepelného výkonu – Viadrus Hercules U26, suché smrkové dřevo, snížený výkon



A graf č. 50 Průběh koncentrace CO, TOC a O₂ – Viadrus Hercules U26, suché smrkové dřevo, snížený výkon

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ AUTORA

Impaktovaný článek - J_{imp}

- [1] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KRPEC, K., KUBESA, P., HOPAN, F., KALIČÁKOVÁ, Z. Spalování odpadní biomasy v malých zařízeních. *Chemické listy*, 2014, roč. 108, č. 2/2014, s. 156-162.

Článek v databázi Scopus - J_{sc}

- [2] HORÁK, J., HOPAN, F., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., TOMŠEJOVÁ, Š., DEJ, M., KUBESA, P., MARTINÍK, L., MODLÍK, M., MACHÁLEK, P. Může jedna vesnice vyprodukovat stejné množství B(a)P jako průměrná koksovna?. *Vytápění, větrání, instalace*, 2015, roč. 24, č. 2, s. 72-74.

Příspěvek na konferenci v databázi Scopus – D

- [3] DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., HORÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., MARTINÍK, L., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., HOLUBČÍK, M. Emission of nanoparticles during combustion of waste biomass in fireplace. In *AIP Conference Proceedings. Volume 1608*. New York: American Institute of Physics, 2014, s. 27-32.
- [4] DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., HORÁK, J., KRPEC, K., HOPAN, F., KUBESA, P. Emissions of Nanoparticles from Small Combustion Equipment with Regard to the Combustion Mode and Wood Humidity. In *Advanced Materials Research. Volume 1041*. Zürich : Trans Tech Publication Ltd, 2014, s. 226-230.
- [5] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KUBESA, P. Evaluation of possible use of foliage as a fuel for small combustion equipment. *Advanced Materials Research*, 2014, roč. 899, č. 2/2014, s. 218-221.
- [6] KUBESA, P., HORÁK, J., BRANC, M., KRPEC, K., HOPAN, F., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., MALCHO, M. Lump wood combustion process. In *AIP Conference Proceedings. Volume 1608*. New York : American Institute of Physics, 2014, s. 137-145.
- [7] SKŘÍNSKÁ, M., HORÁK, J., DANIHELKA, P., KRPEC, K., HOPAN, F., KALIČÁKOVÁ, Z., KUBESA, P., MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., SKŘÍNSKÝ, J., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T., JANDAČKA, J. Aerosols and the methods of determining the characteristics of nanoparticles. In *AIP Conference Proceedings. Volume 1608*. Melville : American Institute of Physics, 2014, s. 211-218.

Kniha

- [8] HORÁK, J., KUBESA, P., HOPAN, F., KRPEC, K., KYSUČAN, Z., MARTINÍK, L., MICHNOVÁ, L., JANKOVSKÁ, Z., JIŘÍ, D., DRASTICHOVÁ, V. *Vytápění tuhými palivy v praxi*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. 58 s. ISBN 978-80-248-3303-3.
- [9] MARCIOCHA, D., ŠTAMBORSKÁ, M., VEREŠ, J., NAJSER, J., OCHODEK, T., HOPAN, F., HORÁK, J., PLACHÁ, D., BESTOVÁ, I., DRASTICHOVÁ, V., KARAS, J., KRPEC, K., KUBESA, P., MIKESKA, M., LUTYŃSKI, M., RAJCZYKOWSKI, K., SUPONIK, T., TYTLA, M., WIDZIEWICZ, K., WIDZIEWICZ, K. *Converted fuel and not only that. Selected issues..* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. 150 s. ISBN 978-80-248-3685-0.

