

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

EMISE ZE SPALOVÁNÍ ZAHRADNÍHO ODPADU

EMISSIONS FROM THE BURNING OF GARDEN WASTE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Oksana Kuznetsova

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Oksana Kuznetsova**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Emise ze spalování zahradního odpadu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je velký tlak na snižování emisí nežádoucích látek ze všech spalovacích zařízení pro výrobu tepla a elektrické energie, spalování odpadů, v dopravě atp. Velkým zdrojem nežádoucích látek jsou však i aktivity spojené s neřízením spalováním biomasy, jako je spalování zahradnického odpadu v sudech nebo na volných hromadách.

Součástí této experimentální práce je návrh aparatury pro odběr vzorků a provedení pilotních experimentů pro volné spalování zahradního odpadu.

Cíle bakalářské práce:

- přehled nežádoucích emisí vznikajících při spalování vlhké biomasy
- návrh vhodné trati pro odběr spalin
- návrh metodiky odběru a analýzy vybraných polutantů
- realizace experimentu
- vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

JANDAČKA, Jozef. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina: BALPO, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou produkce plyných a tuhých znečišťujících látek při spalování zahradního odpadu. Cílem bylo realizovat a zhodnotit experiment. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že při spalování zahradního odpadu se vyprodukuje mnohonásobně víc emisí, než při spalování dřeva v kotli. Důvodem vysokých koncentrací emisí byly složení paliva a proces spalování. Dále byly zkoumané jemné tuhé částice v rozsahu 17,5–532,8 nm. V teoretické části byla vytvořena literární rešerše, která byla zpracována na základě české a zahraniční odborné literatury.

Klíčová slova

Spalování, emise, zahradní odpad, jemné tuhé částice, PM, oxidy uhlíku, oxidy dusíku, celkový organický uhlík.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of production of gaseous and solid pollutants in the incineration of garden waste. The aim was to carry out and evaluate the experiment. During the evaluation, it was found that the incineration of garden waste produces many times more emissions, than the incineration of wood in the boiler. The reason for the high emission concentrations was the fuel composition and the combustion process. Furthermore, fine particles in the range 17.5–532.8 nm were investigated. In the theoretical part, a literary search was created, which was based on Czech and foreign professional literature.

Key words

Combustion, emission, garden waste, fine particles, PM, carbon oxides, nitrogen oxides, total organic carbon.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUZNETSOVA, Oksana. *Emise ze spalování zahradního odpadu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124519>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem Bakalářskou práci na téma «Emise ze spalování zahradního odpadu» vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za odborné vedení a ochotu, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Děkuji také Ing. Otakaru Štelcovi, Ing. Tomáši Sítkovi a Ing. Haně Lisé Ph.D. za pomoc při provedení experimentální části.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Základní vlastnosti paliva a proces spalování	12
1.1 Složení paliva.....	12
1.1.1 Hořlavina.....	12
1.1.2 Voda	13
1.1.3 Popelovina.....	13
1.2 Spalné teplo a výhřevnost	13
1.2.1 Spalné teplo	14
1.2.2 Výhřevnost	14
1.3 Spalování	14
1.3.1 Dokonalé spalování	14
1.3.2 Nedokonalé spalování	15
1.3.3 Spalování za přebytku vzduchu.....	15
2 Emise	16
2.1 Oxidy uhlíku CO _x	16
2.1.1 Oxid uhličitý CO ₂	16
2.1.2 Oxid uhelnatý CO.....	17
2.2 Oxidy dusíku NO _x	17
2.2.1 Oxid dusný N ₂ O	18
2.2.2 Oxid dusnatý NO.....	18
2.2.3 Oxid dusičitý NO ₂	18
2.3 Oxidy síry SO _x	19
2.3.1 Oxid siřičitý SO ₂	19
2.3.2 Oxid sírový SO ₃	19
2.4 Těkavé organické látky VOC	19
2.5 Polycyklické aromatické uhlovodíky PAU.....	20
2.6 Persistentní organické polutanty POP.....	20
2.6.1 Polychlorované dibenzo-p-dioxiny a polychlorované dibenzofurany	20
2.6.2 Polychlorované bifenyle PCB.....	20
2.7 Emise tuhých částic PM.....	21
2.8 Těžké kovy	22
3 Metody odběru spalin	23
3.1 Norská norma NS 3058:1994-2	23
3.2 Laboratorní simulace otevřeného spalování:	24
3.3 Vzorkování kouřové vlečky (vzorkovač Nomad).....	26
3.4 Měření v laboratoři	26
3.5 Použití velkoobjemového vzorkovače vzduchu	27
3.6 Výběr vhodné metody	28
4 Metody měření, analytické metody, emisní limity	29
4.1 Přehled norem a metod měření	29

4.1.1	Oxid uhelnatý.....	29
4.1.2	Oxidy dusíku.....	29
4.1.3	Oxidy síry	29
4.1.4	Kyslík.....	29
4.1.5	Uhlovodíky	30
4.1.6	Tuhé znečišťující látky	30
4.2	Měření spalin a výpočet CO dle ČSN EN 13229	30
4.3	Emisní limity	31
5	Experimentální měření	33
5.1	Přístroje	33
5.1.1	Měření PZL analyzátozem spalin Horiba	33
5.1.2	Měření jemných částic	34
5.2	Trat' odběru spalin	35
5.2.1	Plynné znečišťující látky PZL	35
5.2.2	Tuhé znečišťující látky TZL	36
5.2.3	Emise jemných tuhých částic PM.....	36
5.3	Vzorky	37
5.3.1	Rozbor paliva.....	38
5.4	Průběh měření.....	39
5.4.1	Měření na hromadě	39
5.4.2	Měření v sudu	39
5.4.3	Měření v krbových kamnech	40
6	Vyhodnocení	41
6.1	Koncentrace CO a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase.....	41
6.2	Koncentrace NO _x a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase	44
6.3	Koncentrace TOC a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase	46
6.4	Referenční průběh emisí (CO, NO _x , TOC) v závislosti na čase.....	49
6.5	Průměrná koncentrace plynných emisí.....	52
6.6	Tuhé znečišťující látky	53
6.7	Jemné částice PM _{0,5}	54
6.8	Další pozorování.....	57
	DISKUSE.....	58
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	70
	SEZNAM TABULEK.....	72
	SEZNAM PŘÍLOH.....	73

ÚVOD

Existuje několik metod nakládání se zahradním odpadem, nejčastější jsou však kompostování a spalování. Kompostování se považuje za nejekologičtější, avšak některé druhy zahradního odpadu nejsou k tomu vhodné. Například listy ořechových stromů a větve. Nejjednodušší ale méně ekologické nakládání s takovým odpadem je jejich spálení. Navíc energie, vyráběná tímto procesem se nikterak nevyužije. Dalším způsobem zpracování zahradního odpadu je výroba briket. Podle výrobce Leaf Log, brikety z listů mohou mít výhřevnost 27,84 MJ/kg. Tato hodnota je srovnatelná s výhřevností černého uhlí a koksu.

Spalování zahradního odpadu je špatné z několika faktorů. Prvním z nich je, že kvůli horší kvalitě paliva (vysoký obsah vlhkostí a popeloviny) nelze dosáhnout dokonalého spalování. Tím se zvyšuje množství emisí oxidu uhelnatého a organických látek, které jsou škodlivé pro zdraví. Dalším faktorem jsou podmínky spalování. Zahradní odpad se většinou spaluje buď na hromadě, nebo v sudu. Při takovém typu spalování vstupují další proměnné, například to, že vítr může výrazně ochlazovat proces spalování, a to vede k nárůstu emisí. Ve spalovně SAKO se odpad spaluje za teplot okolo 1000 °C [74], kterých nelze dosáhnout při spalování na hromadě. Třetím faktorem je to, že listy jsou přírodním filtrem, který očišťuje vzduch. Některé látky vzniklé spalováním zahradního odpadu podporují vznik globálního oteplování, porušení stratosférického ozónu a tvorby troposférického ozónu. Také obsahují v sobě těžké kovy. U některých z nich byly potvrzeny karcinogenní, mutagenní a teratogenní účinky.

Spalování listů je již zakázáno v některých státech USA, například Michigan [75], a v dalších zemích jako například Slovensko [76], Ukrajina [77], Kyrgyzstán, Kazachstán, Tádžikistán [78]. V České republice je povoleno spalovat pouze suchý rostlinný materiál, spalování vlhkého zahradního odpadu je zakázáno.

Touto bakalářskou prací bych chtěla přispět k prokázání škodlivosti spalování zahradního odpadu a k zpřísnění legislativy s ním spojené.

1 Základní vlastnosti paliva a proces spalování

Nejběžnější a nejrychlejší způsob likvidace zahradního odpadu je proces spalování, avšak není ekologický. Při spalování na volném prostranství, jako například na hromadě se nedá docílit dokonalých podmínek, proto vzniká velké množství znečišťujících látek škodlivých pro zdraví a okolní prostředí. Navíc energie, vyráběná tímto procesem se nikterak nevyužije.

Dalším problémem zahradního odpadu je jeho složení. Čerstvý zahradní odpad má velké procento obsahu vody a po uležení může začít hnit. To způsobuje snížení výhřevnosti paliva a zvýšení obsahu vzniklých škodlivých látek.

1.1 Složení paliva

Důležitým faktorem při spalování biomasy je její složení. Příznivým složením se dá ovlivnit množství i kvalitu spalin.

Složení tuhého paliva se dá popsat dvěma základními rozbory:

- Hrubý rozbor
- Prvkový rozbor

Hrubým rozбором se určuje poměr obsahu vody (W), popelovin (A) a hořlaviny (h) [2]. Index r značí, že se jedná o hmotnostní obsahy v surovém palivu. Platí:

$$h + A^r + W^r = 100 \% \quad (1)$$

Prvkový rozbor určuje jednotlivé chemické prvky, ze kterých se skládá hořlavina.

1.1.1 Hořlavina

Hořlavina obsahuje aktivní prvky, jako jsou uhlík, vodík, síra, jejichž oxidací se uvolňuje teplo, a pasivní prvky, jako jsou dusík, kyslík [1].

$$C + H_2 + S + N + O_2 = 1 \left(\frac{kg}{kg} \right) \quad (2)$$

Důležitou součástí hořlaviny je její prchavý podíl. Ten se uvolňuje z paliva při teplotě vyšší než 250 °C v podobě hořlavých plynů [2]. Obsah prchavého podílu závisí na stáří paliva a má vliv na rychlost vznícování a dobu hoření [1]. Z tabulky 1-1 je patrné, že biomasa má vyšší podíl prchavé hořlaviny než fosilní tuhá paliva.

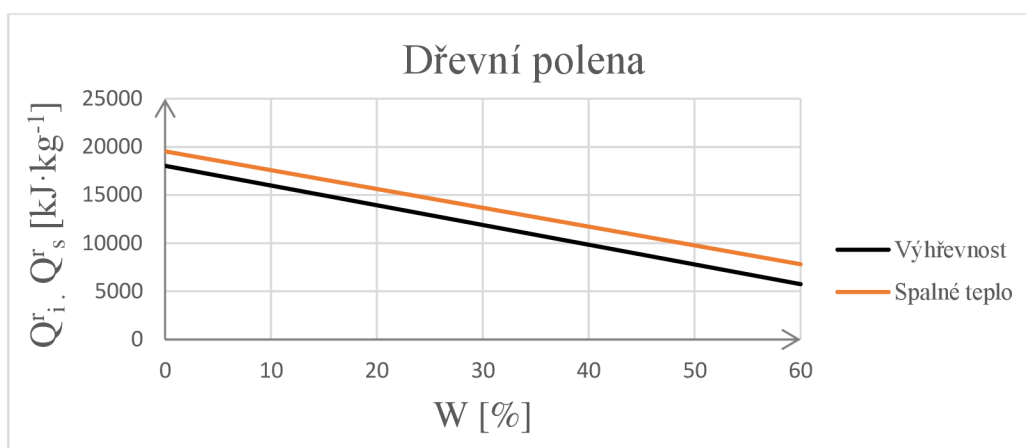
Tab. 1-1 Výhřevnost a obsah prchavé hořlaviny některých paliv [3]

Palivo	Výhřevnost [MJ/kg]	Prchavá hořlavina [%]
Koks	28,5	1,5
Černé uhlí	28	20
Hnědé uhlí	17	55
Dřevo	18	75
Sláma	16	80

Podíl prchavé hořlaviny se stanoví sedmiminutovým žiháním tuhého paliva bez přístupu vzduchu za teploty $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po vyžhání zůstává převážně tuhý uhlík [65, 2].

1.1.2 Voda

Voda v palivu má negativní dopad na proces spalování. Její vysoký obsah snižuje výhřevnost (spalné teplo) paliva, což se dá pozorovat v grafu na obrázku 1-1 na příkladu dřevních polen.



Obr. 1-1 Závislost výhřevnosti a spalného tepla na obsahu vody v palivu ¹

Při zahřívání paliva nejprve dochází k odpařování vody, která odchází spaliny ve formě vodní páry, čímž se zvětšuje objem spalin. Při spalování voda pohlcuje část uvolněného tepla, tímž se snižuje spalovací teplota a kvalita spalování [2].

Obsah vody v biomase lze snížit sušením. Na rozdíl od uhlí biomasa může navlhnout i po vysušení, tento proces se nazývá hygroskopie [4].

1.1.3 Popelovina

Popelovinu v tuhém palivu tvoří minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany a další) obsazené v palivu před jeho spálením. Spálením vzniká z popeloviny tuhý zbytek, kterému se říká popel [2].

Ve srovnání s fosilním palivem, biomasa má nižší obsah popelovin [2], proto se při spalování biomasy tvoří méně emisí tuhých znečišťujících látek [63, 64]. Dalším nežádoucí vlastností zvýšeného obsahu popela je to, že může oddělovat hořlavé složky od paliva a ty pak neshoří. Důsledkem pak je snížení výhřevností paliva [63].

Voda a popelovina v tuhém palivě se nazývá přítěž nebo balast [1].

1.2 Spalné teplo a výhřevnost

Spalné teplo a výhřevnost jsou důležitými charakteristikami paliv.

¹ Graf byl sestaven dle dat uvedených zde [6] a vzorců uvedených zde [7].

1.2.1 Spalné teplo

«Spalné teplo Q_S^r ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) je množství tepla, které se uvolní dokonalým spalováním 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C. Při této teplotě kondenzuje vodní para vzniklá z obsahu vody v palivu a ze spalného vodíku» [1, cit.]. Spalné teplo se určuje pomocí kalorimetru.

1.2.2 Výhřevnost

«Výhřevnost Q_i^r ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) je množství tepla, které se uvolní dokonalým spalováním 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, ale vzniklá pára nekondenzuje, zůstává ve formě páry» [2, cit.].

Výhřevnost je tedy spalné teplo, zmenšené o kondenzační teplo a určuje se dle vzorce [2]:

$$Q_i^r = Q_S^r - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (3)$$

W^r [-] je obsah vody v palivu

r [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je kondenzační teplo vody, $r = 2,454 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

H_2 [-] je obsah vodíku v surovém palivu

Graf na obrázku 1-1 znázorňuje rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností na příkladě dřevních polen.

1.3 Spalování

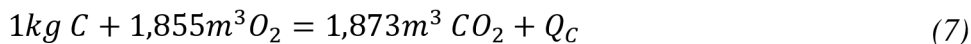
Spalování je proces, při kterém probíhají složité fyzikální a chemické děje v jejichž důsledku se uvolňuje teplo. K fyzikálním dějům patří například směšování paliva s okysličovadlem, kterým je nejčastěji vzduch, rychlost proudění směsi, iniciace plamene. Chemickým dějem je například syntéza hořlavých prvků s okysličovadlem při které vzniká CO a CO₂. Spalování se popisuje stechiometrickými rovnicemi [1].

1.3.1 Dokonalé spalování

Dokonalé spalování je teoretickým modelem spalování. Při dokonalém spalování celý uhlík zoxiduje na oxid uhličitý, vodík na vodní páru, síra na oxid siřičitý. To znamená, že chemická energie obsazená v palivu se mění na tepelnou energii bez tepelných ztrát. Prakticky se lze přiblížit k dokonalému spalování, vyšší účinností spalovacího procesu a lepší kvalitou paliva. Dokonalé spalování se popisuje rovnicí [1]:



Pomocí těchto rovnic se určuje potřebný objem okysličovadla pro spálení 1 kg tuhého paliva a objem vzniklých spalin. Například pro spálení 1 kg uhlíku je zapotřebí 1,865 m³ kyslíku a vznikne 1,855 m³ CO₂ a uvolní se 33,8 MJ tepla [2, cit.].



1.3.2 Nedokonalé spalování

Při nedokonalém spalování na rozdíl od dokonalého dochází k tepelným ztrátám. Pro tento typ spalování se spotřebuje jen poloviční objem okysličovadla, a proto nedochází k úplné oxidaci paliva až na konečné produkty. Pak spaliny obsahují hořlavé plyny oxidu uhelnatého, vodíku, metanu a dalších uhlovodíků, které vznikají nevypálením hořlaviny ze škváry, strusky a popela [1,2].

Nedokonalé spalování je popsáno stechiometrickým vztahem:



$$1 \text{ kg } C + 0,932 \text{ m}^3 O_2 = 1,873 \text{ m}^3 CO + Q_C \quad (9)$$

Tato rovnice říká, že pro spálení 1 kg uhlíku se spotřebuje jen poloviční objem kyslíku 0,932 m³ a vznikne 1,873 m³ CO a uvolní se 12,64 MJ tepla, což je 2,67krát méně, než při dokonalém spalování [2].

1.3.3 Spalování za přebytku vzduchu

Prakticky pro dokonalé spalování nestačí přivádět pouze teoretické množství okysličovadla, proto se přivádí větší množství vzduchu než teoretické.

$$V_{VZ sk} = \alpha \cdot V_{VZ min} \quad (10)$$

α [-] je součinitel přebytku vzduchu,

$V_{VZ sk}$ [m³_v·kg⁻¹_{pal}] je množství vzduchu zvětšené o koeficient α ,

$V_{VZ min}$ [m³_v·kg⁻¹_{pal}] je minimální množství vzduchu.

Každé spalování, aby bylo dokonalé, musí probíhat za přebytku vzduchu, to znamená, že součinitel přebytku vzduchu alfa musí být větší než 1. Optimální hodnoty součinitelů vzduchu závisí na typu ohniště a druhu spalovaného paliva. Obvyklé hodnoty součinitele α jsou v rozmezí 1,01-2,2 [1,2]. Za těchto podmínek by měl o palivo shořet dokonale, avšak ve spalinách ještě zůstane nevyužitý kyslík, který se pak za vyšších teplot slučuje s dusíkem za vzniku oxidů dusíku.

2 Emise

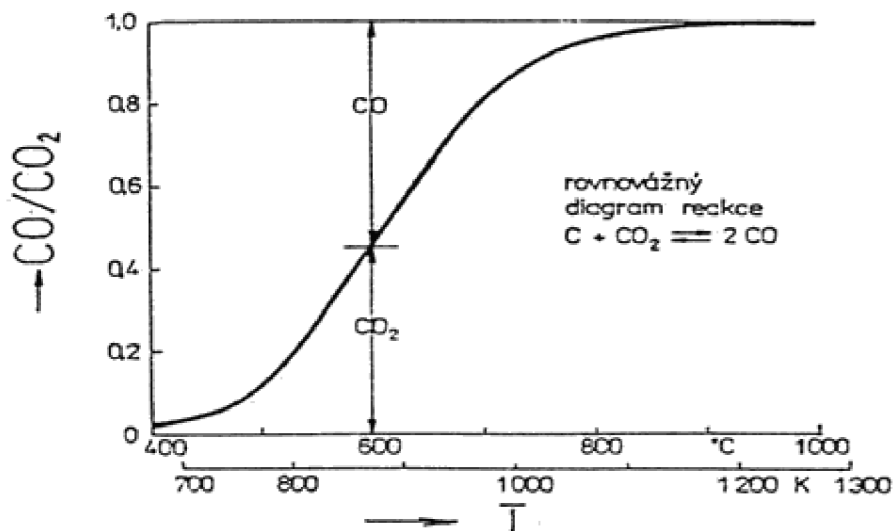
Znečištění ovzduší představuje velkou hrozbu pro zdraví a klima. Znečištění ovzduší způsobuje každoročně asi sedm milionů předčasných úmrtí na celém světě, zejména v důsledku zvýšené úmrtnosti na mrtvici, srdeční choroby, chronická obstrukční plicní onemocnění, rakovinu plic a akutní respirační infekce [8]. Zvyšuje se koncentrace skleníkových plynů v atmosféře, což způsobuje ohřívání planety.

Mezi hlavní zdroje vnějšího znečištění patří motorová vozidla, výroba energie, vytápění budov, zemědělství, spalování odpadu a průmysl [9].

Spalování biomasy je zdrojem jak tuhých znečišťujících látek, jako jsou emise jemných částic a těžkých kovů, tak i plyných emisí, jako jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD), polychlorované dibenzofurany (PCDF), polychlorované bifenyly (PCB), těkavé organické látky (VOC) a oxidy uhlíku, dusíku a síry.

2.1 Oxidy uhlíku CO_x

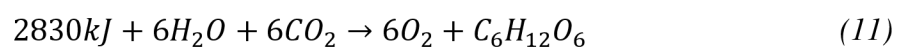
Při spalování mohou vzniknout dva druhy oxidů uhlíku, a to oxid uhelnatý CO a oxid uhličitý CO₂. Jejich vznik závisí na dokonalosti procesu spalování. Na obrázku 2-1 je znázorněna závislost poměru CO a CO₂ na teplotě při dostatečném množství oksyločvadla.



Obr. 2-1 Rovnovážný diagram reakce $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ [10]

2.1.1 Oxid uhličitý CO₂

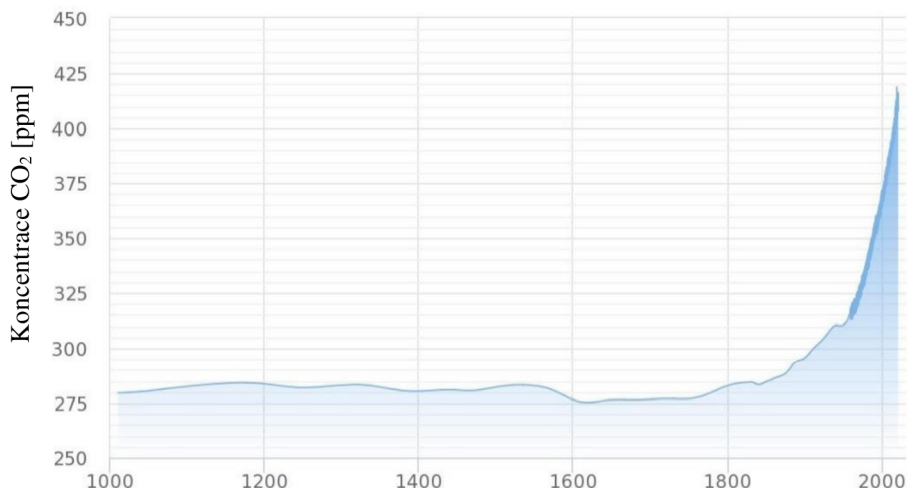
Při růstu biomasy, se oxid uhličitý odebírá z atmosféry a pomocí fotosyntézy se přeměňuje na organické sloučeniny a kyslík. Vznik glukózy a produkce kyslíku probíhá podle rovnice 11 [11]:



Opakem fotosyntézy je proces hoření. CO₂ vzniká při dokonalém spálení uhlíku obsazeného v palivu prostřednictvím kyslíku obsaženým ve vzduchu (viz rovnice 4).

Oxid uhličitý, který vytvoří biomasa v procesu hoření, bude v ideálním případě absorbován při růstu nových rostlin. Z toho důvodu se biomasa dá považovat za uhlíkově neutrální palivo.

Oxid uhličitý skleníkový plyn, jehož zvýšené množství způsobuje skleníkový efekt. Světová meteorologická organizace uvádí, že koncentrace CO_2 v roce 2018 dosáhla hodnot 407.8 ± 0.1 ppm a v roce 2019 dále stoupala [12]. Na obrázku 2-2 je zobrazen průběh koncentrace CO_2 v průběhu let.



Obr. 2-2 Koncentrace CO_2 v průběhu let [ppm] [13]

CO_2 je základní jednotkou potenciálu globálního oteplování (PGO). PGO je měřítkem toho, kolik energie absorbuje skleníkový plyn za dané časové období ve srovnání s oxidem uhličitým. Čím větší je PGO, tím více daný plyn zahřívá Zemi ve srovnání s CO_2 za dané časové období [15].

