

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
TECHNICKÁ FAKULTA
KATEDRA TECHNOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ STAVEB



**Zhodnocení využívání organických odpadů v malých
spalovacích zařízeních**

Evaluation of organic waste in small combustion plants as biomass fuel

DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE

Doktorský studijní program: Zemědělské inženýrství
Obor : Technika výrobních procesů
Vypracoval: **Ing. David Černý**
Školitel: Doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

PRAHA 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tiskárenská a elektronická verze práce se doslovně shodují.

V Praze, dne:

.....

Ing. David Černý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému školiteli, který mě podporoval při tvorbě této disertační práce. Dále bych rád poděkoval členům naší katedry, zejména Ing. Lubošovi Passianovi, Ph.D. za technickou podporu při přípravě vzorků briket a Ing. Janu Velebilovi za podporu v laboratoři. Děkuji své rodině a mým blízkým za podporu po dobu studia.

Práce byla podporována grantovou agenturou ČZU TF (grant IGA TF 2013: Stanovení tepelně-emisních vlastností malých spalovacích zařízení při spalování organických odpadů, 31170/1312/3114 a IGA TF 2014: Vybrané tepelně-emisní parametry při spalování paliv z biomasy v krbových kamnech, 31170/1312/3116).

Abstrakt

Organické odpady představují dostupnou náhradu za cíleně pěstované energetické plodiny pro výrobu biopaliv. Biopaliva vyrobená z organických odpadů vyžadují, aby zdrojové suroviny neobsahovaly nebezpečné látky, které by se jejich spálením v jednoduchých spalovacích zdrojích dostaly do ovzduší jako emise.

Tato práce se zabývá posuzováním technicko-provozních parametrů malých spalovacích zařízení při spalování vzorků paliv vyrobených z organických odpadů. Jako vzorky byla vybrána tuhá paliva ve formě kusových, briket a pelet vyrobená z perspektivních materiálů. Spalování bylo realizováno v krbových kamnech s roštovým topeništěm a v automatických kamnech. K měření emisních koncentrací O₂, CO, NO_x a teploty spalin byl použit plynový analyzátor.

Pro spalování na roštovém topeništi se z komerčních paliv jako vhodná náhrada za uhlí nebo dřevo jeví brikety z kůry, při jejichž spalování bylo dosaženo emisních koncentrací CO s hodnotou $560,8 \pm 98,9 \text{ mg.m}^{-3}$, hodnoty NO_x byly poměrně vysoké $1\,193,6 \pm 141,7 \text{ mg.m}^{-3}$. V rámci práce byly pro toto topeniště vyrobeny brikety z kompostu, jejichž emisní koncentrace CO jsou vyšší $1\,487,8 \pm 418,8 \text{ mg.m}^{-3}$, hodnoty NO_x byly naopak nižší $330,8 \pm 26,3 \text{ mg.m}^{-3}$ než u briket z kůry. Na roštovém topeništi byl spalován experimentální vzorek čistírenského kalu, který byl upraven hydrotermální karbonizací, naměřené emisní koncentrace CO $1\,493,3 \pm 237,3 \text{ mg.m}^{-3}$ a hodnoty NO_x $544,8 \pm 20,2 \text{ mg.m}^{-3}$ jsou pozitivní, protože nebylo dosaženo jmenovitého výkonu spalovacího zařízení a spalné teplo vzorku je velmi nízké $12,61 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

V automatických kamnech bylo při spalování odpadních dřevních pelet s certifikátem ENplus A1 dosaženo nejvyšší účinnosti spalovacího zařízení $80,8 \pm 2,7 \%$ a také velmi nízkých emisních koncentrací CO s hodnotou $117,5 \pm 14,4 \text{ mg.m}^{-3}$ a hodnoty NO_x $110,3 \pm 2,9 \text{ mg.m}^{-3}$. Následné pokusy na tomto zařízení měly za cíl zvýšit účinnost spalovacího zařízení, pomocí instalace teplovzdušného výměníku a přehřevu spalovacího vzduchu. Při využití metody přehřevu spalovacího vzduchu došlo ke zvýšení emisních koncentrací CO.

Klíčová slova: Měření emisních koncentrací; spalování; malé spalovací zdroje; kompost; čistírenský kal.