Recenzované články - J_{rec}

- [10] DRASTICHOVÁ, V., BARTLOVÁ, I., JANKOVSKÁ, Z. TESTING THE EFFECT OF FULLERENE AND ITS DERIVATIVES ON THE ENVIRONMENT. *Sborník vědeckých prací VŠB - TUO, Řada bezpečnostního inženýrství*, 2013, roč. 2013, č. 1, s. 1-8.
- [11] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., KUBESA, P., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V. Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě. *TZB-info*, 2013, roč. Neuveden, č. 18.3.2013, s. 1-14.
- [12] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V. Jaké parametry musí splnit kamna, krbové vložky a sporáky? Legislativa v ČR a Evropě. *TZB-info*, 2013, roč. Neuveden, č. 3.6.2013, s. 1-13.
- [13] MARTINÍK, L., HORÁK, J., ŠIMÁČEK, A., KRPEC, K., KUBESA, P., HOPAN, F., DRASTICHOVÁ, V., KOLONIČNÝ, J., OCHODEK, T. Zásady návrhu akumulárních kamen. *TZB-info*, 2014, roč. Neuveden, č. 5, s. 1-15.
- [14] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., KYSUČAN, Z., KREMER, J., JANDAČKA, J. Proč sušit dřevo a učit lidi topit? Vliv vlhkosti dřeva a obsluhy na emise znečišťujících látek. *TZB-info*, 2014, roč. Neuveden, č. Březen, s. 1-7.

Funkční vzorky

- [15] HORÁK, J., MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., JANKOVSKÁ, Z., KRPEC, K. Brikety lisované z listí ořechu. 2013.
- [16] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K. Brikety lisované z listí jírovce. 2013.
- [17] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K. Brikety lisované z listí javoru. 2013.
- [18] HORÁK, J., MARTINÍK, L., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K. Brikety lisované z listí jasanu. 2013.

Příspěvky na konferencích

- [19] DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., HOPAN, F., MARTINÍK, L., KUBESA, P., JANKOVSKÁ, Z., HORÁK, J. Nanoparticles from combustion of waste city biomass. 2013.
- [20] HORÁK, J., HOPAN, F., KRPEC, K., KUBESA, P., DRASTICHOVÁ, V., MARTINÍK, L., SKŘÍNSKÁ, M., KYSUČAN, Z., KREMER, J. Proč sušit dřevo a učit lidi topit? Vliv vlhkosti dřeva a obsluhy na emise znečišťujících látek. In *Ochrana ovzduší ve státní správě VIII : teorie a praxe : 18.-20. listopadu 2013 : Top CityLine Primavera Hotel & Congress Centre, Plzeň*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2013, s. 37-41.

- [21] MARTINÍK, L., DRASTICHOVÁ, V., HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., KUBESA, P. Verification of using possibility of fallen leaves for combustion in small combustion equipment. In *enviBuild 2013 : zborník prednášok z medzinárodnej konferencie: [17. október 2013, Univerzitná knižnica, Ventúrska 11, Bratislava]*. Bratislava: STU Bratislava, 2013, s. 328-331.
- [22] HORÁK, J., MARTINÍK, L., KRPEC, K., DVOŘÁK, J., HOPAN, F., KUBESA, P., JANKOVSKÁ, Z., DRASTICHOVÁ, V. What parameters must stoves, inset stoves, and cookers comply with? Legislation in the CR and Europe. In *MMK 2013: Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky: [9.-13. prosince 2013, Hradec Králové]*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2013, s. 3729-3739.
- [23] HORÁK, J., HOPAN, F., DRASTICHOVÁ, V., KRPEC, K., TOMŠEJOVÁ, Š., DEJ, M., KUBESA, P., MARTINÍK, L., MODLÍK, M., MACHÁLEK, P. Může jedna vesnice vyprodukovat stejné množství B(a)P jako průměrná koksovna?. In *Ochrana ovzdušia 2014: medzinárodná konferencia: zborník: 24.-26. november 2014, Vysoké Tatry, Štrbské Pleso*. Bratislava: Kongres studio, 2014, s. 105-110.
- [24] KALIČÁKOVÁ, Z., DANIHELKA, P., KUKUTSCHOVÁ, J., MIČKA, V., BERNATÍKOVÁ, Š., DRASTICHOVÁ, V., VACULÍK, M. Uvolňování ultrajemných částic při brzdných procesech za kontrolovaných laboratorních podmínek. In *Doprava, zdraví a životní prostředí VI*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 2014.