2.1.2 Oxid uhelnatý CO

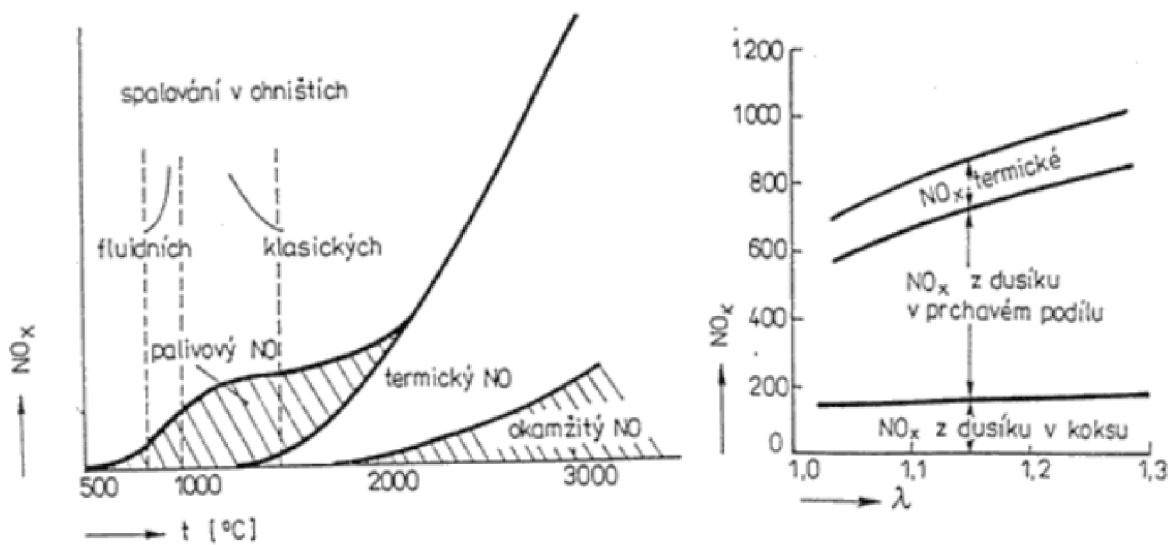
Oxid uhelnatý vzniká při nedokonalém spalování uhlíku, obsaženého v palivu. CO je škodlivý pro zdraví, může se vázat se místo kyslíku na krevní barvivo hemoglobin a poté putuje krví k orgánům, které potřebují kyslík. Tím může způsobit například kardiovaskulární potíže. [10]

Emisní limit pro oxid uhelnatý je u spalovacích procesů obecně velmi přísný nejen proto, že je tento plyn škodlivý pro zdraví. Důvodem této přísnosti je především to, že nízká emise CO zaručuje nízké množství organických látek ve spalinách [10].

2.2 Oxidy dusíku NO_x

Suma oxidů dusíku NO_x zahrnuje oxidy NO, N_2O_2 , N_2O , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4 a N_2O_5 . Oxidy dusíku se dělí na tři skupiny, podle teplotního spektra, v jakém vznikají (obr. 2-3). Jsou to termické NO_x , palivové NO_x a promptní NO_x [10].

- Promptní (okamžité) – vznikají v nejvyšších teplotách v počáteční fázi hoření
- Termické – vznikají z dusíku obsaženého ve vzduchu v oblasti teplot nad 1100°C .
- Palivové – vznikají z dusíku obsaženého v hořlavině paliva



Obr. 2-3 Vliv teploty na tvorbu jednotlivých typů oxidů dusíku [10]

Při spalování zahradního odpadu se nepředpokládá, že se dosáhne teplot nad 1100 °C, proto se očekává vznik jenom palivových oxidů dusíku: N₂O, NO a NO₂, z nichž pouze druhé dva jsou zatím považovány za znečišťující látky.

Obsah dusíku v základním palivu není dostatečným ukazatelem množství emisí NO_x. Emise NO_x biomasy se snižují se zvýšením obsahu vápníku a hořčíku, protože přítomnost oxidu vápenatého a oxidu hořečnatého v palivu může vést ke snížení NO [14].

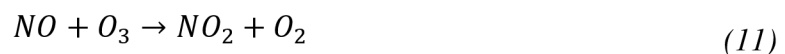
2.2.1 Oxid dusný N₂O

Oxid dusný, známý jako "rajský plyn", je skleníkový plyn, který vzniká při nízkoteplotním spalování. N₂O má PGO 265–298krát vyšší než CO₂ po dobu 100 let [10, 15].

2.2.2 Oxid dusnatý NO

Oxid dusnatý tvoří největší zastoupení skupiny oxidů dusíku ve spalinách. U výkonnějších kotlů, NO tvoří přibližně 95 % oxidů dusíku [16].

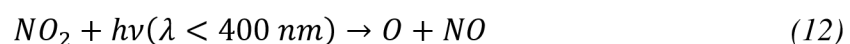
Ve stratosféře, za přítomnosti UV záření, oxid dusnatý oxiduje na oxid dusičitý a tím dochází k úbytku stratosférického ozónu [17].



2.2.3 Oxid dusičitý NO₂

Oxid dusičitý je nejrozšířenější oxid skupiny NO_x v atmosféře [18]. NO₂ je nebezpečný pro zdraví, je to toxický plyn, který při vyšších koncentracích způsobuje zánět dýchacích cest [19].

NO₂ reaguje v atmosféře působením ultrafialového záření ($\lambda < 400 \text{ nm}$) za vzniku troposférického ozónu, který způsobuje fotochemický smog a kyselý déšť [18, 20].



Nadměrný ozón ve vzduchu může mít výrazný vliv na lidské zdraví. Může způsobit dýchací potíže, spouštět astma, omezit funkci plic a způsobit plicní onemocnění [19].

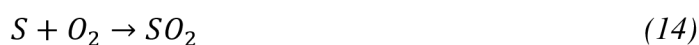
NO₂ je hlavním zdrojem dusičnanových aerosolů, které tvoří důležitou frakci PM_{2,5} za přítomnosti ultrafialového záření ozónu [19].

2.3 Oxidy síry SO_x

Nejvýznamnějším oxidem síry ve spalovacích procesech je oxid siřičitý SO₂. Oxid sírový SO₃ vzniká oxidací SO₂.

2.3.1 Oxid siřičitý SO₂

Oxid siřičitý se do ovzduší se dostává hlavně spálením paliv, která obsahují síru. SO₂ je přítomný v sopečných plynech [21].



V ovzduší za přítomnosti iontů kovů se oxid siřičitý oxiduje na oxid sírový SO₃ [21].



Množství SO₂ závisí na obsahu zásad a kovů alkalických zemin v palivu. Bylo zjištěno, že emise oxidu siřičitého klesají s nárůstem vápníku a draslíku nad poměrem síry [14].

SO₂ působí na dýchací systém a funkce plic. Přijetí nemocnic pro srdeční choroby a úmrtnost se zvyšuje ve dnech s vyššími hladinami SO₂ [19].

Oxid siřičitý je toxický pro rostliny, protože reaguje s chlorofylem, čímž narušuje fotosyntézu [23].

2.3.2 Oxid sírový SO₃

Oxid sírový není přímým produktem spalování. SO₃ vzniká oxidací oxidu siřičitého.



Oxid sírový reaguje s vodou za vzniku kyseliny sírové, ta je hlavní složkou kyselého deště, která je příčinou odlesňování [19].



V kyselině sírové se rozpouští kovy za vzniku síranu. Sírany tvoří hlavní podíl kyselé složky pevného a kapalného aerosolu [21].

2.4 Těkavé organické látky VOC

Těkavé organické látky (VOC – volatile organic compound) jsou organické chemické sloučeniny, jejichž složení jim umožňuje odpařovat se za normálních vnitřních atmosférických podmínek teploty a tlaku. VOC je jakákoli organická sloučenina, která má počáteční bod varu menší nebo rovný 250 °C, měřeno při standardním atmosférickém tlaku 101,3 kPa [28].

Spalování biomasy je považováno za jeden z hlavních zdrojů emisí znečištění ovzduší a potenciální nepříznivé účinky těkavých organických sloučenin hlavně v zimním období [30]. Organické látky, tedy i VOC, mohou vznikat ve spalinách vytvořených v důsledku nedokonalého spalování. Hlavní část organického materiálu, která se nachází v jemných částicích, obvykle kondenzuje při teplotě pod 500 °C. V závislosti na okolních podmínkách mohou být organické částice přítomny v kapalně nebo plynné formě [27].

Mnoho VOC tvoří přízemní ozón v reakci se zdroji molekul kyslíku, jako jsou oxidy dusíku (NO_x) a oxid uhelnatý (CO) v atmosféře v přítomnosti slunečního světla [28].

Jedním z nejdůležitějších VOC je metan, který je také velmi silným skleníkovým plynem. CH₄ má PGO 28-36krát vyšší než CO₂ po dobu více než 100 let [15]. Dalším důležitým VOC je například benzen. Benzen je velmi toxická látka. Při dlouhodobé expozici může způsobovat například leukémii [29].

2.5 Polycyklické aromatické uhlovodíky PAU

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU, z angličtiny PAH) jsou organické tuhé látky s nejméně dvěma benzenovými jádry [31]. PAU mohou vznikat z nedokonalého spalování materiálů obsahujících uhlík. Většina PAU v ovzduší vzniká při spalování tuhých paliv v domácnostech a také ve spalovacích motorech [32].

Řada látek ze skupiny polycyklických aromatických uhlovodíků jsou nebezpečné pro zdraví, protože vykazují mutagenní a karcinogenní účinky [33].

Nejprozkoumanější z PAU je benzo[a]pyren. B[a]P je polycyklický aromatický uhlovodík s pěti benzenovými kruhy. Vzniká při jakýmkoliv nedokonalém spalování tuhých paliv při teplotách 300 až 600 °C. B[a]P má silně karcinogenní a mutagenní účinky. Tato látka se může dostat do organismu vdechnutím a prostupuje i pokožkou [31, 34].

2.6 Persistentní organické polutanty POP

Persistentní organické polutanty jsou látky, které vykazují toxické vlastnosti a dokážou se koncentrovat v organismu. POP jsou velmi stabilní látky, a proto mohou být v ovzduší transportovány na velké vzdálenosti, i do odlehlých oblastí, například do Arktidy nebo Antarktidy. Dokážou se hromadit v organismu [35].

Vznikají při spalování organických látek za přítomnosti chloru. V ovzduší mohou být přítomny v plynné fázi, nebo absorbované na povrchu jemných částic [35].

2.6.1 Polychlorované dibenzo-p-dioxiny a polychlorované dibenzofurany

Polychlorované dibenzo-p-dioxiny a polychlorované dibenzofurany (PCDD a PCDF) jsou vysoce toxické sloučeniny obsahující ve svých molekulách atomy uhlíku, vodíku, kyslíku a chloru [36].

PCDD a PCDF jsou velmi nebezpečné pro zdraví a životní prostředí. Mohou způsobit poškození imunitního systému, rakovinu a poškození reprodukčních funkcí [36].

2.6.2 Polychlorované bifenyly PCB

Polychlorované bifenyly jsou organické látky, u nichž jsou vodíkové atomy na molekule bifenyly nahrazeny v různé míře a v různých místech atomy chloru. Teoreticky může existovat 209 jednotlivých sloučenin, které se liší fyzikálními a chemickými vlastnostmi i toxicitou [37]. Výroba PCB byla zakázána v 70. letech z důvodu jejich škodlivých účinků a perzistence [32].

2.7 Emise tuhých částic PM

PM částice (z angličtiny particulate matter, tuhé znečišťující látky, atmosférické aerosoly, poletavý prach, jemný prach, suspendované částice) jsou směs částic pevného a kapalného skupenství suspendovaných v ovzduší. Hlavními složkami PM jsou sírany, dusičnany, amoniak, chlorid sodný, černý uhlík, minerální prach a voda. V tomto experimentu [24] bylo zjištěno, že při spalování dřeva částice PM₁, uvolňované z paliva, obsahovaly převážně prvky, jako je draslík, síra, chlór. PM částice mohou obsahovat také těžké kovy a jsou nositele i organických látek, jako jsou VOC a PAU [19].

Dle normy ČSN EN ISO 16890 [25] se částice rozdělují podle velikosti následujícím způsobem:

- **ISO Coarse** – hrubé nečistoty
- **ISO PM₁₀** – částice menší, než 10 mikrometrů. Tyto částice se dostanou do horních cest dýchacích.
- **ISO PM_{2,5}** – částice menší, než 2,5 mikrometrů. Tyto částice se dostanou do dolních cest dýchacích.
- **ISO PM₁** – částice menší, než 1 mikrometrů. Tyto částice se mohou dostat až do krevního oběhu.

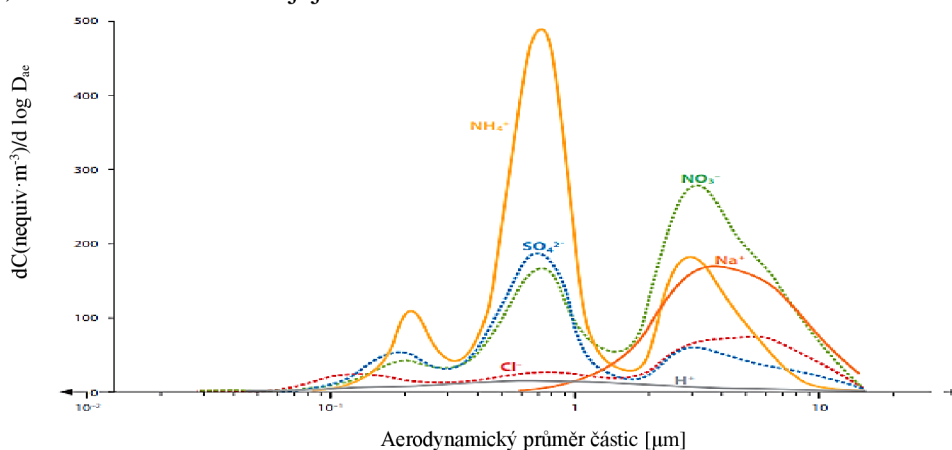
Zdrojem pevných částic může být přírodní proces (výbuch sopky, lesní požár) a také lidská činnost. Spalování je hlavním antropogenním zdrojem jemných částic PM [26].

Aerosolové částice lze rozdělit do dvou kategorií, jako jsou primární a sekundární částice. Primární částice se vytvářejí při vysokých teplotách ve spalovací zóně a sekundární částice se tvoří v oblaku spalin nebo v atmosféře [27].

Měření kvality ovzduší se obvykle uvádí jako denní nebo roční průměrné koncentrace částic PM₁₀ a PM_{2,5} na krychlový a metr objemu vzduchu (m³). Rutinní měření kvality ovzduší obvykle popisují takové koncentrace PM v mikrogramech na metr krychlový (μg·m⁻³). [19]

PM částice jsou nebezpečné pro zdraví. Odhaduje se, že v roce 2016 způsobí znečištění ovzduší ve městech i ve venkovských oblastech 4,2 milionu předčasných úmrtí na celém světě ročně; tato úmrtnost je způsobena vystavením malým částicím PM_{2,5}, které způsobují kardiovaskulární a respirační onemocnění a rakoviny [19].

Zajímavým faktem o jemných částicích je, že mají tendenci se vyskytovat v určitém rozmezí velikostí. Na obrázku 2-4 lze pozorovat větší množství částic o velikostech 20 nm, 100 nm, 700 nm a 2500 nm a jejich složení.



Obr. 2-4 Závislost výskytu částic na jejich průměru [68]

2.8 Těžké kovy

Těžké kovy jsou toxické kovy, které mají hustotu větší než $4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. U některých těžkých kovů a jejich sloučenin byly potvrzeny karcinogenní, mutagenní a fetogenní účinky. K silně toxickým kovům patří As, Cd, Hg, Pb, Cr, Th a Ni. As, Be, Cd a Cr jsou karcinogenní [32, 38]. Dle [32] biomasa má vyšší koncentrací kovů s velkým vlivem na zdraví, jako je As, Cd, než uhlí.

V ovzduší jen některé těžké kovy mohou být přítomny v plynné fázi (například rtuť, méně často pak thalium, selen a arsen). Ostatní kovy jsou adsorbované nebo kondenzované na povrchu jemných částic [39].

Některé rostliny v sobě uchovávají těžké kovy z půdy. Množství těžkých kovů v biomase závisí na půdě, na které vyrostla biomasa a na druhu rostliny [4].

3 Metody odběru spalin

V této kapitole je uveden přehled některých metod, které se použily k měření emisí ze spalování. První metoda vychází z norské normy pro spalování v kotli. Tato metoda používá ředící tunel, který zvyšuje rychlost spalin a tím umožní izokinetický odběr vzorku [40].

Další metodou je laboratorní simulace otevřeného spalování, kde je použita místnost objemu 14-70 m³ [44, 47], ve které se uprostřed spaluje vzorek. Pro lepší simulaci otevřeného spalování se do místností přivádí vzduch. Následně se promíchává se spalinami pomocí ventilátorů umístěných kolem interiéru a štítu umístěného nad plamenem.

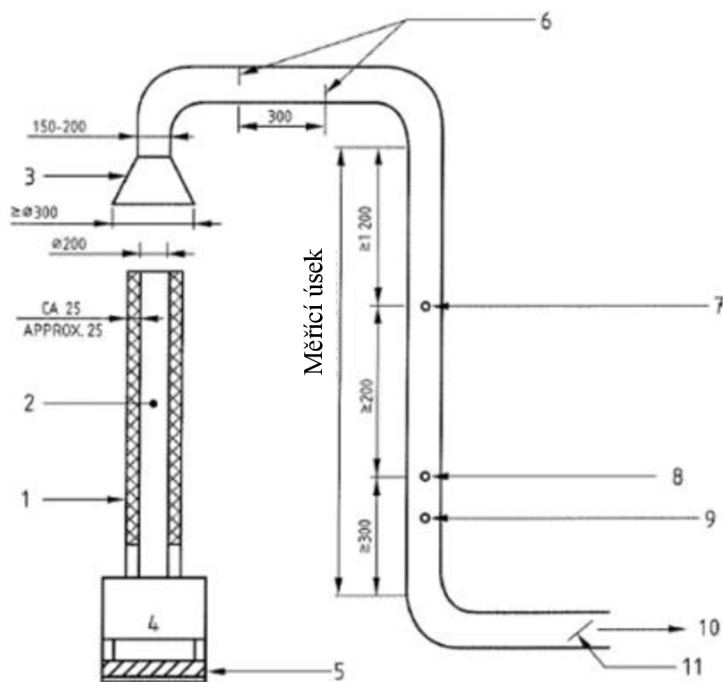
Třetí metoda používá ruční Nomad vzorkovač, jehož výhodou je možnost pohybu sondou během spalovacího procesu při změně směru větru.

Čtvrtá metoda je měření v laboratorních podmínkách. Výhodou této metody je jednoduchost provedení.

Poslední metoda zahrnuje použití velkoobjemového vzorkovače vzduchu. Podmínky spalování jsou identické, jak při běžném spalování na zahradě. Nevýhodou této metody je to, že experiment se nedá přesně opakovat. Další možnou nevýhodou je, že při změně směru větru je obtížné s přístrojem manipulovat.

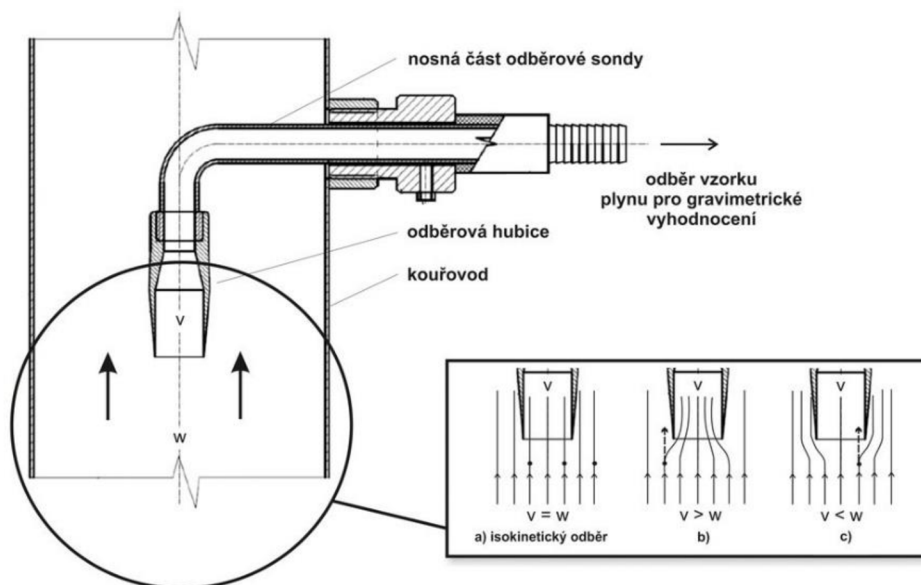
3.1 Norská norma NS 3058:1994-2

Schéma testovacího zařízení je znázorněno na obrázku 3-1. Spalovací zařízení je umístěno na váze, aby bylo možno odhadnout rychlost hoření. Od spalovacího zařízení se spaliny vedou izolovaným komínem s ředícím tunelem. Do trychtýře vstupují spaliny s okolním vzduchem. Dále ve vodorovném úseku se vzduch lépe promíchává pomocí překážek umístěných ve vzdálenostech 300 mm. V dalším úseku potrubí se nachází odběrová místa pro analýzu plynných složek spalin a místo pro odběr vzorku prachu [41].



Obr. 3-1 Schéma testovacího zařízení dle norské normy NS 3058:1994-2 [42]
(1. Izolace 2. Komín 3. Trychtýř 4. Spalovací zařízení 5. Váha 6. Překážky 7. Průtokoměr
8. PM a PAU měřič 9. CO a CO₂ měřič 10. Výstup spalin 11. klapkový ventil)

Použití ředícího tunelu zvyšuje rychlost spalin a tím umožňuje izokinetický odběr (obr. 3-2) vzorku spalin (rychlost odebíraného vzorku „ v “ je shodná s rychlostí spalin „ w “ v komíně). Rychlost spalin v komíně je příliš nízká ($0,5$ až $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a nařazením ji lze zvýšit na 4 až $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V případě, že rychlost vzorku spalin je výrazně vyšší než rychlost spalin v potrubí (případ b), větší částice se ztratí a výsledek měření pak vykazuje nižší hodnoty v porovnání s izokinetickým odběrem. V případě c) naopak větší částice se díky své setrvačnosti do ústí hubice dostanou a konečný výsledek měření je nadhodnocen oproti izokinetickému odběru [40].



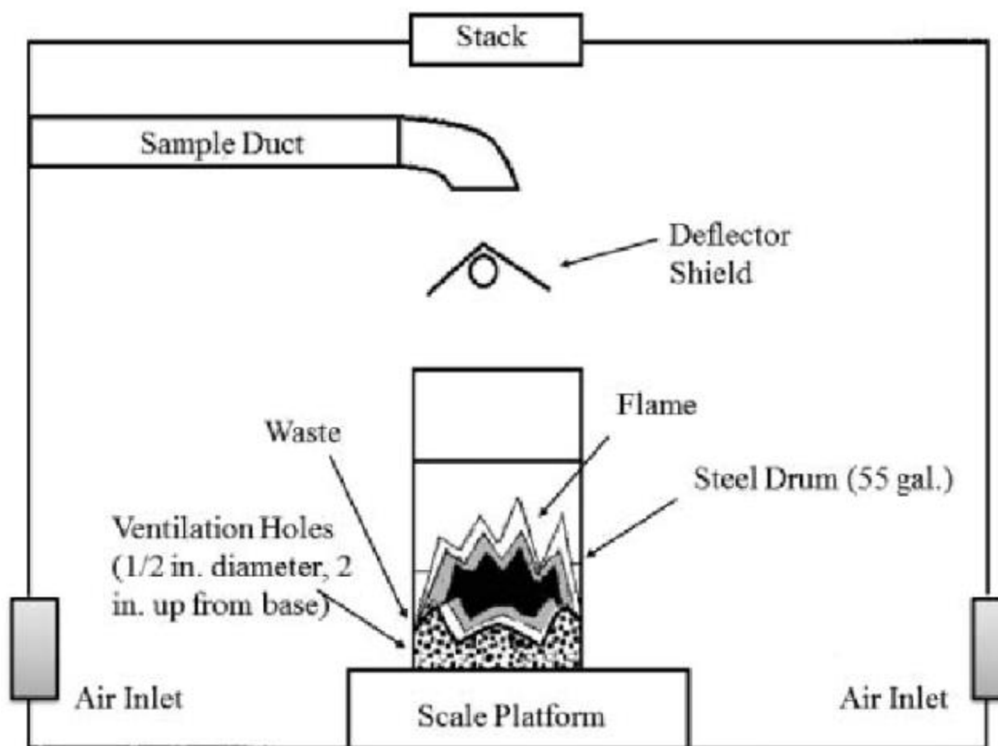
Obr. 3-2 Vliv izokinetiky na trajektorii tuhých částic během odběru [40]

3.2 Laboratorní simulace otevřeného spalování:

Národní výzkumná laboratoř pro řízení rizik v USA EPA má otevřené testovací zařízení pro spalování (z angličtiny Open Burning Test Facility – OBTF) umístěné v New Yorku. OBTF se používá pro několik testovacích programů pro vyhodnocení emisí z celé řady otevřených zdrojů spalování například ze spalování domácího odpadu v sudech, lesních požáru a zemědělského spalování [43].