Abstract

Organic wastes represent available replacement for crops grown specifically for biofuel production. However, the combustion of solid biofuels is often accompanied by technical problems. Biofuels made of organic wastes require the source of which do not contain hazardous substances that could be their combustion in simple combustion sources came into the atmosphere as emissions.

This thesis is focused on the assessment of technical and operational parameters of small combustion plants while burning biofuels and also of the measurement of emission concentrations of CO and NO_x in the flue gas and its subsequent analysis. Samples were selected as solid fuel in the form of a lump, briquettes and pellets made from advanced materials. Incineration was realized in the fireplace with a grate furnace and automatic stove.

The bark briquettes could appear to be a suitable substitution for coal or wooden briquettes, and during combustion in grate emission concentrations of CO were achieved with a value of $560.8 \pm 98.9 \text{ mg.m}^{-3}$, on the contrary NO_x levels were relatively high $193.6 \pm 141.7 \text{ mg.m}^{-3}$. In case of this work, when using the furnace the briquettes were made from compost, whose emission levels are higher: CO $487.8 \pm 418.8 \text{ mg.m}^{-3}$, NO_x levels were somewhat lower $330.8 \pm 26.3 \text{ mg.m}^{-3}$ than the bark briquettes.

An experimental sample of sewage sludge, which has been modified by hydrothermal carbonisation, was burned on the grate furnace and the measured emission levels for CO $493.3 \pm 237.3 \text{ mg.m}^{-3}$ and NO_x levels $544.8 \pm 20.2 \text{ mg.m}^{-3}$, positive because it was achieved the rated output of the combustion equipment and the heat of combustion of the sample is very low 12.61 MJ.kg^{-1} .

The most efficient combustion of $80.8 \pm 2.7 \%$ was achieved using automatic stove, during burning waste wood pellets certificate ENplus A1, the very low levels of emission and a very low emission levels for CO with a value of $117.5 \pm 14.4 \text{ mg.m}^{-3}$ and values NO_x $110.3 \pm 2.9 \text{ mg.m}^{-3}$ were measured. Following experiments on this device were intended to increase the efficiency of a combustion plant by installing a hot-air heat exchanger and preheating combustion air. Method with preheating combustion air caused an increase in the emission concentration of CO.

Key words: Emission concentration measurement; combustion; small combustion plants; compost; biochar.

Obsah

Prohlášení	i
Poděkování	ii
Abstrakt	iii
Abstract	iv
Obsah	v
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
1 Úvod	1
2 Současný přehled a problematika	2
2.1 Organický odpad jako palivo	2
2.1.1 Potenciál odpadu jako paliva	2
2.1.2 Legislativní opatření pro využití odpadu jako paliva	3
2.2 Problematika spalování organických paliv	4
2.2.1 Výhřevnost a spalné teplo tuhých paliv	6
2.3 Analýza spalovacího procesu	7
2.4 Standardizace paliv	9
2.4.1 Tuhá paliva a biopaliva, pelety, brikety, štěrka a kusové dřevo	10
2.4.2 Alternativní paliva	11
2.4.3 Torrefakovaná biopaliva	12
2.4.4 Ostatní alternativní paliva z organických odpadů a jejich budoucnost	13
2.5 Malá spalovací zařízení na pevná paliva	13
2.5.1 Technologie malých spalovacích zařízení	14
2.5.2 Problematika provozu malých spalovacích zařízení	17
2.6 Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů	21
2.6.1 Laboratorní přístroje a postupy měření malých spalovacích zařízení	22
2.6.2 Provoz malého spalovacího zařízení	25
3. Cíl disertační práce	27
4 Materiály a metody	28
4.1 Metodika měření a výpočtu emisních koncentrací	28
4.1.1 Analyzátory spalín	28
4.1.2 Stechiometrie spalovacích procesů	33
4.1.3 Metodika přepočtu koncentrace znečišťujících látek	38
4.1.4 Metodika výpočtu výkonu a účinnosti spalovacího zařízení	39
4.2 Metody, postupy a zařízení použité pro analýzu vzorků	42