OBTF (obr. 3-3) je uzavřené zařízení o objemu 70 m^3 [44] ve kterém dochází k nepřetržitému přívodu ředícího vzduchu, což simuluje ředění okolního prostředí. Venkovní vzduch se přivádí tak, aby se objem vzduchu v místnosti vyměnil jednou za minutu [45]. Ochranný štít umístěný nad spalovacím sudem chrání strop zařízení a zlepšuje okolní promíchávání vzduchu. Ventilátory umístěné kolem interiéru udržují vysokou úroveň míchání, aby se zvýšila recirkulace. Hořící hmota materiálu je položena na váze, takže lze odhadnout rychlost hoření [43].

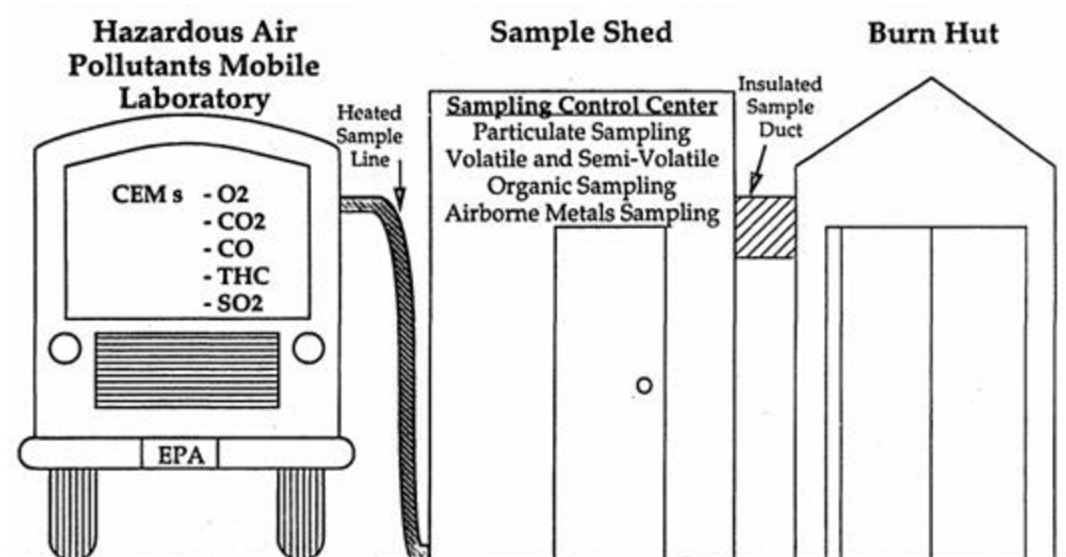
Zkušební nádoba, která se nachází uvnitř OBTF se skládá z ocelového sudu o objemu 208 l s 12 ventilačními otvory o průměru 2 cm rovnoměrně rozmístěných kolem základny [46].



Obr. 3-3 Laboratorní simulace otevřeného spalování, zařízení OBTF [43]

Podobná metoda byla použita zde [47]. Na rozdíl od předchozí metody objem zařízení byl přibližně 14 m^3 , vzduch se přiváděl rychlostí $34 \text{ m}^3 \cdot \text{min}$. Uprostřed byla umístěna spalovací kvádřová nádoba z nerezové oceli velikosti s délkou stěny $0,4 \text{ m}$.

Celý systém zkoumání emise v tomto experimentu. je zobrazen na obrázku 3-4. Ze spalovací části se spaliny vedou přes izolované potrubí do vzorkovací místnosti kde jsou umístěna zařízení pro měření PM částic, VOC a SVOC, těžkých kovů a přes vyhřívanou vzorkovací linku do mobilní laboratoři znečišťujících ovzduší [47].

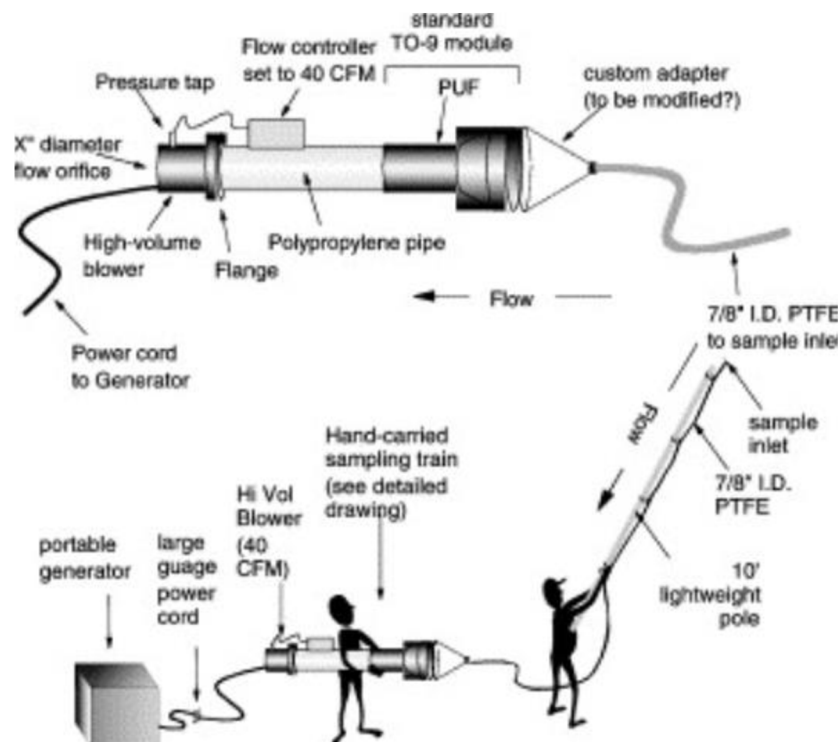


Obr. 3-4 Umístění testovacího zařízení [47]

3.3 Vzorkování kouřové vlečky (vzorkovač Nomad)

Přímé vzorkování kouřové vlečky je obtížné kvůli změnám směru větru, není snadné zachytit spaliny. US EPA v současné době vyvíjí ruční vzorkovač Nomad, který umožní vložit sací konec vzorkovací sondy přímo do kouřového oblaku, aniž by bylo nutné se extrémně blížit kouři nebo ohni. Obrázek 3-5 znázorňuje koncept vzorkovače Nomad [43].

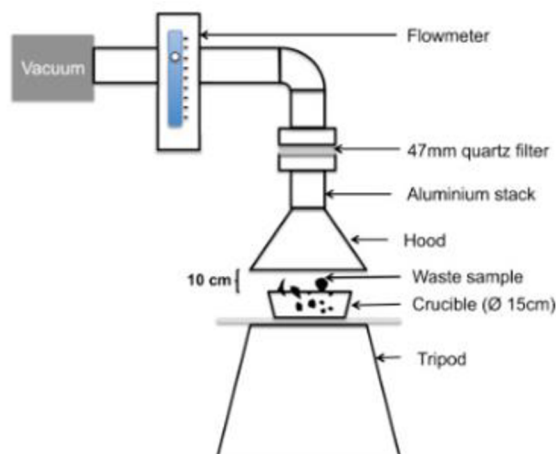
Nomad vzorkovač se skládá ze 3 m přenosný vzorkovací sondy, k ní pomocí adaptéru je připojena hlava TO9, obsahující sorpční trubičku PUF/XAD/PUF. Ta se prostřednictvím velkoobjemového vzorkovače s analyzátorů na SO_x a NO_x přivádí do malé patry s pěnou / sorbentem [48, 49].



Obr. 3-5 Odběr spalin vzorkovačem Nomad [43]

3.4 Měření v laboratoři

Laboratorní vzorkovač emisí ze spalování odpadu byl navržen a zkonstruován tak, jak je znázorněno na obrázku 3-6. Struktura zařízení sestávala z kuželového trychtýře připevněného k hliníkové komoře vybavené držákem filtru pro zachycení a udržení emitovaného PM částic. Průtokoměr byl spojen mezi držákem filtru a vakuovým čerpadlem pomocí ohebné hadice. Pod kuželovým vstupem byl umístěn kovový stativ, na kterém byl umístěn porcelánový kelímek se vzorkem hořícího odpadu. Zařízení bylo umístěno do laboratorní digestoře pro provádění experimentů spalování. Proud vzduchu aplikovaný vakuovou pumpou byl udržován při konstantní rychlosti ekvivalentní 40 l·min⁻¹ [50].

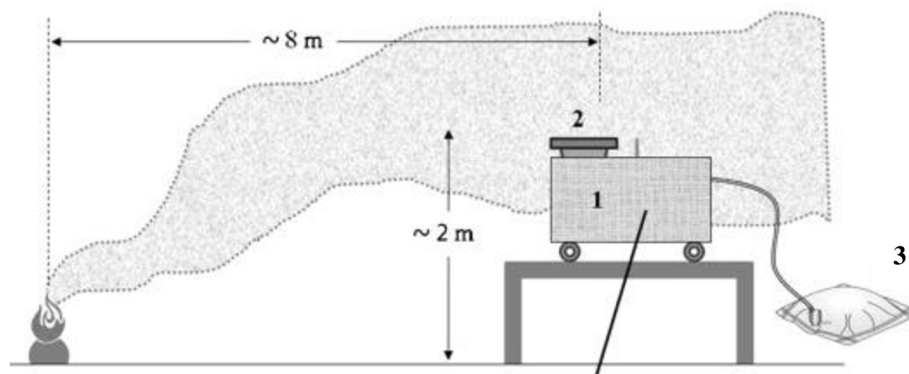


Obr. 3-6 Odběr spalin laboratorním vzorkovačem [50]

3.5 Použití velkoobjemového vzorkovače vzduchu

V tomto experimentu byly otevřeně spáleny tři druhy zemědělských a zahradních zbytků. Experiment byl prováděn v Portugalsku v září 2009 za mlhy (téměř 100 % relativní vlhkost vzduchu) [51].

Statický velkoobjemový vzorkovač (obr. 3-7) pracující s průtokem $1,13 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ byl použit k postupnému sběru hrubých ($\text{PM}_{2,5-10}$) a jemných ($\text{PM}_{2,5}$) částic kouře. Každé vypalování trvalo 30 až 60 minut. Teplota oblaku v místě vzorkování byla $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzorkovač byl umístěn asi 2 m nad zemí ve vzdálenosti od plamenu kolem 8 m. Tedlarový vak byl použit pro odběr vzorků plynu. [51].



Obr. 3-7 Schéma experimentálního uspořádání [51]

(1. Přenosný box, 2. Vzorkovač PM, 3. Tedlarový vak)

Velkoobjemový vzorkovač vzduchu pracující při průtoku $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ byl umístěn 5 m od ohně 1,2 m nad zemí, aby se získaly vzorky z jádra kouřového oblaku. Protože byly vzorky odebrány blízko povrchu země, ve středu oblaku, představují tyto výsledky čerstvě emitované aerosoly, které neměly čas podstoupit fyzikálně-chemické následné zpracování v atmosféře [52].

V tomto experimentu se spalovaly větve a listy listnatých stromů [53].

Při použití řízeného ohně byly vzorky vegetace spáleny na žhavé uhlíky. Vzniklý kouř byl shromážděn na organicky čistém filtru z křemenných vláken s použitím velkoobjemového

vzorkovače vzduchu umístěného přibližně 1,5 m diagonálně od plamene v kouřovém oblaku. Emise ze spalování biomasy jsou primárně jemné ($<2,0 \mu\text{m}$), proto nebyla učiněna žádná opatření k odstranění hrubých částic během vzorkování těchto testů hoření. Vzorek kouřové vlečky byl odebírán po dobu 5 min při průtoku sání $1,13 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ [53].

Měření hmotnosti bylo provedeno před a po spálení, aby se stanovila celková hmotnost spotřebovaného rostlinného materiálu [54].

3.6 Výběr vhodné metody

Za nejlepší se považuje metoda laboratorní simulace otevřeného spalování, popsána v kapitole 3.2. Avšak v České Republice neexistuje podobné zařízení. Nakonec bylo rozhodnuto měření provádět v terénu s použitím kuželového trychtýře (jako v metodách popsaných v kapitolách 3.1 a 3.4) umístěném blízko k plamenu. Pro jednoduchost výroby byl navržen svislý kouřovod, do kterého byly umístěny sondy pro odběr spalin.

4 Metody měření, analytické metody, emisní limity

Metody měření se dá dělit podle typu měření na kontinuální a diskontinuální.

- Kontinuální měření emisí: oxidy dusíku (NO_x), oxid siřičitý (SO₂), oxid uhelnatý (CO), tuhé znečišťující látky (TZL), celkový organický uhlík (TOC)
- Diskontinuální měření emisí: tuhé znečišťující látky (TZL)

4.1 Přehled norem a metod měření

4.1.1 Oxid uhelnatý

Pro stanovení oxidu uhelnatého ve spalinách se používá NDIR (nedisperzivní infračervená) spektrometrie, která je popsána normou ČSN EN 15058. Dále se používají FTIR (infračervené s Fourierovou transformací) analyzátoři [55].

4.1.2 Oxidy dusíku

Analyzátoři spalin zachycují molekuly oxidu dusnatého. Vzhledem k tomu, že NO je nestálá molekula a mění se na NO₂, musí se plyn zpracovávat, aby proběhla zpětná reakce. Plyn se vede do konvertoru, kde se oxid dusičitý redukuje na oxid dusnatý [56].

NO_x se stanoví [56, 57]:

- chemiluminiscenční metodou (ČSN EN 14792),
- metodami FTIR (infračervená s Fourierovou transformací) spektrometrie,
- NDIR (nedisperzivní infračervená) spektrometrie.

4.1.3 Oxidy síry

Pro stanovení SO_x/SO₂ ve spalinách uvolňovaných do atmosféry ze stacionárních zdrojů platí norma ČSN EN 14791. Tato norma popisuje systém odběru vzorků a 2 metody stanovení emisí: iontová chromatografie a Thorinová metoda [58].

Zdroj [58] uvádí tyto metody stanovení oxidů síry:

- semikontinuální coulometrické stanovení,
- plamenová emisní spektrometrie (chemiluminiscence),
- spektrální metody založené na detekci fluorescenčního záření,
- metody FTIR (infračervená s Fourierovou transformací) spektrometrie,
- metody NDIR (nedisperzivní infračervená spektrometrie).

4.1.4 Kyslík

Kyslík se stanovuje paramagnetickou metodou. Jeho změřené hodnoty jsou využívány pro přepočty na referenční obsah kyslíku ve spalinách dle normy ČSN EN 14789 [59].

Dalšími metody pro stanovení obsahu kyslíku jsou magneto-pneumatická, galvanická a metoda s použitím pevného elektrolytu, jehož základní součástí je oxid zirkoničitý (ZrO₂) [66, 67].

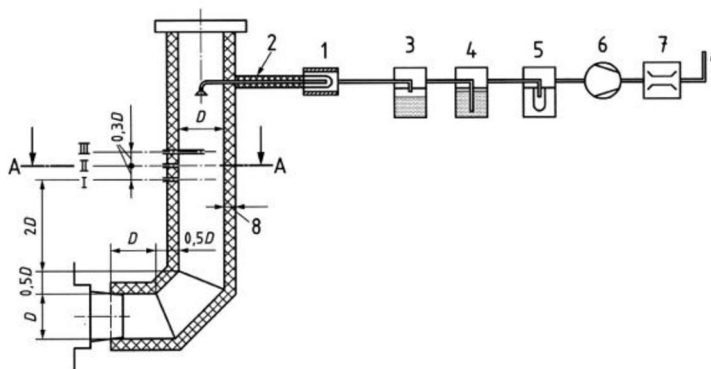
4.1.5 Uhlovodíky

Uhlovodíky (TOC nebo OGC) se stanoví pomocí plynové chromatografie s plamenoionizační (FID) detekcí.

4.1.6 Tuhé znečišťující látky

Metody stanovení TZL u stacionárních zdrojů emisí jsou popsány v normě ČSN EN 13284 kde první část je věnována manuální gravimetrické metodě a druhá automatizovaným měřicím systémům.

Manuální gravimetrická metoda spočívá v zachycení prachových částic na vhodných filtrech a jejich následným zvážením. Teplota sušení filtrů by měla být nejméně 110 °C. Schéma zařízení pro odběr vzorků spalin je zobrazeno na obr. 4-1. Vzorek spalin je odebírán odběrovou sondou a prachové částice jsou zachycovány na vhodném filtru. Z filtru spaliny vedou přes odlučovač vody a silikagelový filtr, kde dochází k odstranění vody obsažené ve spalinách. Dále následuje zvláště jemný filtr, který zachycuje nejjemnější pevné částice. Průtokoměr, umístěný na konci trati měří množství odebraných spalin [60].



Obr. 4-1 Schéma zařízení pro odběr vzorků spalin [60]

(1. Filtr, 2. Odběrová sonda s tepelnou izolací, 3. Odlučovač vody, 4. Silikagelový filtr, 5. zvláště jemný filtr, 6. čerpadlo, 7. průtokoměr ... I úsek pro měření tahu, II úsek pro měření teploty, III úsek pro měření obsahu kouře ve spalinách)

K dalším, blíže nerozebíraným možnostem měření, patří optické prachoměry pracujícími na principu rozptylu laserového paprsku, záchyt TZL v elektroodlučovači, triboelektrické prachoměry, atd [61].

4.2 Měření spalin a výpočet CO dle ČSN EN 13229

Měřicí úsek musí být zaizolován a opatřen přístroji [62]:

- pro zjišťování teploty (např. termoelektrický článek),
- pro měření statického tlaku,
- pro složení spalin (odsávací pyrometr).

Vstupní hrdlo odsávacího pyrometru se připojí k analyzátoru spalin. Objemová koncentrace spalin O₂ a teplota okolního prostředí a spalin se měří buď průběžně nebo nejvýše v 1 min intervalech. Koncentrace CO se vypočítá ze vzorce [62]:

$$\text{Koncentrace CO} = CO_{avg} \cdot \frac{21 - O_{2 \text{ standardized}}}{21 - O_{2 \text{ avg}}} \quad (18)$$

CO_{avg} [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$] je průměrná koncentrace oxidu uhelnatého

$O_{2 \text{ avg}}$ [%] je průměrná koncentrace kyslíku

$O_{2 \text{ standardized}}$ [%] je srovnávací koncentrace kyslíku (10 %)

4.3 Emisní limity

V normě EN 303-5 jsou kotle rozdělené na třídy podle emisních limitů CO, TOC a prachu, které musí kotle plnit. Předchozí norma stanovila emisní třídy 1 až 3. V roce 2012 se norma obnovila, zrušily se emisní třídy 1 a 2 a přidaly se emisní třídy 4 a 5.

Tab. 4-1 Mezní hodnoty emisí pro ruční dodávku biopaliva dle normy ČSN EN 303-5 [60]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí								
			CO			TOC			prach		
			mg·m ⁻³ při 10 % O ₂ ^a								
			třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
3	4	5	3	4	5	3	4	5			
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		

^a Vztahuje se k suchým spalinám, 0 °C, 1 013 mbar.

Tabulka 4-2 uvádí emisní limit koncentraci oxidu uhelnatého ve spalinách (1,0 % obj. k referenčnímu obsahu kyslíku ve spalinách 13 %) pro topidla bez teplovodního výměníku dle norma ČSN EN 13229 [62]. Pro jednodušší vyhodnocení výsledků se koncentrace CO v procentech přepočítají na mg·m⁻³ a referenční kyslík 10 %.

Tab. 4-2 Třídy emisí CO pro interiérová topidla dle normy ČSN EN 13229 [62]

Třída CO spotřebiče	Spotřebiče s uzavřenými dvířky	
	Mezní hodnoty tříd emisí CO v procentech (při 13 % O ₂)	Přepočtené hodnoty tříd emisí CO na mg·m ⁻³ (při 10 % O ₂)
Třída 1	≤ 0,3	≤ 5 156
Třída 2	> 0,3 ≤ 1,0	> 5 156 ≤ 17 188

Pro přepočet na mg·m⁻³ se použije vzorec z normy ČSN EN 13229 [62]:

$$CO_{avg} (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = CO_{avg} (\% \text{ obj.}) \cdot d_{CO} \cdot 10\,000 \quad (19)$$

d_{CO} je hustota oxidu uhelnatého při srovnávacích podmínkách [$d_{CO} = 1,25 (kg \cdot m^{-3})$].

Dosázení limitní hodnoty:

$$1,0 \% \cdot 1,25 (kg \cdot m^{-3}) \cdot 10\,000 = 12\,500 (mg \cdot m^{-3})$$

Následně se hodnoty přepočítají na referenční obsah kyslíku ve spalinách 10 % dle vzorce 18 a zaokrouhlí se na celé číslo:

$$\text{Koncentrace CO} = CO_{avg} \cdot \frac{21 - O_{2\,standardized}}{21 - O_{2\,avg}}$$

$$12\,500 \cdot \frac{21 - 10}{21 - 13} = 17\,188 (mg \cdot m^{-3})$$

Od 1.1.2020 platí směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva. Tato směrnice zakazuje prodej kotlů 4. třídy a nižší. Navíc jsou v ni uvedeny limity sumy oxidů dusíku [69].

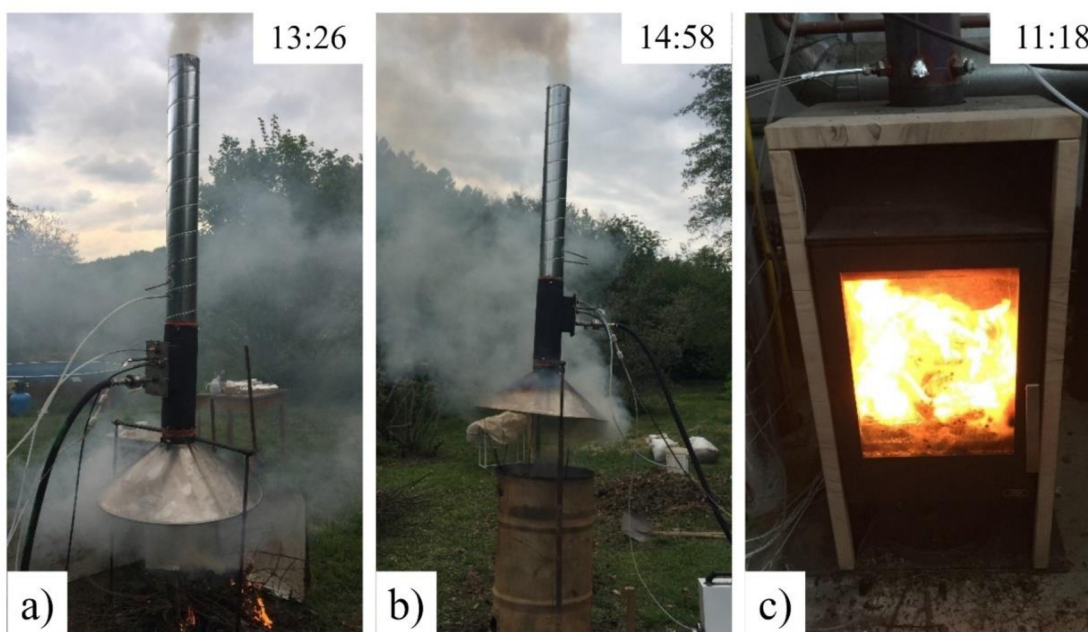
Tab. 4-3 Emisní limity při 10 % O_2 dle směrnice o Ekodesignu [69]

	Limitní hodnoty	Poznámka
	[$mg \cdot m^{-3}$]	
NO _x	200	kotle na biomasu
	350	kotle na fosilní paliva
	200	interiérová topidla na biomasu
	300	interiérová topidla na fosilní paliva

5 Experimentální měření

Tato kapitola se zabývá měřením plyných emisí (oxidu uhelnatého, oxidů dusíku, TOC), tuhých znečišťujících látek (TZL) a emisí jemných částic. Předmětem experimentu byl zahradní odpad, který byl spalován třemi různými způsoby, a to na hromadě (obr. 5-1a), v sudu (obr. 5-1b) a v krbových kamnech ABX Grönland 4673-6 (obr. 5-1c). Celkem se provedlo 6 měření. První 4 měření proběhly 4. května na zahradě, kde byl uskladněn zahradní odpad. Další 2 měření byly provedeny 5. května v laboratoři v budově C3 fakulty strojního inženýrství.

Jako vstup spalin do komína se použil trychtýř, který byl vyroben speciálně pro tento experiment. Výška trychtýře je 25 cm a jeho průměr na vstupu je 80 cm. Tah spalin vznikal přirozeně komínovým efektem.



Obr. 5-1 Tři způsoby spalování zahradního odpadu
(a–hromada, b–sud, c–krbová kamna)

5.1 Přístroje

5.1.1 Měření PZL analyzátozem spalin Horiba

Pro měření plyných emisí byl použit analyzátor spalin Horiba (2 moduly plyných analyzátorů VA-5000).



Obr. 5-2 Plyný analyzátor VA-5000

Kyslík se měřil paramagnetickou metodou, výsledky obsahu kyslíku se uvádí v procentech. Uhlovodíky (TOC) se měřily metodou plynové chromatografie s FID plamenoionizační detekcí. CO, NO_x se stanovily metodou NDIR (nedisperzní infračervená metoda). Výsledky TOC, CO, NO_x jsou uváděné v ppm a přepočtené na mg·m⁻³.

5.1.2 Měření jemných částic

Pro měření jemných částic byly použity 2 přístroje:



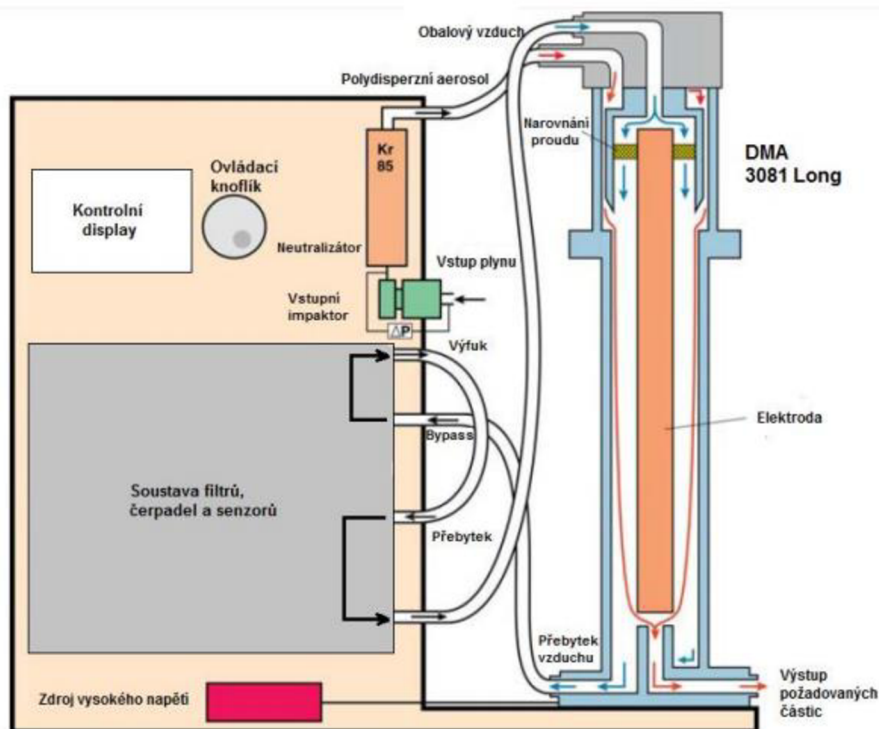
Obr. 5-3 Elektrostatický klasifikátor 3080 s DMA Long (zleva)
a CPC 3775 (zprava) [70, 71]

- Elektrostatický klasifikátor 3080 a analyzátor diferenciální mobility (DMA)

Klasifikátor se skládá z několika subsystémů, potřebných pro zpracování polydisperzního aerosolu a poskytnutí monodisperzního výstupu. Mezi hlavní subsystémy patří: regulátor toku obalového plynu, neutralizér, vysokonapěťový zdroj a analyzátor diferenciální mobility (DMA).

Přístroj nasává polydisperzní proud částic. Dále částice prochází přes neutralizér, který dá částicím rovnovážný náboj dle tabulky. Potom částice putují do třídiče částic DMA.

DMA se skládá ze dvou trubic – elektrod. Elektrody vytvářejí mezi sebou elektrické pole, které se mění nastavením napětí. Polydisperzní plyn vstupuje do zařízení DMA a promíchává se s obalovým vzduchem, který udává částicím požadovanou rychlost. Při určitém napětí a rychlosti obalového proudu částice s vhodným nábojem putují do dalšího přístroje (červená šipka v schématu na obrázku 5-4 znázorňuje cestu monodisperzního proudu). Za minutu projde celé spektrum měřených velikostí částic a pak se měření obnoví. Potom monodisperzní proud, putuje do počítače částic. Přebytečný vzduch projde přes soustavu filtrů, čerpadel a senzorů a pak se použije jak obalový plyn.



Obr. 5-4 Vnitřní schéma elektrostatického klasifikátoru a třídače částic DMA [72]

- Kondenzační počítač částic 3775

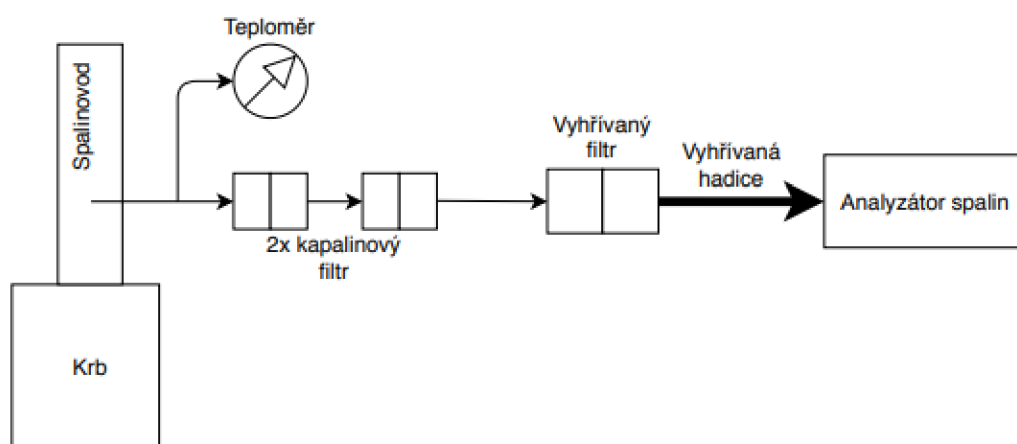
Monodisperzní proud dále vstupuje do přístroje CPC 3775, který pomocí metody detekce rozptylu světla na částicích zaznamenává jejich počet. Z důvodu malé velikosti částic se používají nasycené páry butanolu, které kondenzují na částicích a tím je zvětšují. Pak už jsou částice velké a dají se zachytit.

Přístroj zaznamenává naměřená data do počítače.

5.2 Trať odběru spalin

5.2.1 Plynné znečišťující látky PZL

Spaliny se do přístroje nasávají sondou se třemi otvory a putují přes 180 °C vyhřívanou hadici k analyzátoru spalin. Použití vyhřívané hadice je důležité pro konstantní výstupní teplotu spalin a aby nedocházelo k nežádoucí kondenzaci spalin. Pro ochranu přístroje jsou zapojené dva kapalinové filtry a vyhřívaný filtr, kde se usadí dehty. Přístroj zaznamenává naměřená data do souboru v počítači. Teplota spalin z teploměru byla zaznamenávána manuálně.

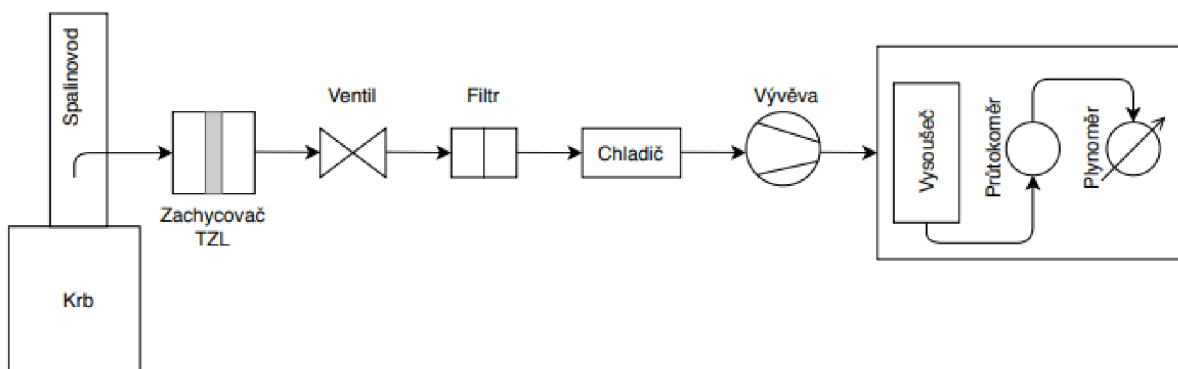


Obr. 5-5 Schéma měření PZL na příkladě měření v krbových kamnech

5.2.2 Tuhé znečišťující látky TZL

Spaliny se nasávají pomocí vývěvy přes odběrovou trubici a zachytávají se na filtru, uloženém v zachycovači TZL. Ventil, umístěný za zachycovačem TZL slouží k uzavření proudu spalin v čase, kdy se vzorek neodebírá. Spaliny projdou přes filtr, a dále putují do chladiče, kde zkondenzují vodní páry. Dále následuje kufřík, ve kterém jsou umístěny vysoušeč se silikagelem, průtokoměr a plynoměr.

Vyhodnocení vzorku probíhalo gravimetrickou metodou. Výsledky z měření touto metodou se uvádí v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a přepočítávají se na referenční kyslík (10 %).

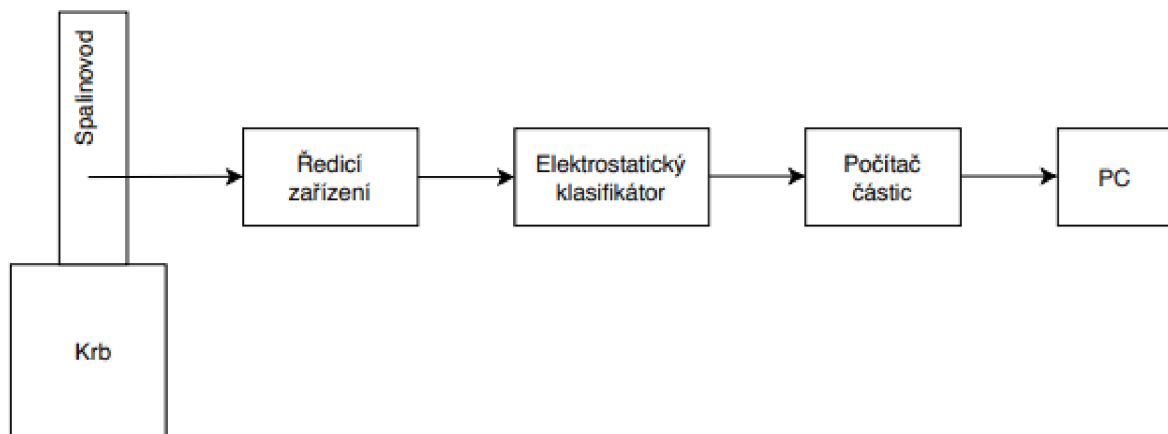


Obr. 5-6 Schéma měření TZL na příkladě měření v krbových kamnech

5.2.3 Emise jemných tuhých částic PM

Spaliny se nasávaly přes impaktor do elektrostatičké klasifikátoru. Primární funkce impaktoru je odstranit větší částice, které nesou více než jeden náboj. Elektrostatičké klasifikátor vytváří monodisperzní proud částic, který putuje do počítače částic, který počítá jejich koncentraci ve spalinách a následně zaznamenává do PC.

Při experimentu v laboratoři se používal ředící zařízení Dekati pro ředění spalin na 8,44x.



Obr. 5-7 Schéma měření jemných částic na příkladě měření v krbových kamnech

5.3 Vzorky

Ke spalování byl použit typický zahradní odpad, který obsahoval směs menšího odpadu (vzorky 1-4) a jabloňových větví.



Obr. 5-8 Fotografie vzorků 1-4 (a-d)

- 1) Listy z minulého roku (obr. 5.3-1a)
- 2) Tráva s větvičkami (obr. 5.3-1b)
- 3) Pokosená, 3 dny stará tráva (obr. 5.3-1c)
- 4) Listy a větve (obr. 10d)
- 5) Směs vzorků 1-4 v poměru přibližně 1:1:3:1
- 6) Jabloňové větve

5.3.1 Rozbor paliva

V laboratoři byl proveden rozbor vzorků. Výsledné hodnoty jsou v tabulce 5-1. Spalné teplo se měřilo kalorimetrem IKA C 200. Stanovení obsahu vody se provádělo podle normy ČSN EN ISO 18134-3. Obsah popelu ve vzorcích se měřil podle normy ČSN EN 15403. Prchavá hořlavina se měřila podle normy ČSN EN 18123. Obsah vodíku se odhadoval pomocí databáze Phillis2 [22] na základě výběru podobného paliva a naměřené vlhkosti. Obsah vodíku pro směs se určila váženým průměrem vzorků 1–4. Výhřevnost se vypočítala podle vzorce 3. Pro každý rozbor se udělaly minimálně dvě měření a následně se zprůměrovaly.

Tab. 5-1 Charakteristiky vzorků

Číslo a název vzorku	Výhřevnost	Spalné teplo	Voda	Popelovina	Prchavá hořlavina	Uvažovaný obsah vodíku
	[MJ·kg ⁻¹]	[MJ·kg ⁻¹]	[%]	[%]	[%]	[%]
1. Listy	8,68	10,26	31,63	9,47	74,51	3,68
2. Stará tráva s větvičkami	13,93	15,53	27,66	18,37	70,08	4,21
3. Čerstvá tráva	7,56	9,40	49,48	11,27	76,58	2,89
4. Listy a větve uleželé	5,32	6,93	30,97	10,98	74,73	3,88
5. Směs vzorků 1-4	5,81	7,28	29,63	9,76	73,96	3,40
6. Jabloňové větve	14,06	15,57	19,52	3,52	79,45	4,71

Největší hodnoty spalného tepla vykazují vzorky č. 2 a č. 6. Nízká hodnota spalného tepla u vzorku č. 4 je způsobena ztulením vzorku. Na obr. 5.9c je možné vidět, jak palivo nedohořelo. Podobné situace nastala v případě vzorku č.3 (obr. 5.9b). Pro srovnání je uveden vzorek č. 6 (obr. 5.9a), který se spálil na mnohem jemnější zbytek.



Obr. 5-9 Vzorky č. 6 (a), č. 3 (b), č. 4 (c) po vyhodnocení spalného tepla

Vysoký obsah prchavé hořlaviny potvrzuje to, že se palivo poměrně rychle zapalovalo. Vzhledem k nehomogenitě paliva, výsledky lze považovat pouze za orientační. Vzorek č. 2 obsahoval velmi vysoké množství popela, což je nežádoucí. Obsah vody v palivu je v rozsahu 19,52 % – 49,48 %. Nejnížší obsah vlhkosti měly jabloňové větve, nejvyšší – čerstvá tráva.

5.4 Průběh měření

5.4.1 Měření na hromadě

Spalování probíhalo na rovné hliněné ploše. Nad zemí (65 cm) byl umístěn trychtýř, za kterým byl umístěn komín s měřicím úsekem. Nejdříve byl proveden zátop pomocí větví. Palivo se přidávalo ručně po dohoření předchozí dávky. Po přidání větví následovalo přidání směsi. Měření emisí ze spalování směsi s větvemi probíhalo od 12:41 do 14:07 hodin. Měření emisí ze spalování jenom větví probíhalo od 14:07 do 14:30 hodin. Bylo spáleno přibližně 6,5 kg směsi a 5 kg větví. Měření bylo vykonáno při podmínkách atmosférického tlaku 982-983 hPa a teploty v rozsahu 14,5 – 18,7 °C. Problémem při měření byl vítr, který odfoukával spaliny (obr. 5-10a). Po většinu času se spaliny nasávaly do trychtýře relativně dobře.



Obr. 5-10 Spalování zahradního odpadu na hromadě

5.4.2 Měření v sudu

Po měření na hromadě byl zbytkový popel přemístěn do sudu o objemu 220 l (aby nebylo nutné znovu zatápat). Sud měl větrací otvor 15x10 cm a 9 větracích děr ve spodní části. Jako podstava pro sud sloužily 3 cihly plně pálené o výšce 7 cm. Trychtýř byl umístěn 30 cm nad okrajem sudu. Palivo se přikládalo obdobně, jak v případě pálení na hromadě. Bylo spáleno přibližně 6,5 kg směsi a 5 kg větví. Při spalování v sudu měl vítr menší vliv na množství spalin, z důvodu tvaru sudu a bližšímu umístění trychtýře. Také to mohla způsobovat změna počasí (slabší vítr). Měření bylo vykonáno při podmínkách atmosférického tlaku 982-983 hPa a teploty v rozsahu 14,7 – 20,4 °C.



Obr. 5-11 Spalování zahradního odpadu v sudu

5.4.3 Měření v krbových kamnech

Pro měření byly použity krbová kamna Grönland 4673-6. Krbová kamna jsou určena ke spalování dřeva (D) a hnědouhelných briket (HB). V tabulce 5-2 jsou uvedeny další technické parametry krbových kamen.

Tab. 5-2 Technické parametry krbových kamen Grönland 4673-6 [73]

Regulovatelný tepelný výkon	[kW]	3–8
Výška x Šířka x Hloubka	[mm]	1025 x 503 x 430
Energetická účinnost paliva při jmenovitém výkonu (D/HB)	[%]	82,7/80,4
Minimální tah komína	[Pa]	12
Teplota spalin D/HB	[°C]	205/223

Původní délka větví byla více než 1 m, proto bylo nutné je nasekat sekerou na kratší dílky (přibližně 20 cm). Zátop krbových kamen probíhal dřevem po dobu 1 hodiny. Celkem bylo spáleno přibližně 3 kg směsi a 3,5 kg dřeva.

6 Vyhodnocení

Prvním krokem vyhodnocení dat byla jejich příprava. Bylo nutno očistit data od vlivů, způsobujících chyby měření, jako je například fluktuace hodnot kyslíku, vlivem závanů větru, které ředily kouř a tím zvyšovaly obsah kyslíku v celkovém měřeném objemu. Proto řádky s hodnotami kyslíku nad 20 % při měření na hromadě, nad 20,8 % při měření v sudu byly ze souboru odstraněny. I když v grafu je pak vidět, že hodnoty chybí, i přes to byla potřeba hodnoty odstranit z důvodu velké chybovosti při převedení naměřených emisí na referenční kyslík 10 %.

Při otvírání krbových dvířek, hodnoty kyslíku byly okolo 21 %. V těch momentech referenční hodnoty emisí skokově narostly. Z toho důvodu se hodnoty nad 20 % byly odstraněny z dat.

Dále se data zpracovala do grafů:

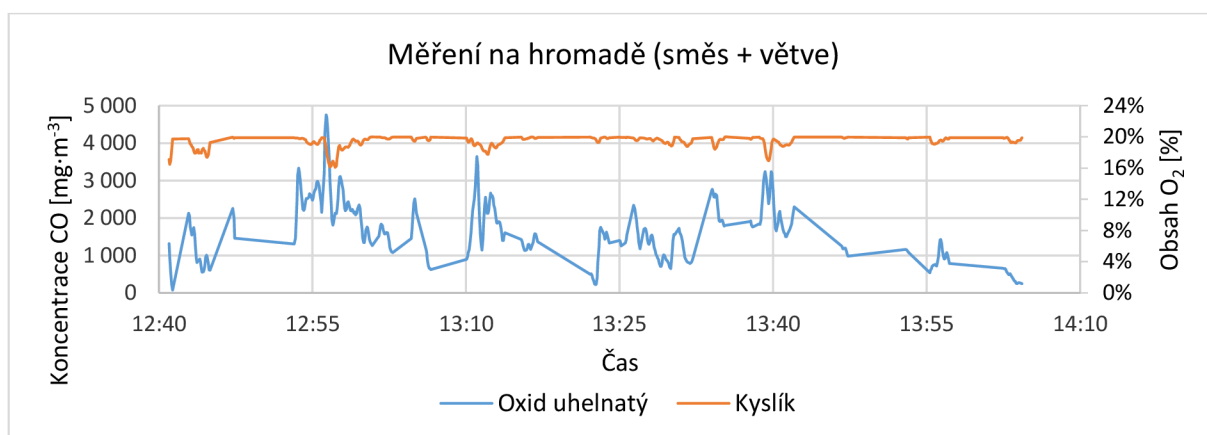
- Naměřená koncentrace emisí (CO, NO_x, TOC) a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase
- Referenční hodnoty emisí (CO, NO_x, TOC) v závislosti na čase

6.1 Koncentrace CO a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase

V grafu na obrázku 6-1 (měření č.1) lze pozorovat koncentraci kyslíku ve spalinách v hodnotách blízkých čistému vzduchu, což znamená, že spaliny jím byly naředěné ve velkém poměru. Velký poměr vzduchu mohl způsobit vysokou chybovost měření. Při poklesu obsahu kyslíku se měření považuje za relevantní (méně chybové).

Při poklesu obsahu kyslíku se koncentrace oxidu uhelnatého zvyšovala. Kolísání koncentrace CO a O₂ bylo způsobeno dávkováním paliva a vlivem větru, který odfoukával spaliny. Palivo se přidávalo v časech: 13:21, 13:25, 13:29, 13:32, 13:36, 13:40, 13:48, 15:51, 13:56. Největší koncentrace CO byla zaznamenána v časech: 12:56, 13:12, 13:39, kdy byla také vyšší teplota spalin (spaliny byly méně naředěné okolním vzduchem, který ochlazoval kouř).

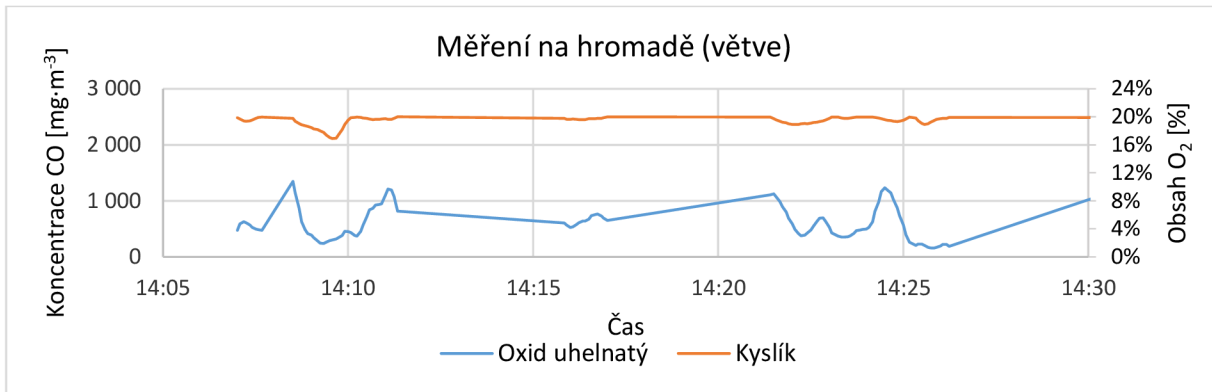
Průměrná koncentrace O₂ před úpravou dat byla 19,9 %.



Obr. 6-1 Průběh koncentrace CO a obsahu O₂ v čase, měření č. 1

V grafu na obrázku 6-2 (měření č.2) obsah kyslíku ani přidávání paliva neměly vliv na koncentraci CO. Větve se přidávaly v časech: 14:07, 14:22.

Průměrná koncentrace O₂ před úpravou dat byla 19,8 %.