4.3	Použité vzorky paliv, jejich příprava a palivové charakteristiky.....	43
4.3.1	Komerční brikety z biomasy	44
4.3.2	Brikety z kompostu	45
4.3.3	Vzorek čistírenského kalu	46
4.3.4	Komerční pelety ENplus A1	47
4.4	Použitá spalovací zařízení	48
4.4.1	Interiérová kamna Calor s roštovým topeništěm.....	48
4.4.2	Interiérová krbová kamna Romotop.....	48
4.4.3	Interiérová automatická kamna Matilde.....	49
4.5	Metodika testování výsledků	51
5	Výsledky a diskuze.....	52
5.1	Kritéria a metodika hodnocení naměřených výsledků	52
5.2	Výsledky měření a jejich analýza	54
5.2.1	Spalování komerčních briket.....	54
5.2.2	Spalování briket z kompostu	58
5.2.3	Spalování vzorku čistírenského kalu.....	62
5.2.4	Automatická kamna a spalování vzorku pelet.....	66
5.3	Vyhodnocení výsledků	73
5.4	Diskuze	78
6	Závěry a využití poznatků pro praxi	83
7	Seznam použité literatury	87
	Příloha A	96
	Příloha B.....	99
	Příloha C.....	103
	Příloha D	106
	Příloha E.....	108

Seznam obrázků

Obr. 2.1:	Termogravimetrická analýza směsi pilin a uhlí.....	8
Obr. 2.2:	Vliv primárního přebytku vzduchu na emise NO _x	18
Obr. 2.3:	Vliv obsahu aditiva rašeliny na emise PM	19
Obr. 2.4:	Vliv obsahu aditiva kaolínu na emise PM.....	19
Obr. 2.5:	Vliv předehřátého spalovacího vzduchu na emisní koncentrace CO	20
Obr. 2.6:	Vliv předehřátého spalovacího vzduchu na emisní koncentrace NO _x	21
Obr. 2.7:	Vliv emisních koncentrací CO a CO ₂ v závislosti na přebytku vzduchu	24
Obr. 4.1:	Analyzátor Madur GA60, analyzátor Casper 301	29
Obr. 4.2:	Odhad ztráty mechanickým nedopalem	41
Obr. 4.3:	Analyzátor vlhkosti Ohaus MB 25, analyzátor Leco TGA701	42
Obr. 4.4:	Vzorky komerčních briket, brikety z kůry	44
Obr. 4.5:	BrikStar EK 20, brikety z kompostu	45
Obr. 4.6:	Vzorek HTC kalu	47
Obr. 4.7:	Interiérová krbová kamna Romotop Riano 02	49
Obr. 4.8:	Spalovací prostor a pohled na kamna Matilde, teplovzdušný výměník	50
Obr. 5.1:	Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, komerční brikety.....	54
Obr. 5.2:	Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, komerční brikety	55
Obr. 5.3:	Průměrné emisní koncentrace CO a NO _x , komerční brikety	58
Obr. 5.4:	Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, brikety z kompostu	59
Obr. 5.5:	Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, brikety z kompostu.....	59
Obr. 5.6:	Průměrné emisní koncentrace CO a NO _x , brikety z kompostu.....	61
Obr. 5.7:	Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, čistírenský kal	62
Obr. 5.8:	Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, čistírenský kal	63
Obr. 5.9:	Průměrné emisní koncentrace CO a NO _x , čistírenský kal	65
Obr. 5.10:	Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, dřevní pelety	66
Obr. 5.11:	Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, dřevní pelety	67
Obr. 5.12:	Průměrné emisní koncentrace CO a NO _x , dřevní pelety	69
Obr. 5.13:	Emisně-provozní parametry při zvýšeném výkonu	70
Obr. 5.14:	Emisně-provozní parametry při předehřevu vzduchu	71
Obr. 5.15:	Emisně-provozní charakteristiky, revize spalinové cesty	72
Obr. 5.16:	Stopy nedokonalého spalování, komerční brikety z pilin a kompostu.....	74
Obr. 5.17:	Stopy nedokonalého spalování a tuhý nedopal, automatická kamna	74
Obr. 5.18:	Závislost CO ₂ na přebytku vzduchu, komerční paliva brikety.....	76