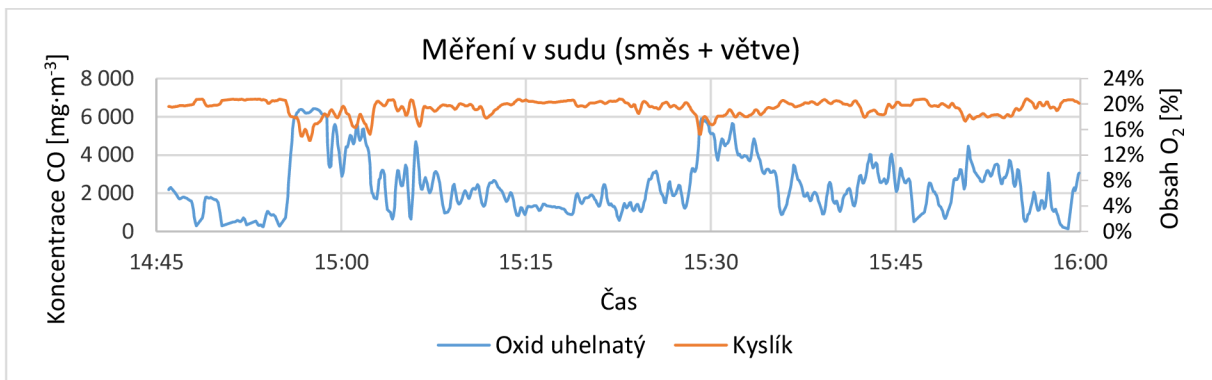


Obr. 6-2 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 2

V grafu na obrázku 6-3 (měření č.3) lze pozorovat pokles O_2 a zároveň zvyšování koncentrace CO v časech: 14:57, 15:29. Při vyšší koncentraci CO v časech: 14:58, 15:01, 15:06, 15:29, 15:50 - byla zaznamenána vyšší teplota spalin. Palivo se přidávalo v časech: 14:55; 15:10, 15:12, 15:16, 15:24, 15:29, 15:44. 15:58 - většinou je to začátek nárůstu koncentrace CO.

Nárůst od 14:55 do 14:58 hodin byl způsoben velkým množstvím viditelného kouře, který prošel komínem (obr. 5-11a). Podobně je to v čase 15:29-15:32 (obr. 5-11b). V 15:58 hodin veškerý viditelný kouř ze spalování byl odfouknutý větrem (obr. 5-11c), v grafu na obrázku 5-14 je také zaznamenána nižší koncentrace CO.

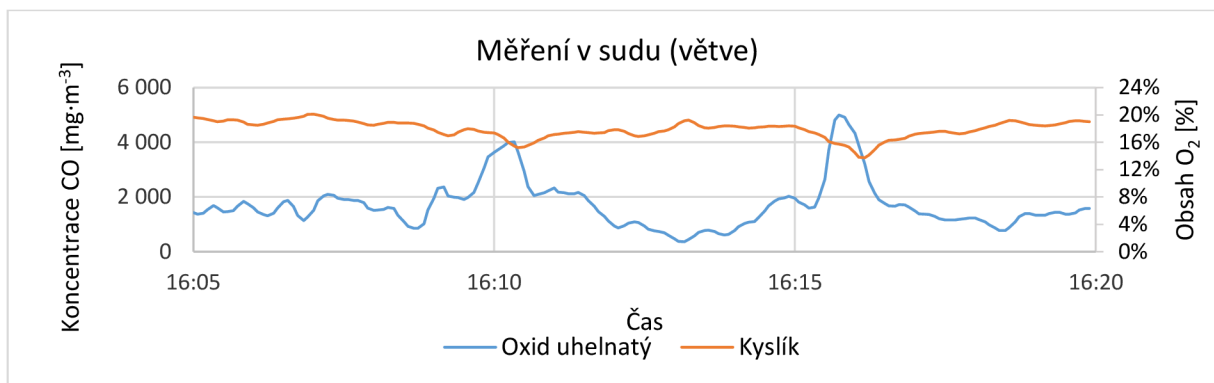
Průměrná koncentrace O_2 před úpravou dát byla 19,7 %, což je nižší hodnota, než při spalování na hromadě.



Obr. 6-3 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 3

V grafu na obrázku 6-4 (měření č.4) lze pozorovat pokles O_2 a zároveň zvyšování koncentrace CO v časech: 16:10; 16:16. Při vyšší koncentraci CO v 16:16 hodin byly také zaznamenány vyšší teploty spalin. Palivo se přidávalo v 16:05 a 16:13 hodin, v obou případech to znamenalo nárůst koncentrace CO.

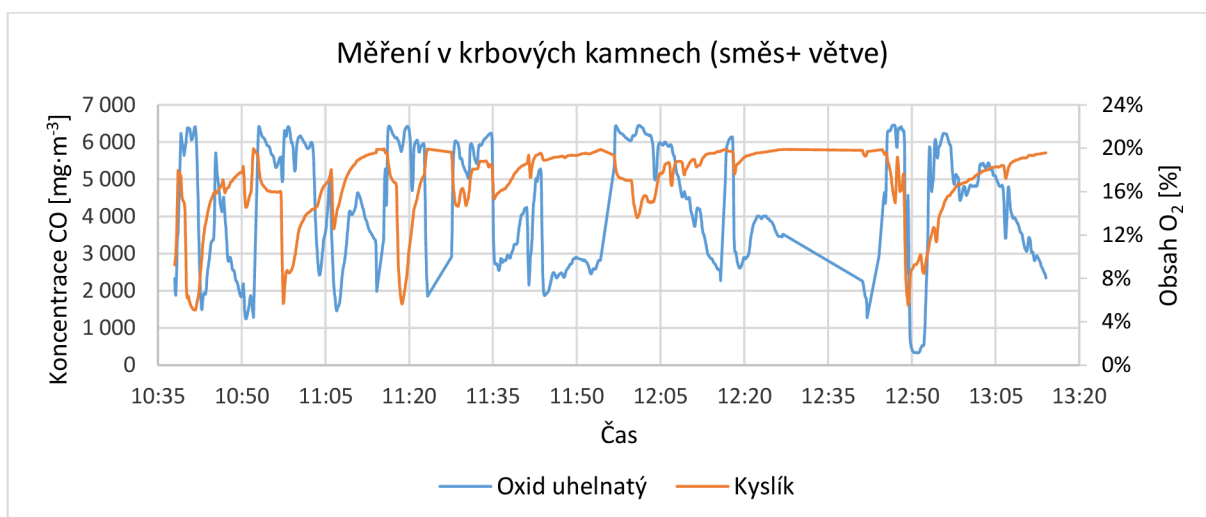
Průměrná koncentrace O_2 byla 17,9 %.



Obr. 6-4 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 4

Při spalování v krbových kamnech komínem prošly všechny spaliny. Na rozdíl od měření na otevřeném prostoru (kde při měření směsi kyslík měl průměrnou hodnotu 17,9 % až 19,9 %), průměrný obsah kyslíku při měření č.5 byl 17,2 %.

Palivo se přidávalo v časech: 10:38, 10:52, 11:10, 11:23, (11:41²), 11:56, 12:45. V grafu na obrázku 6-5 lze pozorovat, že vyšší koncentrace CO bylo dosaženo po 4-9 min od momentu, kdy se přidalo palivo. Na to mělo vliv množství a poměr přidané směsi s větviemi. V čase mezi 12:20-12:45 palivo doutnalo.

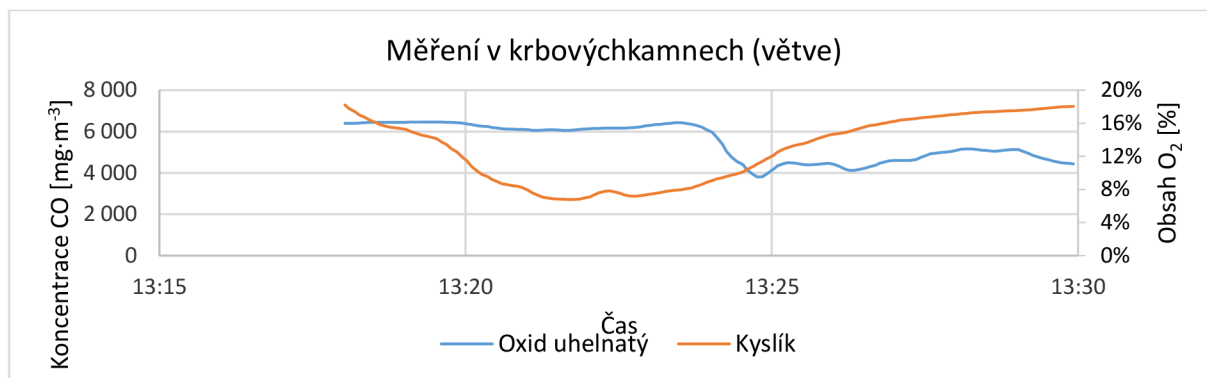


Obr. 6-5 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 5

Při měření č.6 (obrázek 6-6) se větve přidaly jen jednou. Nejvyšší koncentrace CO je $6\,456\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je limit přístroje, jinak by byly hodnoty vyšší.

Průměrná koncentrace O_2 byla 14,5 %, což je nejnižší hodnota ze všech 6 měření.

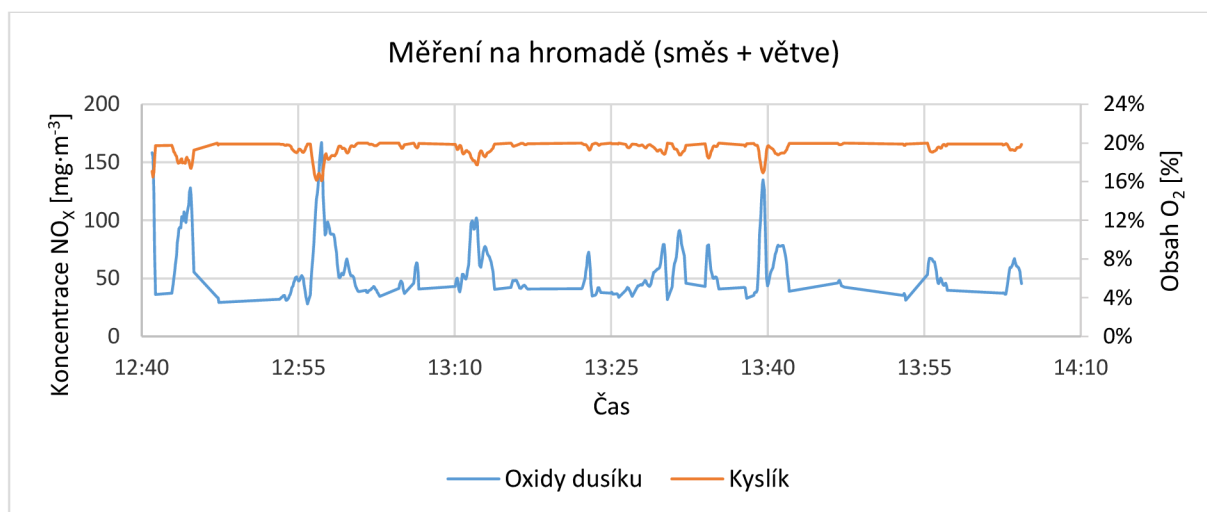
² V tomto čase se palivo do krbu nepřidávalo, ale pouze zamíchalo.



Obr. 6-6 Průběh koncentrace CO a obsahu O₂ v čase, měření č. 6

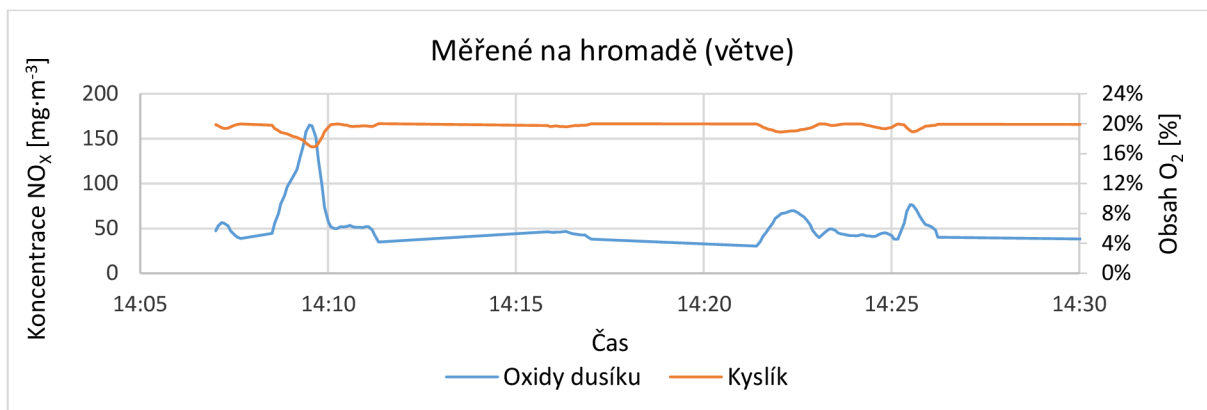
6.2 Koncentrace NO_x a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase

V grafu na obrázku 6-7 (měření č.1) lze pozorovat, že při poklesu obsahu kyslíku se koncentrace oxidů dusíku zvyšovala. Lze tady poznamenat, že NO_x více kopíruje (zrcadlí) křivku O₂, než křivka znázorňující koncentraci CO. Kolísání koncentrace NO_x a O₂ bylo způsobeno dávkováním paliva a vlivem větru, který odfoukával spaliny. Největší koncentrace NO_x je zaznamenáno v časech 12:57 a 13:39, kdy byla také zaznamenána vyšší teplota spalin (spaliny byly méně naředěné okolním vzduchem).



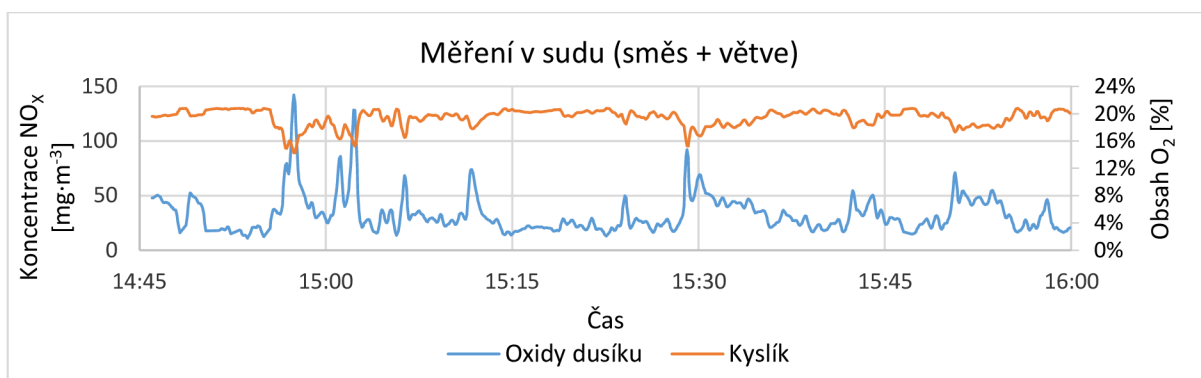
Obr. 6-7 Průběh koncentrace NO_x a obsahu O₂ v čase, měření č. 1

V grafu na obrázku 6-8 (měření č.2) lze pozorovat, že obsah kyslíku a přidávání paliva měly vliv na koncentraci NO_x, na rozdíl od koncentrace CO a TOC při měření č.2. Větve se přidávaly v časech: 14:07 a 14:22.



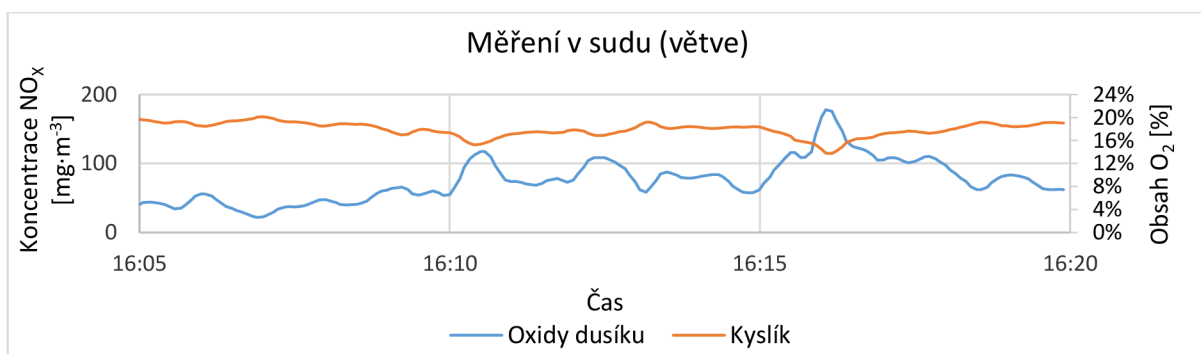
Obr. 6-8 Průběh koncentrace NO_x a obsahu O_2 v čase, měření č. 2

V grafu na obrázku 6-9 (měření č.3) lze pozorovat, že při poklesu kyslíku se zvyšovala koncentrace NO_x : 14:57, 15:02 a 15:29. Při vyšší koncentraci NO_x byla zaznamenána vyšší teplota spalin.



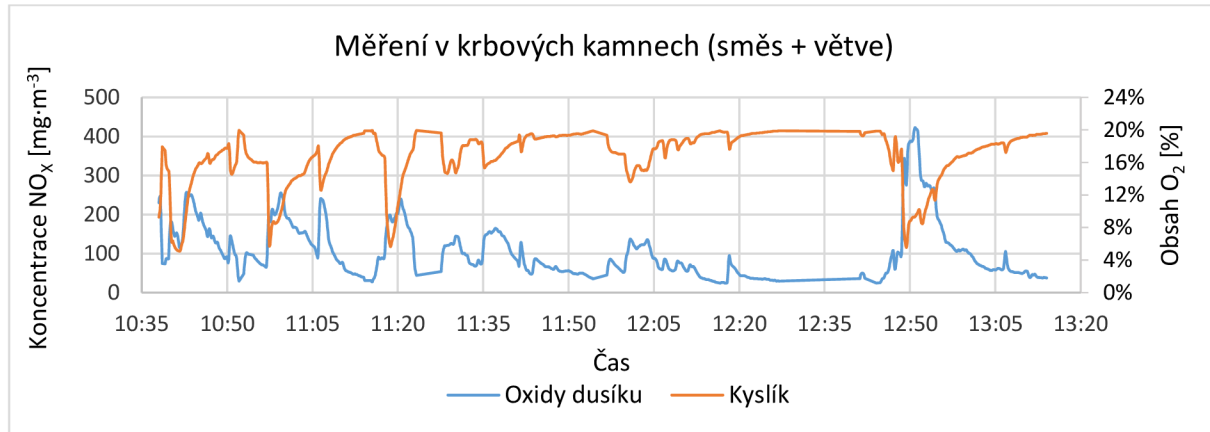
Obr. 6-9 Průběh koncentrace NO_x a obsahu O_2 v čase, měření č. 3

V grafu na obrázku 6-10 (měření č.4) lze pozorovat, že při poklesu kyslíku se zvyšovala koncentrace NO_x : 16:10, 16:16. Při vyšší koncentraci NO_x v 16:16 bylo také zaznamenáno vyšších teplot spalin. Palivo se přidávalo v 16:05 a 16:13, v obou případech to znamenalo nárůst koncentrace NO_x .



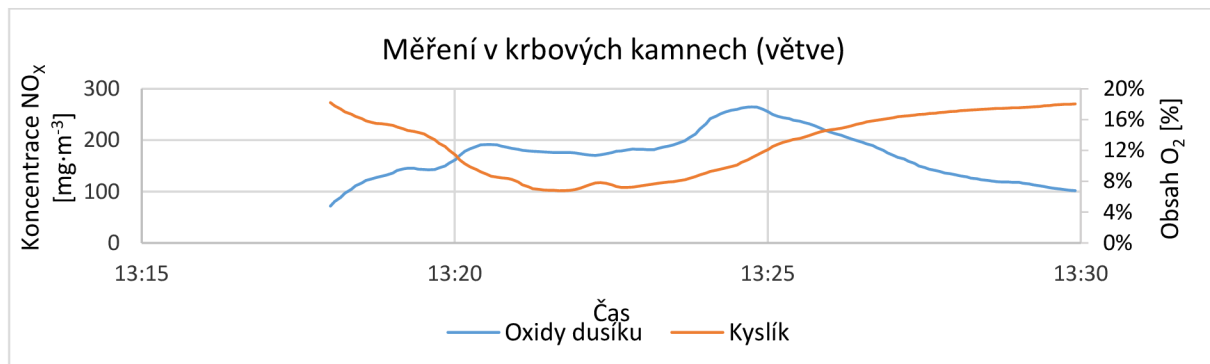
Obr. 6-10 Průběh koncentrace NO_x a obsahu O_2 v čase, měření č. 4

Při měření č. 5 se palivo přidávalo v časech: 10:38, 10:52, 11:10, 11:23, (11:41³), 11:56, 12:45. V grafu na obrázku 6-11 si lze povšimnout, že vyšší koncentrace NO_x bylo dosaženo po 4–9 min od momentu, kdy se přidalo palivo. Na to mělo vliv množství a poměr přidané směsi s větvemi. V časech 12:20–12:45 palivo doutnalo.



Obr. 6-11 Průběh koncentrace NO_x a obsahu O₂ v čase, měření č. 5

Během měření č.6 se větve přidaly jenom jednou. V grafu na obrázku 6-12 lze pozorovat pokles kyslíku při zvýšení koncentrace NO_x.

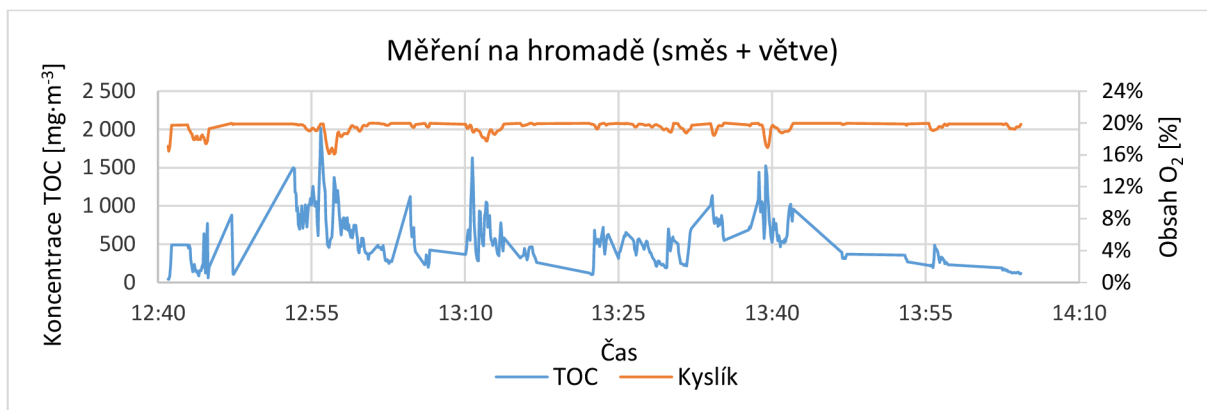


Obr. 6-12 Průběh koncentrace NO_x a obsahu O₂ v čase, měření č. 6

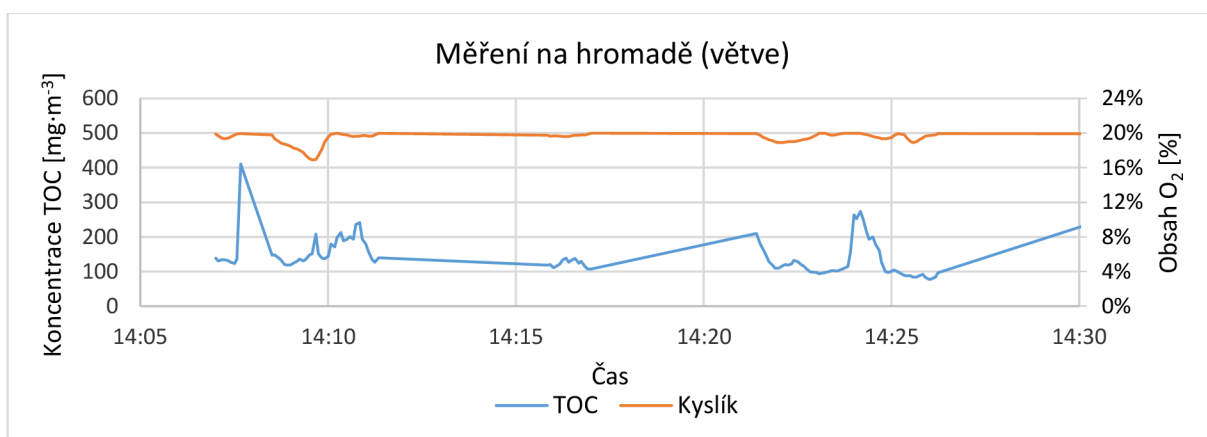
6.3 Koncentrace TOC a procentuální obsah kyslíku v závislosti na čase

Výsledky TOC v grafech na obrázcích 5-13 až 5-18 se velmi podobají výsledkům CO. TOC a CO jsou produkty nedokonalého spalování. Nízká emise CO zaručuje nízké množství emisí organických látek ve spalinách. Pravděpodobně proto se křivka TOC chová podobně.

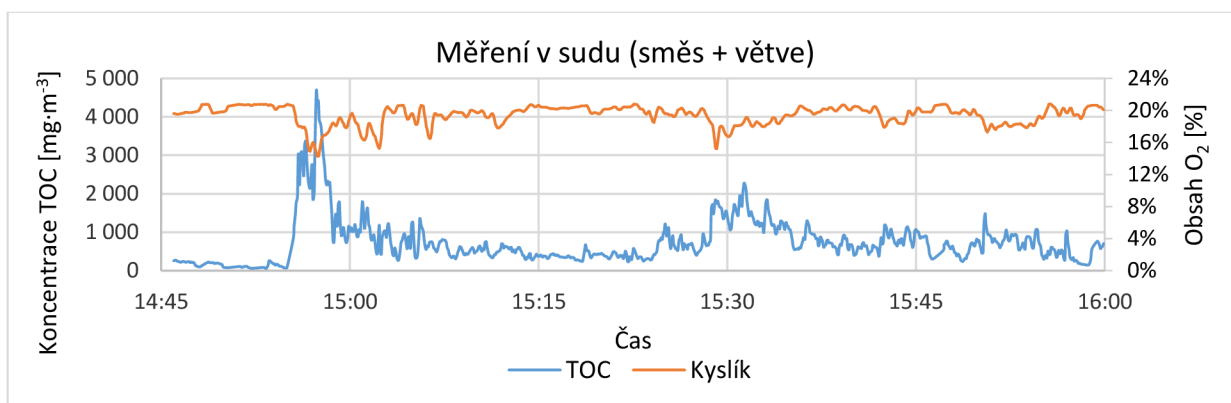
³ V tomto čase se palivo do krbu nepřidávalo, ale pouze zamíchalo.



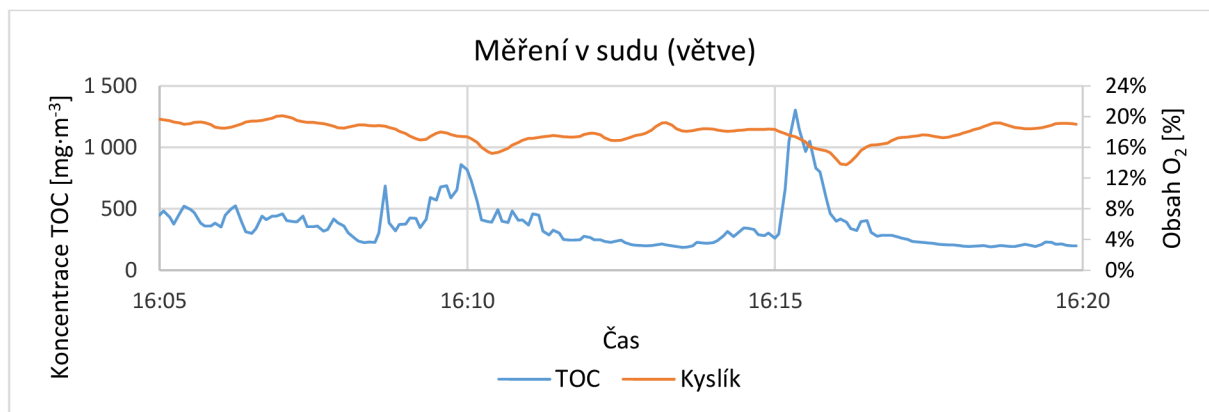
Obr. 6-13 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 1



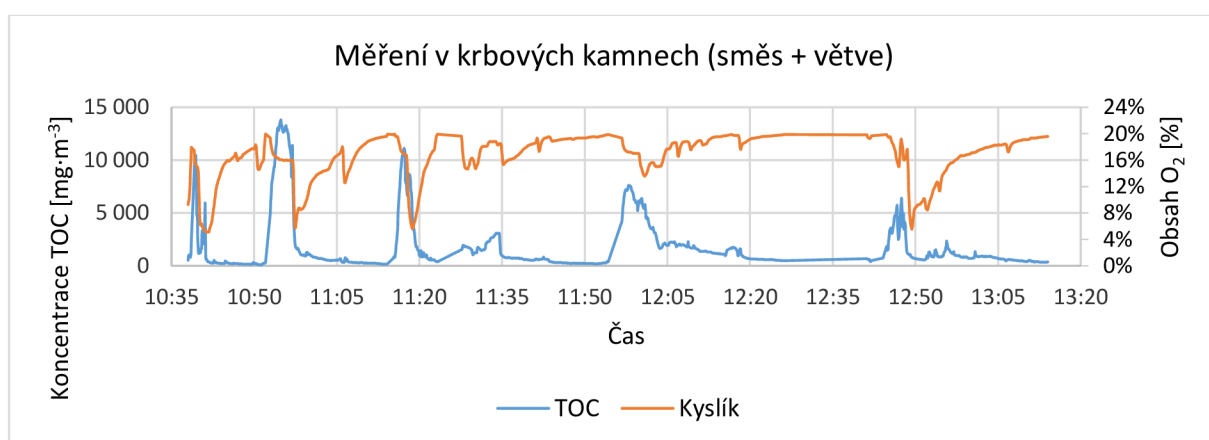
Obr. 6-14 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 2



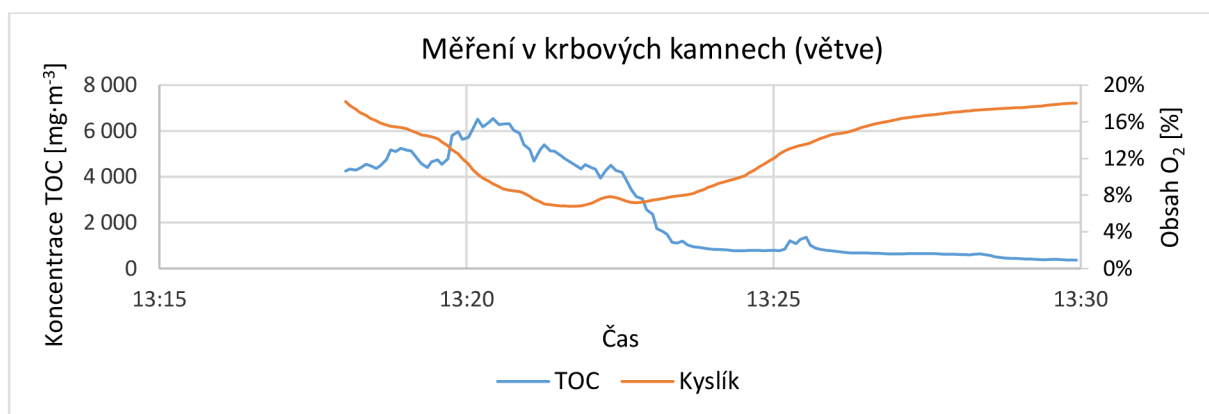
Obr. 6-15 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 3



Obr. 6-16 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 4



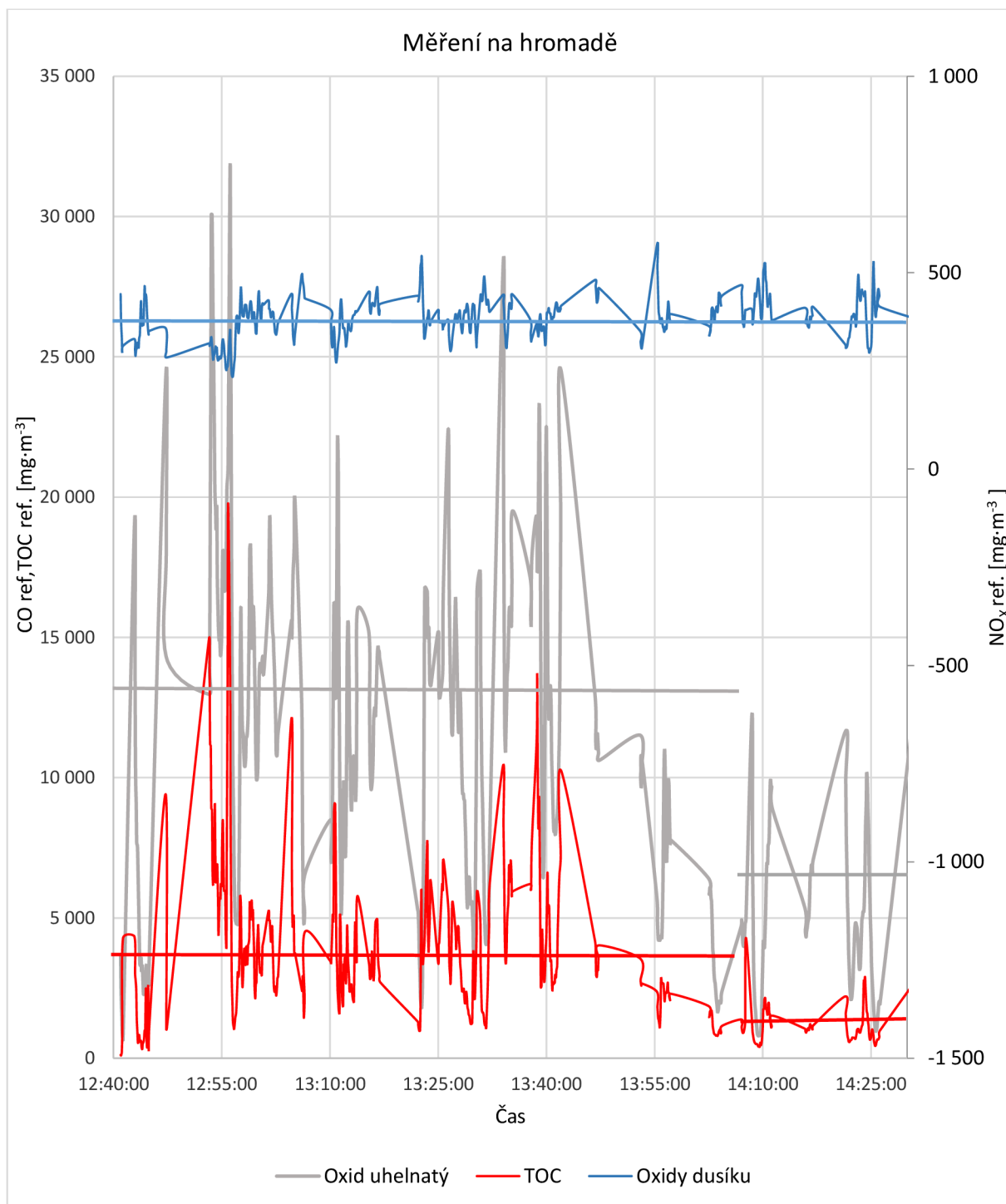
Obr. 6-17 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 5



Obr. 6-18 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 6

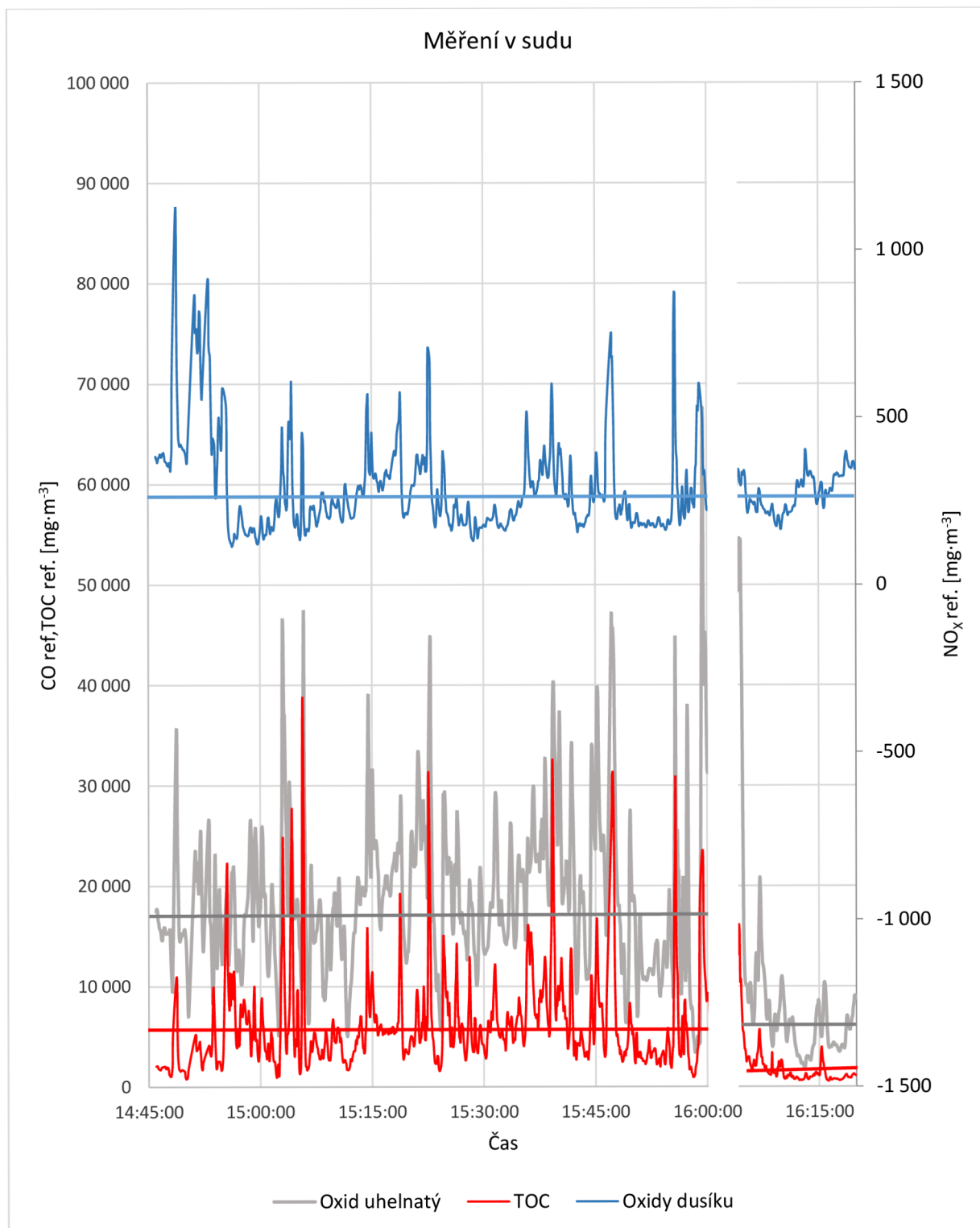
6.4 Referenční průběh emisí (CO, NO_x, TOC) v závislosti na čase

Graf na obrázku 6-19 je spojením 1. a 2. měření, lze v něm pozorovat snížení emisí CO a TOC při spalování větvi. Emise NO_x se výrazně nezměnily. Rovnými čarami jsou vyznačeny průměrné hodnoty emisí, které jsou uvedené níže v tabulce 5.5-1.



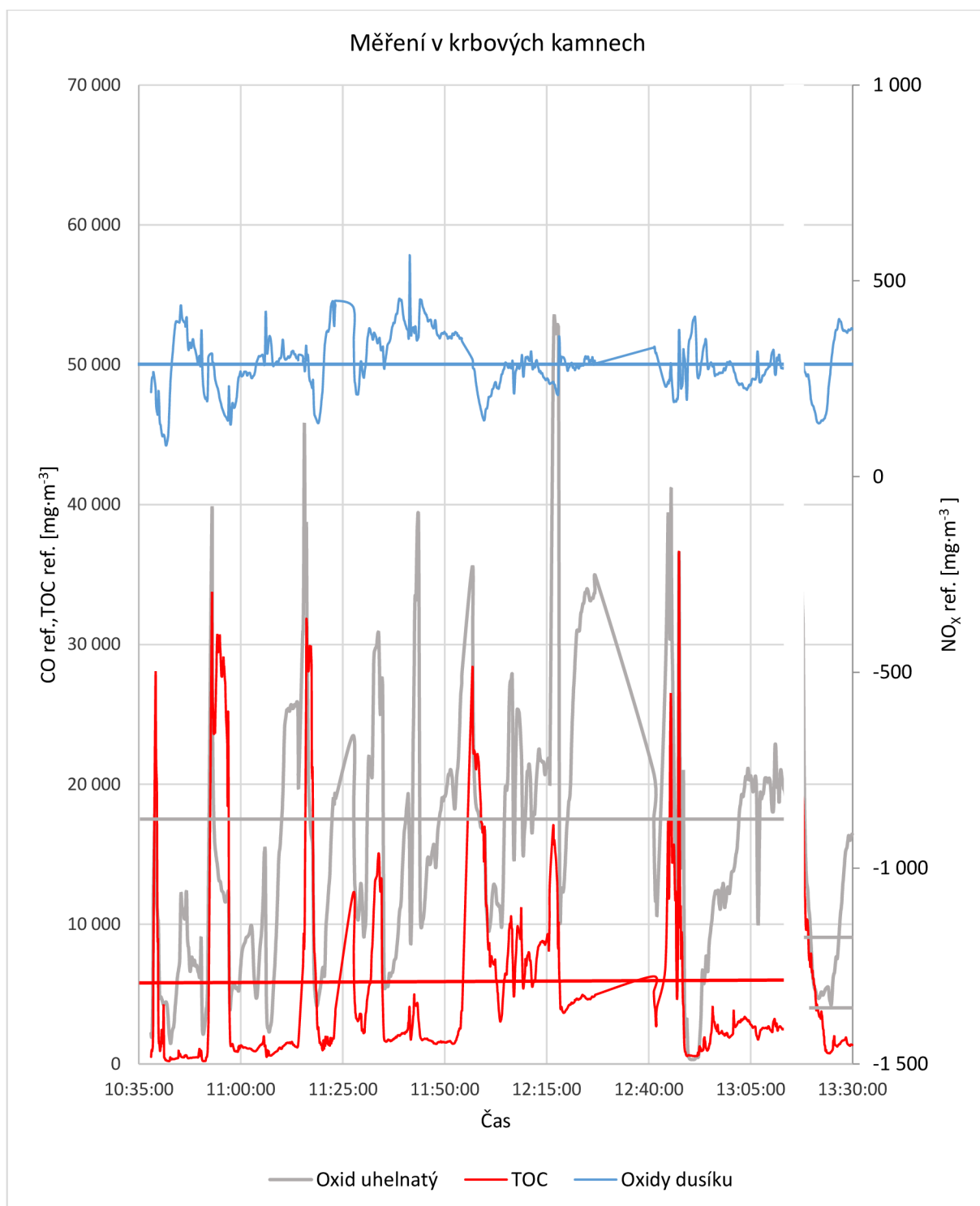
Obr. 6-19 Referenční průběh emisí v čase, měření č. 1, 2

V grafu na obrázku 6-20 (měření č. 3, č. 4) lze pozorovat, že při měření emisí ze spalování větví, hodnoty CO a TOC klesají. Hodnoty NO_x se výrazně nezměnily. Hodnoty od 16:00 do 16:05 nejsou uvažované ve výpočtu.



Obr. 6-20 Referenční průběh emisí v čase, měření č. 3, 4

V grafu na obrázku 6-21 (měření č. 5, č. 6) lze pozorovat, že při měření emisí ze spalování větvi hodnoty CO a TOC klesají. Hodnoty NO_x se výrazně nezměnily. Hodnoty od 13:14 do 13:18 nejsou uvažované ve výpočtu.



Obr. 6-21 Referenční průběh emisí v čase, měření č. 5, 6

6.5 Průměrná koncentrace plyných emisí

Spalování na otevřeném prostoru nemá vlastní normy, proto se v této kapitole porovnávají emisní limity vztažené ke kotlům a interiérovým topidlům.

V tabulce 6-1 jsou uvedeny průměrné hodnoty plyných emisí, vypočítané jako průměr po celou dobu měření, přepočítané na referenční obsah kyslíku (10 %).

Tab. 6-1 Průměrná naměřená koncentrace emisí převedena na ref. O₂ 10 %

č. měření	Metoda	Palivo	CO	NO _x	TOC
			[mg.m ⁻³]	[mg.m ⁻³]	[mg.m ⁻³]
1	Hromada	směs + větve	11251	378	3789
2	Hromada	větve	6316	373	1321
3	Sud	směs + větve	18690	277	6117
4	Sud	větve	6595	273	1476
5	Krbová kamna	směs + větve	17483	300	6129
6	Krbová kamna	větve	9276	270	3465

- Oxid uhelnatý

Nejméně oxidu uhelnatého se vyprodukovalo spalováním na hromadě. Důvodem mohl být velký přebytek vzduchu, který podporuje dokonalejší spalování.

Při porovnání naměřených průměrných hodnot emisí CO s emisními limity CO pro kotle 3. třídy v tabulce 4-1 (5 000 mg·m⁻³) vychází, že naměřené hodnoty jsou vyšší o 1,3–3,7krát.

Při porovnání naměřených průměrných hodnot emisí CO s emisními limity CO pro interiérová topidla v tabulce 4-2 (17 188 mg·m⁻³) vychází, že při spalování větví všemi metodami a při spalování směsi na hromadě jsou koncentrace CO (označené zelenou barvou) nižší než tyto limity. Avšak při spalování větvemi směsi s větvemi naměřené hodnoty jsou vyšší o 1,02–1,09krát.

- Oxidy dusíku

Nejvíce oxidů dusíku se vyprodukovalo při spalování na hromadě. Při velkém přebytku vzduchu ve spalinách zůstává zbytkový kyslík, který za vyšších teplot slučuje s dusíkem a vytváří NO_x.

Při spalování v sudu a v krbových kamnech emise NO_x splňují limitní hodnoty pro kotle/interiérová topidla na fosilní paliva pro Ekodesign (350/300 mg·m⁻³, tab. 4-3). Avšak zahradní odpad není fosilním palivem a měl by splňovat emisní limity pro biomasu (200 mg·m⁻³), což je o 1,4 až 1,9krát méně.

- Celkový organický uhlík

Nejméně TOC (podobně jako u CO) se vyprodukovalo spalováním na hromadě. Důvodem mohl být velký přebytek vzduchu, který podporuje dokonalejší spalování.

Při porovnání naměřených průměrných hodnot emisí TOC s emisními limity TOC pro kotle 3. třídy v tabulce 4-1 (150 mg·m⁻³) vychází, že naměřené hodnoty jsou vyšší o 9–41krát.

Další pozorování:

- Při spalování směsi s větvemi v sudu se vyprodukovalo nejvíce emisí CO a nejméně emisí NO_x. Přebytek vzduchu byl nižší než při spalování na hromadě.

- Při spalování větví je koncentrace CO a TOC nižší než při spalování směsi s větvemi, důvodem je lepší kvalita paliva
- Měření spalování větví trvalo kratší dobu (15-20 min), což má vliv na průměr koncentrací emisí
- Na výsledky měření měl také vliv způsob přikládání paliva. Při měření na otevřeném prostoru se další palivo přidávalo, dokud předchozí ještě nedohořelo. Doba přidávání kolísala v intervalu 3–8 min. Při měření v laboratoři se palivo přidávalo cca jednou za 15 min (dohořelo předchozí, přidalo se další).

6.6 Tuhé znečišťující látky

Výsledné hodnoty koncentrace prachu jsou přepočítané na referenční kyslík 10 %. Filtry 1, 2 a 14 se protrhly, důvodem pravděpodobně mohl být vysoký obsah vody v palivu.

Tab. 6-2 Koncentrace prachu převedena na ref. O₂ 10 %

č. vzorku	Metoda spalování	Prach
		[mg.m ⁻³]
14 ⁴	Hromada	2638
15	Hromada	8315
16	Sud	2963
18	Sud	5430
3	Krbová kamna	1418
4	Krbová kamna	2120
5	Krbová kamna	203

Hodnota vzorku č. 5 je považována za chybnou, protože několik násobně menší než ostatní. Může to být způsobeno chybou měření teploty (potřebné pro stanovení hmotnostní koncentraci prachu) v průběhu měření.

Při porovnání naměřených hodnot emisí prachu s emisními limity pro kotle 3. třídy v tabulce 4-1 (150 mg·m⁻³) vychází, že naměřené hodnoty jsou vyšší o 10–55krát.



Obr. 6-22 TZL vzorek č. 15

⁴ Vzorek č. 14 byl protržený.

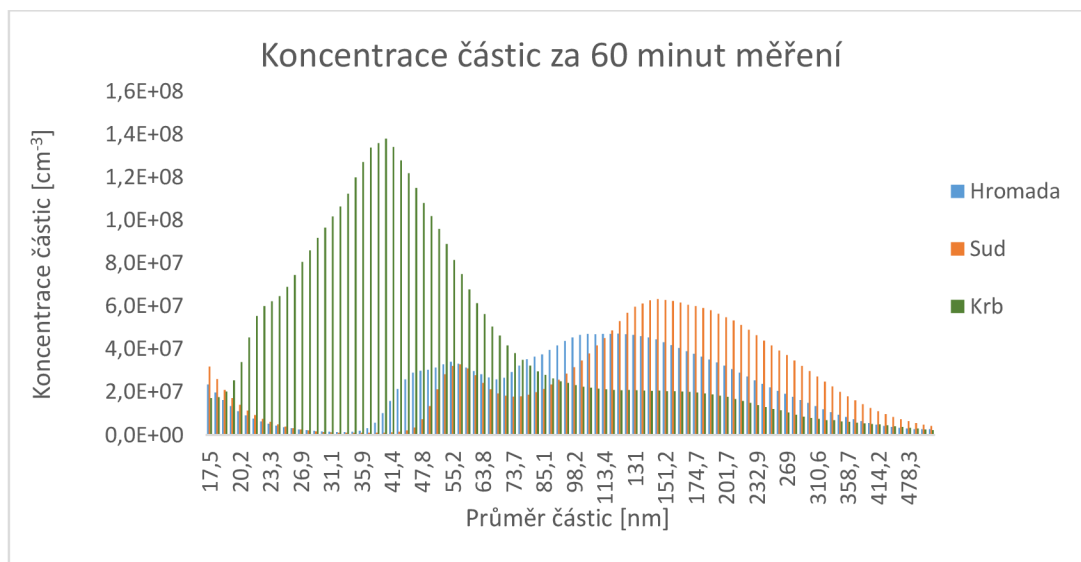
6.7 Jemné částice PM_{0,5}

Prvním krokem byla úprava dat:

- Naměřené příliš vysoké hodnoty byly zprůměrovány z nejbližších naměřených hodnot v časech 12:59 a 15:28.
- Hodnoty jemných částic u krbových kamen byly vynásobeny poměrem ředění (8,44x).

Hodnoty částic nebyly převedené na obecný referenční obsah kyslíku (průměrný obsah kyslíku pro různá měření byl v hodnotách 14,5-19,9 %), proto výsledky (hlavně při měření na otevřeném prostoru) byly nižší, než reálné.

Graf na obrázku 6-23 zobrazuje nenormalizovaná data (osa X není lineární) z měření jemných částic. Kvůli logaritmicky rostoucímu intervalu mezi hodnotami průměru částic, se vizuálně zdá, že koncentrace větších částic je vyšší, než je reálné. Proto byly hodnoty normalizované podle šířky intervalu na 1 nm.

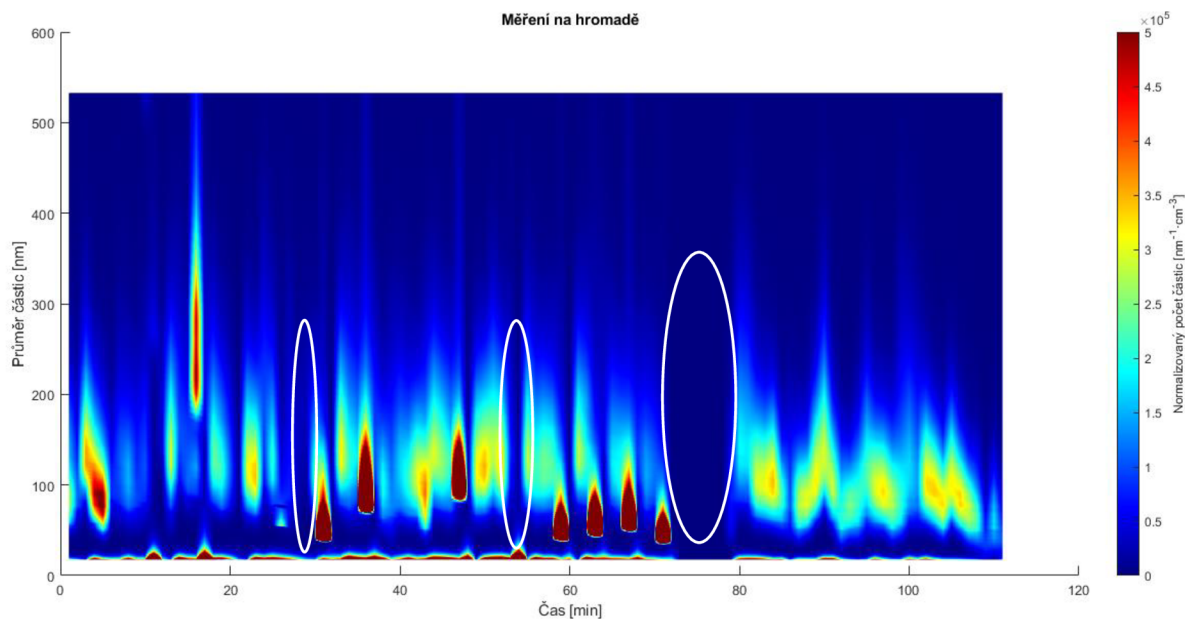


Obr. 6-23 Koncentrace jemných částic v závislosti na průměru

Pro lepší přehlednost naměřených hodnot byly sestrojeny grafy v Matlabu, kde je znázorněná i časová osa.

V grafu na obrázku 6-24 lze pozorovat, že po 80-e minutě se koncentrace částic zmenšila, v tomto čase začalo spalování větví. Největší koncentrace je v minutách 58-72 (13:38-13:52 hod.). Na obrázku 5-10 (b, c) v 53 a 70 minutě (13:33, 13:50 hod.) lze pozorovat, že v toto období komínem prošlo vyšší množství spalin.

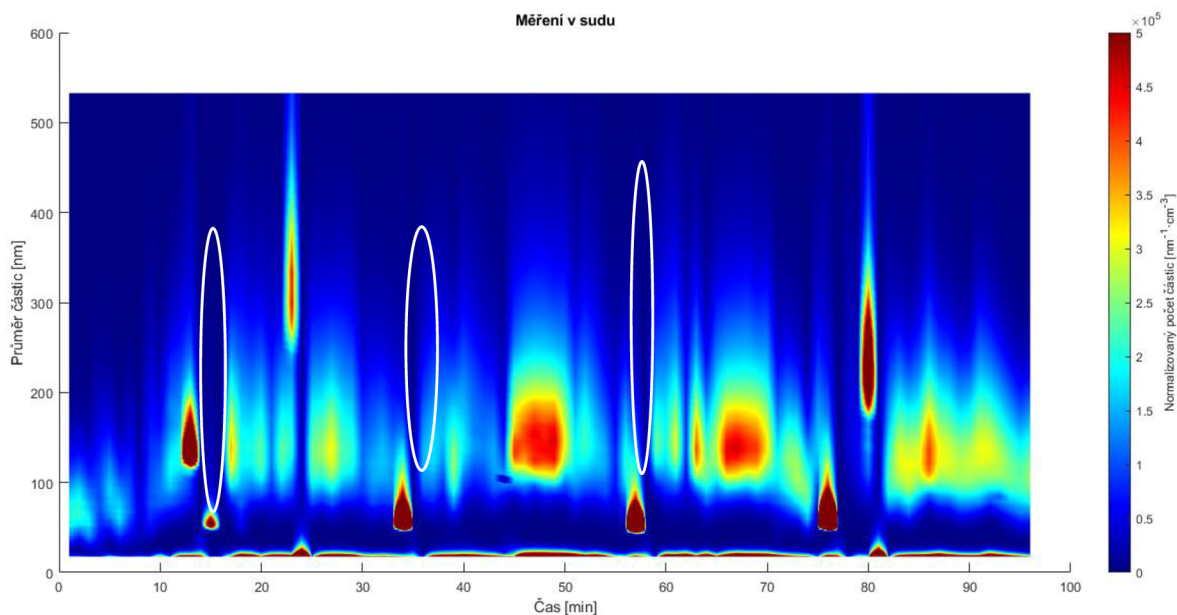
Tmavá místa v datech (v grafu jsou označeny ovály) jsou chybějící data (nasávání vzduchu). V průběhu měření se tryska zacpávala, proto se musela vyčistit.



Obr. 6-24 Graf $PM_{0,5}$ koncentraci a průměru částic v závislosti na čase (12:40-14:30 hromada)

V grafu na obrázku 6-25 je šířka intervalu s vyšší koncentrací větší 46-50 min (15:31-15:35 hod., obr. 5.11b); 66-70, 82-95 (15:51-15:55, 16:02-16:15) než při spalování na hromadě. To znamená, že kouř šel přes komín delší dobu a v tomto období se tryska nezacpávala. V tomto grafu jsou také chyby měření, které jsou vyznačené bílými ovály.

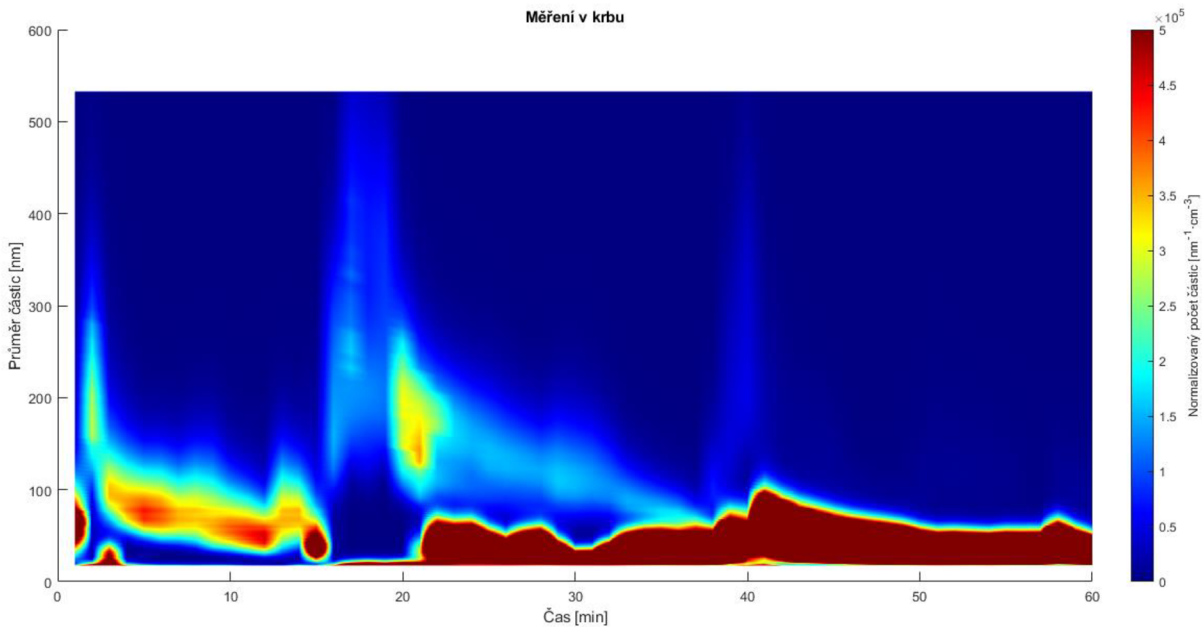
Při spalování větvi (od 82. minuty) byly částice měřené celou dobu bez ucpávání trysky. Hodnoty koncentrace částic byly v tomto případě nižší.



Obr. 6-25 Graf $PM_{0,5}$ koncentraci a průměru částic v závislosti na čase (14:45-16:20 sud)

V grafu na obrázku 6-26 lze pozorovat zvýšení koncentrace částic od 20. minuty měření. Pravděpodobně to bylo způsobeno větší dávkou paliva. Hmotnost jedné dávky na začátku měření byla přibližně 0,5 kg. Od 10:52 hodiny se hmotnost jedné dávky zvyšila.

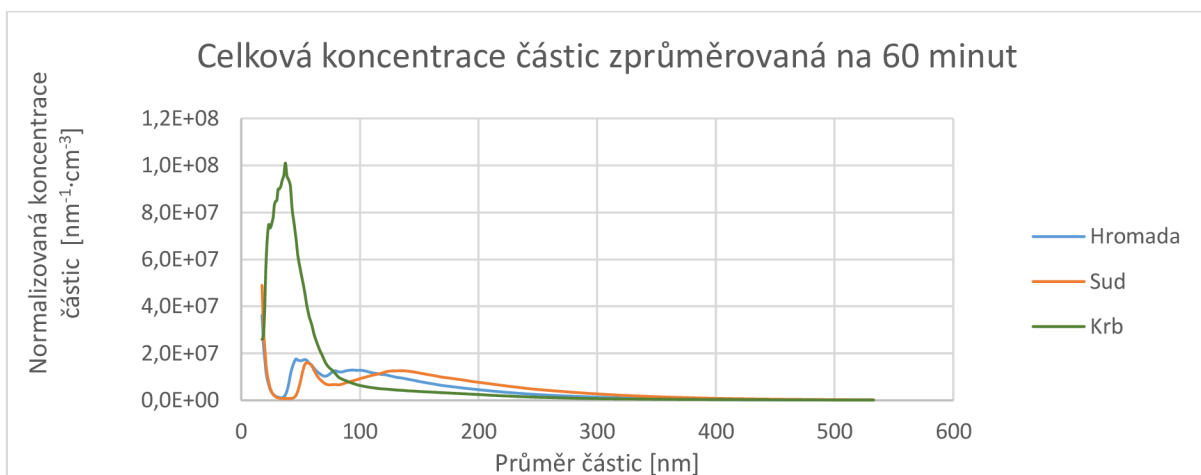
Po nějaké době se přístroj začal ucpávat, proto naměřená data byla useknuta po 60 minutách.



Obr. 6-26 Graf $PM_{0,5}$ koncentraci a průměru částic v závislosti na čase (10:38 – 11:38 krbová kamna)

Při měření venku se do trychtýře nezachytávaly všechny spaliny, protože byly odfouknuty. Zároveň byly spaliny ředěny vzduchem ve vysokém poměru (to ve výsledcích nebylo zpracováno), proto je předpokládáno, že částic bylo reálně víc.

Dle grafu na obr. 6-27 nejvíce částic vzniklo v okolí průměru 50 nm a pak v okolí 120 nm. Podle obrázku 2-4 se další nárůst koncentrace počtu částic očekává v okolí průměru 700 nm a pak 2500 nm.



Obr. 6-27 Normalizovaná koncentrace jemných částic v závislosti na průměru

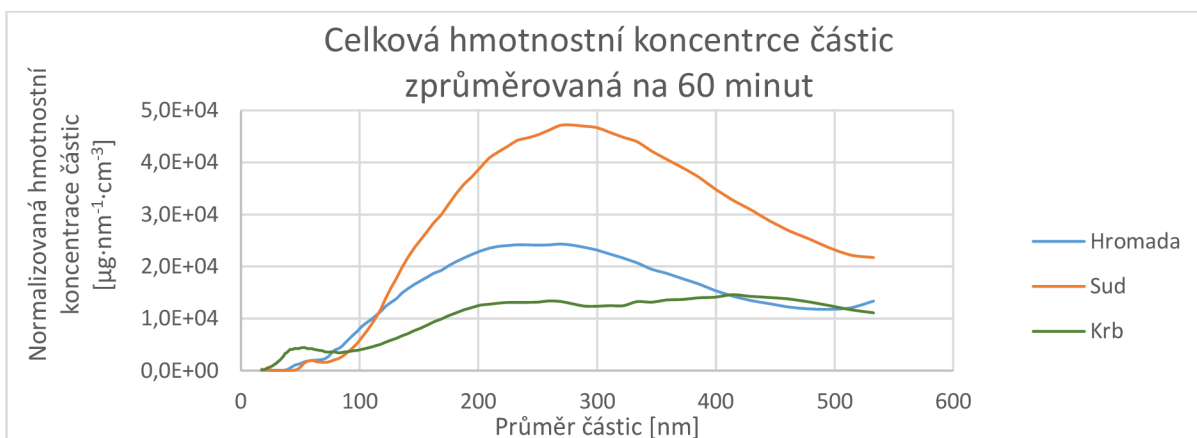
Hmotnostní koncentrace částic m [$\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$] byla získaná dle vzorce (19) za předpokladu, že částice měly kulový tvar:

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d^3}{8} \quad (19)$$

ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je předpokládaná hustota částic a d [nm] je průměr částic.

Dle grafu na obrázku 5.5-26 největší hmotnost částic bylo při měření v sudu. Průsečíky v tomto grafu kopírují průsečíky v grafu.

Největší hmotnost částic je v okolí průměru 230-280 nm. Podle tvaru křivek (nejvýraznější hromada) se očekává další nárůst hmotnosti.



Obr. 6-28 Hmotnostní koncentrace jemných částic v závislosti na průměru

6.8 Další pozorování

Na foto 5-10 a 5-11 je možno povšimnout, že při spalování směsi a)–c) měly spaliny jiné zbarvení (bílé až tmavě šedé), než při spalování jenom větví d), nemají zbarvení. Plyny CO , NO_x a voda (v plynném skupenství) jsou neviditelné. Takže za barvu spalin, v případě spalování směsi, může větší množství organických emisí a prachu.

DISKUSE

Tato bakalářská práce zkouší novou metodu měření v terénu. Metoda, která byla použita pro měření spalin má svoje klady a zápory. Největším problémem byl vliv závanů větru. Tento vliv by se dal odstranit navrhnutím krytů proti větru, ale nemělo by to způsobit problém při ředění vzduchu.

Dále by bylo vhodné měřit průtok spalin a tím umožnit izokinetický odběr.

Jako další metody měření emisí ze spalování zahradního odpadu navrhuji vyzkoušet metodu použití zařízení OBTF nebo pokusit se o napodobení metody s Nomad vzorkovačem.

Dalším nedostatkem práce je, že hodnoty jemných částic nejsou převedeny na referenční obsah kyslíku. Z důvodu velkého poměru ředícího vzduchu, jsou koncentrace jemných částic zmenšené o násobek. Avšak tento problém nebyl řešen v žádné z bakalářských ani diplomových pracích.

ZÁVĚR

Hlavními cíli bakalářské práce byly:

1. Přehled nežádoucích emisí vznikajících při spalování vlhké biomasy
2. Návrh vhodné trati pro odběr spalin
3. Návrh metodiky odběru a analýzy spalin
4. Realizace experimentu
5. Vyhodnocení experimentu

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí: rešeršní (1.-4. kapitola) a praktické (5., 6. kapitola). V první kapitole se rozebírá důležitost složení paliva. Zejména jeho vliv na kvalitu spalovacího procesu (hlavně výhřevnost) a na vznik emisí tuhých znečišťujících látek. Dále se v této kapitole popisuje proces spalování. Byly vysvětlené pojmy jako jsou spalné teplo a výhřevnost. Také byl popsán vliv množství okysličovadla (vzduchu) ve spalovacím procesu.

Druhá kapitola je věnována přehledu nežádoucích emisí plynných znečišťujících látek a jemných částic PM vznikajících při spalování tuhých paliv. Některé znečišťující látky (CO_2 , SO_x , NO_x , CH_4) mají vliv na životní prostředí (globální oteplování, porušení stratosférického ozónu a tvorba troposférického ozónu). Jiné jsou škodlivé pro lidské zdraví, jako jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (např. benzo[a]pyren) a těžké kovy (As, Be, Cd a Cr), které vykazují karcinogenní účinky. Škodlivost PM je způsobena zaprvé samotnými částicemi, které se mohou dostat i do krevního oběhu (čím jemnější jsou částice, tím víc jsou nebezpečné) a zadruhé PM mohou obsahovat také těžké kovy a jsou nositeli organických látek.

V další kapitole se rozebírají metody odběru spalin, které již byly použity a jejich výhody a nevýhody. Rozebírané metody byly:

1. metoda odběru spalin podle norské normy NS 3058:1994-2,
2. laboratorní simulace otevřeného spalování (OBTF),
3. vzorkování kouřové vlečky s použitím přenosného vzorkovače Nomad,
4. metoda měření v laboratoři,
5. metoda s použitím velkoobjemového vzorkovače vzduchu.

Nejlepší metodou byla metoda simulace otevřeného spalování, popsána v kapitole 3.2, avšak z důvodu nemožností provedení bylo rozhodnuto měření provádět v terénu s použitím kuželového trychtýře, umístěného blízko k plamenu. Pro jednoduchost výroby byl navržen svislý kouřovod, do kterého byly umístěny sondy pro odběr spalin.

V 4. kapitole jsou uváděné metody stanovení plynných a tuhých znečišťujících látek a emisní limity, s kterými byl srovnáván experiment. Emisní limity se postupem času zpřisňují.

V praktické části bakalářské práce byl popsán konkrétní experiment, kde se spalovaly dva druhy paliva (směs zahradního odpadu a jabloňové větve) třemi metodami (na hromadě, v sudu, v krbových kamnech). Byly popsány zvolené přístroje, měřicí trať a metody analýzy polutantů. U paliva se stanovil obsah vody, popelu, prchavé hořlaviny a hodnota spalného tepla a vypočítala se výhřevnost. U směsi byl vysoký obsah vlhkostí a popelovin, což je nežádoucí. Větve měly lepší kvalitu paliva.

Dále se uvádí výsledky plynných emisí CO , NO_x a TOC a jejich vyhodnocení. Jedním ze závěrů bylo to, že při spalování směsi s větvemi v krbových kamnech emisní hodnoty TOC byly 41krát vyšší, než emisní limity pro kotle 3. třídy dle normy ČSN EN 303-5. Dalším

závěrem bylo, že nejvíce oxidů dusíku se vyprodukovalo při spalování na hromadě. Toto bylo pravděpodobně způsobeno největším přebytkem vzduchu ze všech třech metod měření.

Emise tuhých znečišťujících látek (celkového prachu) se odebíraly na křemíkové filtry a stanovily se gravimetrickou metodou. Během měření TZL se filtry protrhávaly, pravděpodobně z důvodu velké vlhkosti měřeného paliva. Naměřené hodnoty se porovnaly s emisními limity prachu pro kotle dle normy ČSN EN 303-5. Výsledky byly až 55krát vyšší.

Dále se vyhodnotily jemné tuhé znečišťující látky do velikosti 532,8 nm. Problémem při vyhodnocení bylo, že hodnoty nebyly převedené na referenční, což výrazně snižuje koncentraci částic hlavně při spalování na otevřeném prostoru, kde průměrný obsah kyslíku se pohyboval v rozmezí 17,9–19,9 %. Dalším problémem bylo, že při měření se tryska impaktoru zacpávala, proto byla potřeba ji čistit. Toto mělo vliv na celkový počet částic při měření.

Faktory, které mohly ovlivnit množství emisí jsou například: vliv větru, změna počasí, změna vlhkosti paliva, jeho nehomogenita atd. Z těchto důvodů bude mít experiment nízkou reprodukovatelnost. Pro budoucí měření by bylo dobré navrhnout opatření proti větru.

Téma měření emisí ze spalování zahradního odpadu je zajímavé, ale pro jednu práci je obšírné. Proto bych chtěla v tématu pokračovat, více ho prozkoumat a zdokonalit metody měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, 2013. ISBN 978-80-2605-393-4
- [2] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] MURTINGER, Karel. *Dřevo a jeho spalování* [online]. 5.10.2006 [cit. 18.01.2020]. Dostupné z: <http://www.topenidrevem.cz/clanky/5-drevo-a-jeho-spalovani>
- [4] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [5] TOMAN, Zdeněk. *Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy*. Biom.cz [online]. 2011-02-07 [cit. 18.01.2020]. Dostupné z: [www:<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>](http://www.biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy). ISSN: 1801-2655.
- [6] TZB-info: *Výpočet výhřevnosti biopaliva a hnědého uhlí* [online]. [cit. 18.01.2020]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/129-vypocet-vyhrevnosti-biopaliva-a-hnedeho-uhli>
- [7] TZB-info: *Výpočet výhřevnosti biopaliva a hnědého uhlí* [online]. [cit. 18.01.2019] Dostupné z: https://vytapani.tzb-info.cz/docu/tabulky/0001/000129_help.html#a_d
- [8] Who.int: *Air pollution* [online]. [cit. 18.01.2019] Dostupné z: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- [9] Who.int: *Air Pollution infographics* [online]. [cit. 18.01.2019]. Dostupné z: <https://www.who.int/airpollution/infographics/en/>
- [10] TZB-info: *Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I)* [online]. 2004 [cit. 25.01.2020]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [11] ŠKORPÍK, Jiří. *Biomasa jako zdroj energie, Transformační technologie* [online]. 2006. [cit. 25.01.2020]. Brno: Jiří Škorpík. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/03.html>
- [12] World Meteorological Organization: *2019 concludes a decade of exceptional global heat and high-impact weather*. 2019 [online]. [cit. 25.01.2020] Dostupné z: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2019-concludes-decade-of-exceptional-global-heat-and-high-impact-weather>
- [13] CO2levels: *Atmospheric CO2 Levels Graph* [online]. [cit. 01.02.2020] Dostupné z: <https://www.co2levels.org/>
- [14] REN Xiaohan, Rui SUN, Xiaoxiao MENG, Nikita VOROBIEV, Martin SCHIEMANN, Yiannis A.LEVENDIS. *Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass* [online]. [cit. 01.02.2020] SciencDirect, 2016. Dostupné v ScienceDirect z:

- <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.017>. Dostupné též z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116309620#b0170>
- [15] EPA: *Understanding Global Warming Potentials* [online]. [cit. 01.02.2020] Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>)
- [16] Skupina ČEZ: *Snižování emisí NOX* [online]. [cit. 01.02.2020] Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html
- [17] MUNI SCI: *Problematika ztenčování ozónové vrstvy* [online]. [cit. 24.04.2020] Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/~dobro/ozon_1.htm
- [18] EPA: *Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled* [online]. [cit. 08.02.2020], 1999. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/cica/files/fnoxdoc.pdf>
- [19] World Health Organization: *Ambient (outdoor) air pollution* [online]. [cit. 08.02.2020] 2018. Dostupné z: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [20] RICHTR Václav, Milan KRAITR. *Příprava a využití ozonu ve školních podmínkách* [online]. [cit. 08.02.2020] 2006. Dostupné z: https://fpe.zcu.cz/export/sites/fpe/kch/dokumenty/Priloha_II.pdf
- [21] Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě: *Oxid siřičitý (SO₂)* [online]. 2020 [cit. 08.02.2020]. Dostupné z: <https://zuova.cz/Home/Clanek/oxid-siricity-so2>
- [22] Phyllis2. Dostupné z: <https://phyllis.nl/>
- [23] Arnika: *Látky znečišťující ovzduší* [online]. [cit. 15.02.2020] Dostupné z: <https://arnika.org/latky-znecistujici-ovzdusi>
- [24] Olli Sippulaa, Jouni Hokkinenb, Harri Puustinenb, Pasi Yli-Piriläa, Jorma Jokiniemiab. *Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers* [online]. ScienceDirect, [cit. 15.02.2020]. 2009 Dostupné v ScienceDirect z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.022>. Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009006256>
- [25] IB FILTR: *Nová norma ČSN EN ISO 16890-1, 16890-2* [online]. [cit. 15.02.2020] Dostupné z: <https://ibfiltr.cz/Clanky/Nova-norma-CSN-EN-ISO-16890-1-16890-2>
- [26] Youjian Zhu, Jiyuan Fan, Peng Yang, Wei Cheng, Kuo Zeng, Wennan Zhang, Haiping Yang, Jingai Shao, Xianhua Wang a Hanping Chen. *P-Based Additive for Reducing Fine Particulate Matter Emissions during Agricultural Biomass Combustion* [online]. [cit. 15.02.2020] 2019. Dostupné v ACS Publications: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02967>. Dostupné též z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/ef034028i>
- [27] OBAIDULLAH, M., S. BRAM, V. K. VERMA, J. De RUYCK. *A Review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion* [online]. [cit. 15.02.2020] 2013. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Md_Obaidullah/publication/256163154_A_Revi

- ew_on_Particle_Emissions_from_Small_Scale_Biomass_Combustion/links/5658680d08ae4988a7b74566.pdf
- [28] EPA: *Technical Overview of Volatile Organic Compounds* [online]. [cit. 22.02.2020] Dostupné z: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
- [29] Integrovaný registr znečišťování: *Benzen* [online]. [cit. 22.02.2020] Dostupné z: <https://www.irz.cz/irz/repository/latky/benzen.pdf>
- [30] BOMAN, Christoffer. *Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion* [online]. [cit. 22.02.2020] Solfjädern Offset AB, 2005. ISBN 91-7305-871-8. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:143635/FULLTEXT01.pdf>
- [31] Integrovaný registr znečišťování: *Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)* [online]. [cit. 22.02.2020] Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf,
- [32] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. *Ekologické aspekty záměny fosilních paliv za biomasu* [online]. [cit. 22.02.2020] Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1595-4. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16200818-Ekologicke-aspekty-zameny-fosilnich-paliv-za-biomasu.html>
- [33] TOMANIOVÁ, Monika, Vladimír KOCOUREK, Jana HAJŠLOVÁ. *Polycyklické aromatické uhlovodíky v potravinách*. Chem. Listy [online]. [cit. 22.02.2020] Vol. 91, No. 5 pp. 357-366. 1997. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_05_357-366.pdf
- [34] Arnika: *Benzo(a)pyren* [online]. [cit. 22.02.2020] Dostupné z: <https://arnika.org/benzoapyren>
- [35] HOLOUBEK, Ivan, Anton KOČAN, Irena HOLOUBKOVÁ, Jiří KOHOUTEK. *Persistentní organické polutanty*. Planeta [online]. [cit. 22.02.2020] No. 2/2001. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/A0750BCC7925B390C1256FAF0048ADF9/\\$file/chlatky1.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/A0750BCC7925B390C1256FAF0048ADF9/$file/chlatky1.pdf)
- [36] Integrovaný registr znečišťování: *PCDD + PCDF (dioxiny + furany) (jako TEQ)* [online]. [cit. 22.02.2020] Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/PCDD+_PCDF.pdf
- [37] Integrovaný registr znečišťování: *Polychlorované bifenyly (PCB)* [online]. [cit. 29.02.2020] Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/87>
- [38] LINAK, William P. a Jost O. L. WENDT. *Toxic metal emissions from incineration: Mechanisms and control*. SciencDirect [online]. [cit. 22.02.2020] 1993. Dostupné v ScienceDirect z: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90014-6). Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128593900146>
- [39] RITZ Michal, Lucie BARTOŇOVÁ, Zdeněk KLIKA. *Emise těžkých kovů a polyaromatických uhlovodíků při spalování uhlí v průmyslových a malých topeništích*. *GeoScience Engineering* [online]. 2003, No. 1, pp. 69-82. [22.02.2020]. ISSN 0474-8476. Dostupné z: <http://gse.vsb.cz/2003/XLIX-2003-1-69-82.pdf>

- [40] TZB-info: *Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení* [online]. [cit. 22.02.2020] 2013. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [41] TZB-info: *Metodický přístup k testování krbových kamen v ČR a v zahraničí – 1. část* [online]. [cit. 22.02.2020] 2013. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10723-metodicky-pristup-k-testovani-krbovych-kamen-v-cr-a-v-zahranici-1-cast>
- [42] REICHERT, Gabriel a Christoph SCHMIDL. *Advanced Test Methods for Firewood Stoves*. IEA Bioenergy [online]. [cit. 22.02.2020] 2018 Dostupné z: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/11/IEA_Bioenergy_Task32_Test-Methods.pdf
- [43] LEMIEUX, Paul M., Christopher C. LUTES a Dawn A. SANTOIANI. *Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review*. ScienceDirect [online]. [cit. 22.02.2020] 2002. Dostupné v ScienceDirect z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.08.001>. Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128503000613#BIB30>
- [44] AURELL, J., B. GULLETT, a D. TABOR. *Emissions from combustion of open Area sources: prescribed forest and agricultural burns* [online]. [cit. 22.02.2020] Umea, SWEDEN, 2015. Dostupné z: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=310084
- [45] WOODALL, Brian D., Dirk P. YAMAMOTO, Brian K. GULLETT a Abderrahmane TOUATI. *Emissions from small-scale burns of simulated deployed U.S. military waste* [online]. [cit. 22.02.2020] Environ. Sci. Technol. October 16, 2012. Vol. 46, issue 20, pp. 10861-11484. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/es3021556>. Dostupné též z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es3021556>
- [46] LEMIEUX, Paul M., Brian K. GULLETT, Christopher C. LUTES, Chris K. WINTERROWD a Dwain L. WINTERS. *Variables affecting emissions of PCDD/Fs from uncontrolled combustion of household waste in barrels, journal of the air & waste management association*. Air & Waste Management Association [online]. [cit. 29.02.2020] 2003. Vol. 53, pp. 523-531. ISSN: 2162-2906. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466192>. Dostupné též z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10473289.2003.10466192?needAccess=true>
- [47] RYAN, Jeffrey V. *Characterization of emission from the simulated open burning of scrap tires* [online]. [cit. 29.02.2020] 1989. Dostupné z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/5000258Y.PDF?Dockey=5000258Y.PDF>
- [48] BHATIA, Arti, et al. *National initiative on climate resilient agriculture (nicra) measurement of greenhouse gas emission from crop, livestock and aquaculture* [online]. [cit. 29.02.2020] 2013. Indian Agricultural Research Institute, New Delhi. ISBN: 978-81-88708-98-7. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Niveta_Jain/publication/256378482_National_Initiative_on_Climate_Resilient_Agriculture_NICRA_Measurement_of_Greenhouse_G

- as_Emission_from_Crop_Livestock_and_Aquaculture/links/004635226d03070cf2000000/National-Initiative-on-Climate-Resilient-Agriculture-NICRA-Measurement-of-Greenhouse-Gas-Emission-from-Crop-Livestock-and-Aquaculture.pdf
- [49] GULLETT, Brian, Abderrahmane TOUATI. *PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue* [online]. [cit. 29.02.2020] ScienceDirect, 2003. Dostupné v ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.08.011>. Dostupné též z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231003006502?casa_token=5UINWvTO_OgAAAAA:6fPvMw0DqVx5KMF9DcVlPLoJcCqAu8BnOUJB5MiWTycMwZxXURoAwj12mSIfebJONSuTTVZbKxA
- [50] REYNA-BENSUSAN, Natalia, David C. WILSON, Pamela M. DAVY, Gary W. FULLER, Geoff D. FOWLER, Stephen R. SMITH. *Experimental measurements of black carbon emission factors to estimate the global impact of uncontrolled burning of waste* [online]. [29.02.2020] ScienceDirect, 2019. Dostupné v ScienceDirect z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.047>. Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231019304388#sec2>
- [51] GONÇALVES, Cátia, Margarita EVTYUGINA, Célia ALVES, Cristina MONTEIRO, Casimiro PIO, Mário TOMÉ. *Organic particulate emissions from field burning of garden and agriculture residues* [online]. [29.02.2020] ScienceDirect, 2011. Dostupné v ScienceDirect z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.017>. Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809511001281>
- [52] ALVES, Célia A., Estela D. VICENTE, Margarita EVTYUGINA, Ana VICENTE, Casimiro PIO, María Fernández AMADO. *Purificación López Mahía. Gaseous and speciated particulate emissions from the open burning of wastes from tree pruning* [online]. [29.02.2020] ScienceDirect, 2019. Dostupné v ScienceDirect z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.014>. Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809519300274#bb0140>
- [53] Daniel R Oros, Bernd R. T Simoneit. *Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 2. Deciduous trees* [online]. [29.02.2020] ScienceDirect, 2001. Dostupné v ScienceDirect z: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00022-1). Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292701000221#BIB30>
- [54] Daniel R Oros, Bernd R. T Simoneit. *Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 1. Temperate climate conifers* [online]. [29.02.2020] ScienceDirect, 2001. Dostupné v ScienceDirect z: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00021-X). Dostupné též z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088329270100021X#BIB41>
- [55] Integrovaný registr znečišťování: *Oxid uhelnatý* [online]. [07.03.2020] Dostupné z: https://www.irz.cz/dokumenty/irz/metody_mereni/ovzdusi/oxid_uhelnaty.pdf
- [56] Integrovaný registr znečišťování: *Oxidy dusíku* [online]. [07.03.2020] Dostupné z: https://www.irz.cz/dokumenty/irz/metody_mereni/ovzdusi/oxidy_dusiku.pdf
- [57] Envig: *Stanovení hmotnostní koncentrace plynných znečišťujících látek (SO₂, NO_X, CO) automatizovanými analyzátory (metodou NDIR)* [online]. [07.03.2020]

- Dostupné z: <http://www.enving.cz/index.php/akreditovane-cinnosti/mereni-prumyslovych-emisi/134-stanoveni-hmotnostni-koncentrace-plynnych-znecistujicich-latek-so2-nox-co-automatizovanymi-analyzatory-metodou-ndir>
- [58] Integrovaný registr znečišťování: *Oxidy síry. Metody měření znečišťujících látek v únicích do ovzduší* [online]. [07.03.2020] Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/172>
- [59] Enving: *Stanovení koncentrace kyslíku (O₂) automatizovaným analyzátozem (paramagnetická metoda)* [online]. [07.03.2020] Dostupné z: <http://www.enving.cz/index.php/akreditovane-cinnosti/mereni-prumyslovych-emisi/133-stanoveni-koncentrace-kysliku-o2-automatizovanim-analyzatozem-paramagneticka-metoda>
- [60] ČSN EN 303-5: *Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*. TZ: 07 5303. ČSN, 2013.
- [61] TZB-info: *Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů* [07.03.2020]. [online] 2012 Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [62] ČSN EN 13229: *Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody*. TZ: 06 1205. ČSN, 2002.
- [63] TZB-info: *Co nejvíce ovlivní Tvůj kour?* [online]. [07.03.2020] 2013. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9475-co-nejvice-ovlivni-tvuj-kour>,
- [64] TZB-info: *Bilancování emisí znečišťujících látek z vytápění českých domácností tuhými palivy* [online]. [14.03.2020] 2017. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/15419-bilancovani-emisi-znecistujicich-latek-z-vytapani-ceskych-domacnosti-tuhymi-palivy>
- [65] ČSN EN ISO 18123: *Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu prchavé hořlaviny*. TZ: 83 8222. ČSN, 2016.
- [66] BARTOVSKÝ, Tomáš. *Analyzátory kouřových plynů (část 3)*. Automa [online]. [15.05.2020] 2012, 4, pp. 42-45. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9545.pdf
- [67] Horiba: *VA-5000_Brochure_en* [online]. [15.05.2020] Dostupné z: https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/Downloads_Catalog/Catalog_Further_Gas/VA-5000_Brochure_en_HRE2886B.pdf
- [68] World Health Organization: *Health risks of particular matter from long-range transboundary air pollution* [online]. [14.03.2020] 2006 Dostupné z: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf
- [69] TZB-info. *Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva* [online]. [15.05.2020] 2014. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>

- [70] TSI: *Series 3080 Electrostatic Classifiers – Operation and Service Manual* [online]. [15.05.2020] 2009. Dostupné z: http://cires1.colorado.edu/jimenez-group/Manuals/SMPS_3080_manual.pdf
- [71] TSI: *TSI, Model 3775 Condensation Particle Counter – Operation and Service Manual* [online]. [15.05.2020] 2007. Dostupné z: <http://www.lisa.u-pec.fr/~formenti/Tools/Manuals/CPC-3775r-manual.pdf>
- [72] KOŠTÁL, J. *Vliv provozních parametrů kotle na přítomnost jemných částic ve spalínách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147101
- [73] ABX: *Technický list výrobku. Krbová kamna. Grönland 4673-6*. 2018.
- [74] SAKO: *Energetické využití odpadu* [online]. [15.05.2020] Dostupné z: <https://www.sako.cz/pro-brnaky/cz/801/energeticke-vyuziti-odpadu/>
- [75] Michigan.gov: *Open burning regulations in Michigan* [online]. [20.06.2020] Dostupné z: [https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-aqd-open-burning-brochure_273553_7.pdf]
- [76] Zákon č. 79/2015 Z. z. *Zákon o odpadoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov*. *Zákony pre ľudí.sk*. Dostupné z: <https://www.zakonypreludi.sk/zz/2015-79>
- [77] Protokol: *Sosed zhzhot list'ya: chto delat'?* [online]. [20.06.2020] 2019. Dostupné z: https://protocol.ua/ua/sosed_gget_listya_chno_delat/
- [78] The open Asia: *4 prichiny, pochemu nel'z'ya szhigat' list'ya*. 2017 [online]. [20.06.2020] Dostupné z: <https://theopenasia.net/ru/post/4-prichiny-pochemu-nelz'ya-szhigat-list'ya->

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol, zkratka	Význam	Jednotka
h, A^r, W^r	Hořlavina, popelovina, voda v palivu	
Q_s^r	Spalné teplo	$kJ \cdot kg^{-1}$
Q_i^r	Výhřevnost	$kJ \cdot kg^{-1}$
r	Kondenzační teplo vody	$MJ \cdot kg^{-1}$
α	Součinitel přebytku vzduchu	-
V_{VZsk}	Množství vzduchu zvětšené o koeficient α	$m^3 \cdot v \cdot kg^{-1}_{pal}$
V_{VZmin}	Minimální množství vzduchu	$m^3 \cdot v \cdot kg^{-1}_{pal}$
Q_c	Teplo uvolněné spálením 1 kg uhlíku	MJ
<i>PAU</i>	Polycyklické aromatické uhlovodíky	
<i>PCCD</i>	polychlorované dibenzo-p-dioxiny	
<i>PCDF</i>	polychlorované dibenzofurany	
<i>PCB</i>	polychlorované bifenyly	
<i>POP</i>	Persistentní organické polutanty	
<i>PAU</i>	Polycyklické aromatické uhlovodíky	
<i>VOC</i>	Těkavé organické látky	
PM_x	Velikost částic TZL, x udává velikost v μm	
<i>TZL</i>	Tuhé znečišťující látky	
<i>PZL</i>	Plynné znečišťující látky	
CO_x	Oxidy uhlíku	
NO_x	Oxidy dusíku	
SO_x	Oxidy síry	
<i>ppm</i>	Počet částic na milion	
<i>PGO</i>	Potenciál globálního oteplování	-
λ	Vlnová délka	m
p	Tlak	Pa
<i>B[a]P</i>	Benzo[a]pyren	
<i>NS</i>	Norge Standard	
<i>ČSN</i>	Československá norma	
<i>EN</i>	Evropská norma	
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization	
v	Rychlost odebíraného vzorku spalin	$m \cdot s^{-1}$
w	Rychlost spalin v komíně	$m \cdot s^{-1}$
<i>OBTF</i>	Open Burning Test Facility	
<i>SVOC</i>	Semivolatile organic compounds	
<i>NDIR</i>	Nedisperzivní infračervená	
<i>FTIR</i>	Infračervené s Fourierovou transformací	

<i>TOC</i>	Total Organic Carbon	
<i>OGC</i>	celkový organický uhlík	
<i>FID</i>	Flame ionization detector	
<i>d_{CO}</i>	hustota oxidu uhelnatého při srovnávacích podmínkách	<i>kg·m⁻³</i>
<i>CO_{avg}</i>	Průměrná koncentrace CO ve spalinách	<i>mg·m⁻³, %</i>
<i>O_{2 avg}</i>	Průměrná koncentrace O ₂ ve spalinách	<i>%</i>
<i>O_{2 standardezed}</i>	Srovnávací koncentrace O ₂ ve spalinách	<i>%</i>
<i>DMA</i>	Differential mobility analyzer	
<i>CPC</i>	Condensation Particle Counter	
<i>m</i>	Hmotnostní koncentrace částic	<i>mg·cm⁻³</i>
<i>ρ</i>	Hustota částic	<i>kg·m⁻³</i>
<i>d</i>	Průměr částic	<i>nm</i>
<i>ME</i>	Měrné emise	<i>[g·kg_{pal}]</i>
<i>KE</i>	Koncentrace emisí	<i>[mg·m⁻³]</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Závislost výhřevnosti a spalného tepla na obsahu vody v palivu	13
Obr. 2-1 Rovnovážný diagram reakce $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ [10]	16
Obr. 2-2 Koncentrace CO_2 v průběhu let [ppm] [13]	17
Obr. 2-3 Vliv teploty na tvorbu jednotlivých typů oxidů dusíku [10].....	18
Obr. 2-4 Závislost výskytu částic na jejich průměru [68]	21
Obr. 3-1 Schéma testovacího zařízení dle norské normy NS 3058:1994-2 [42].....	23
Obr. 3-2 Vliv izokinetiky na trajektorii tuhých částic během odběru [40].....	24
Obr. 3-3 Laboratorní simulace otevřeného spalování, zařízení OBTF [43].....	25
Obr. 3-4 Umístění testovacího zařízení [47]	25
Obr. 3-5 Odběr spalin vzorkovačem Nomad [43]	26
Obr. 3-6 Odběr spalin laboratorním vzorkovačem [50]	27
Obr. 3-7 Schéma experimentálního uspořádání [51].....	27
Obr. 5-1 Tři způsoby spalování zahradního odpadu.....	33
Obr. 5-2 Plyný analyzátor VA-5000.....	33
Obr. 5-3 Elektrostatický klasifikátor 3080 s DMA Long a CPC 3775 [70, 71].....	34
Obr. 5-4 Vnitřní schéma elektrostatického klasifikátoru a třídiče částic DMA [72]	35
Obr. 5-5 Schéma měření PZL na příkladě měření v krbových kamnech	36
Obr. 5-6 Schéma měření TZL na příkladě měření v krbových kamnech	36
Obr. 5-7 Schéma měření jemných částic na příkladě měření v krbových kamnech	37
Obr. 5-8 Fotografie vzorků 1-4 (a-d).....	37
Obr. 5-9 Vzorky č. 6 (a), č. 3 (b), č. 4 (c) po vyhodnocení spalného tepla	38
Obr. 5-10 Spalování zahradního odpadu na hromadě	39
Obr. 5-11 Spalování zahradního odpadu v sudu.....	40
Obr. 6-1 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 1	41
Obr. 6-2 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 2	42
Obr. 6-3 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 3	42
Obr. 6-4 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 4	43
Obr. 6-5 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 5	43
Obr. 6-6 Průběh koncentrace CO a obsahu O_2 v čase, měření č. 6	44
Obr. 6-7 Průběh koncentrace NO_X a obsahu O_2 v čase, měření č. 1	44
Obr. 6-8 Průběh koncentrace NO_X a obsahu O_2 v čase, měření č. 2	45
Obr. 6-9 Průběh koncentrace NO_X a obsahu O_2 v čase, měření č. 3	45
Obr. 6-10 Průběh koncentrace NO_X a obsahu O_2 v čase, měření č. 4	45
Obr. 6-11 Průběh koncentrace NO_X a obsahu O_2 v čase, měření č. 5	46
Obr. 6-12 Průběh koncentrace NO_X a obsahu O_2 v čase, měření č. 6	46
Obr. 6-13 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 1	47
Obr. 6-14 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 2.....	47
Obr. 6-15 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 3.....	47
Obr. 6-16 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 4.....	48
Obr. 6-17 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 5.....	48
Obr. 6-18 Průběh koncentrace TOC a obsahu O_2 v čase, měření č. 6.....	48
Obr. 6-19 Referenční průběh emisí v čase, měření č. 1, 2.....	49
Obr. 6-20 Referenční průběh emisí v čase, měření č. 3, 4.....	50
Obr. 6-21 Referenční průběh emisí v čase, měření č. 5, 6.....	51
Obr. 6-22 TZL vzorek č. 15.....	53
Obr. 6-23 Koncentrace jemných částic v závislosti na průměru	54

Obr. 6-24 Graf $PM_{0,5}$ koncentraci a průměru částic v závislosti na čase (12:40-14:30 hromada).....	55
Obr. 6-25 Graf $PM_{0,5}$ koncentraci a průměru částic v závislosti na čase (14:45-16:20 sud).....	55
Obr. 6-26 Graf $PM_{0,5}$ koncentraci a průměru částic v závislosti na čase (10:38 – 11:38 krbová kamna).....	56
Obr. 6-27 Normalizovaná koncentrace jemných částic v závislosti na průměru.....	56
Obr. 6-28 Hmotnostní koncentrace jemných částic v závislosti na průměru.....	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Výhřevnost a obsah prchavé hořlaviny některých paliv [3]	12
Tab. 4-1 Mezní hodnoty emisí pro ruční dodávku biopaliva dle normy ČSN EN 303-5 [60]	31
Tab. 4-2 Třídy emisí CO pro interiérová topidla dle normy ČSN EN 13299 [62].....	31
Tab. 4-3 Emisní limity při 10 % O ₂ dle směrnice o Ekodesignu [69]	32
Tab. 5-1 Charakteristiky vzorků	38
Tab. 5-2 Technické parametry krbových kamen Grönland 4673-6 [73].....	40
Tab. 6-1 Průměrná naměřená koncentrace emisí převedena na ref. O ₂ 10 %	52
Tab. 6-2 Koncentrace prachu převedena na ref. O ₂ 10 %	53

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Technický list krbových kamen Grönland 4673-6.