Seznam tabulek

Tab. 2.1:	Prvkový a palivový rozbor paliv TGA analýzy	9
Tab. 2.2:	Prvkový a palivový rozbor torrefakovaných vzorků.....	12
Tab. 2.3:	Prvkový rozbor vzorku pelet z kompostu	24
Tab. 4.1:	Technické údaje analyzátorů pro měřené veličiny.....	30
Tab. 4.2:	Technické údaje analyzátorů pro měřené veličiny.....	31
Tab. 4.3:	Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu	34
Tab. 4.4:	Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině	34
Tab. 4.5:	Emisní faktory pro suché spaliny vzorků briket z kompostu a kalu	39
Tab. 4.6:	Palivová charakteristika spalovaných vzorků komerčních briket.....	44
Tab. 4.8:	Přepočtený prvkový rozbor vzorku brikety z kompostu.....	46
Tab. 4.10:	Technický a prvkový rozbor vzorku HTC kalu	46
Tab. 4.10:	Technický a prvkový rozbor vzorku pelet ENplus A1	47
Tab. 4.11:	Technické parametry kamen Calor	48
Tab. 4.12:	Technické parametry kamen Romotop Riano 02.....	49
Tab. 4.13:	Technické parametry automatických kamen Eva Matilde	50
Tab. 5.1:	Kategorizace pro spalovací spotřebiče s uzavřenými dvířky.....	52
Tab. 5.2:	Požadavky na spalovací stacionární zdroj na pevná paliva	53
Tab. 5.3:	Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování komerčních briket	56
Tab. 5.4:	Výkon spalovacího zařízení při spalování komerčních briket	57
Tab. 5.5:	Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování briket z kompostu.....	60
Tab. 5.6:	Výkon spalovacího zařízení při spalování briket z kompostu	61
Tab. 5.7:	Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování HTC kalu.....	64
Tab. 5.8:	Výkon spalovacího zařízení při spalování čistírenského kalu	65
Tab. 5.9:	Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování pelet.....	68
Tab. 5.10:	Výkon spalovacího zařízení při spalování dřevních pelet	69
Tab. 5.11:	Provozní parametry při zvýšeném výkonu, spalování dřevních pelet	70
Tab. 5.12:	Provozní parametry při předeřevu vzduchu, spalování dřevních pelet.....	71
Tab. 5.13:	Emisně-provozní charakteristiky, revize spalinové cesty	72
Tab. 5.14:	Ukázka návrhu jednotného environmentálního hodnocení	82

Citát:

„Stromy vznikly převážně ze vzduchu. Když je spálíme, vrátí se zpátky do vzduchu, přičemž se uvolní sálavé teplo, což je sálavé teplo Slunce, které bylo třeba, aby se vzduch přeměnil v dřevo stromů; trocha popela je pozůstatek té části stromů, která neměla původ ve vzduchu, ale v zemi.“

Richard Phillips Feynman

1 Úvod

Disertační práce se zabývá problematikou využití organických odpadů jako náhradou za fosilní paliva při topení v malých spalovacích zařízeních.

V literární rešerši je uveden souhrn nejnovějších vědeckých poznatků v oblastech, které s danou problematikou souvisejí. Jde zejména o směr vývoje odpadového hospodářství v ČR a uvolnění trhu s palivy. Odpady organického původu, též nazývané jako biopaliva si pod štítkem ekologického paliva hledají své potenciální zájemce i v občanském sektoru. Jejich výroba ve formě briket a pelet se stala již standardem, proto je zde věnován prostor zejména novým pojmům, jako jsou například torrefakovaná paliva. Z oblasti spalovacích zařízení jsou zmíněny kombinované kogenerační jednotky malých výkonů pracujících na syntézní plyn, který si sami vyprodukují. Dále je věnována pozornost nejnovějším postupům, metodám, analýzám paliv, optimalizace spalovacích zařízení a novinkám vedoucích ke snížení emisních limitů látek, které vznikají při spalování a mají negativní vliv na lidské zdraví.

Literární rešerše tak slouží jako solidní základ pro stanovení hypotéz a cílů, které mohou přispět k řešení hlavní problematiky v tomto oboru. Podle citátu slavného kvantového fyzika by mohly být ten hlavní problém právě emise, které mají původ v zemi. Ve skutečnosti jde o příjemné zjednodušení celé problematiky, která se zabývá měřením a analýzou cca 1 % objemu znečišťujících látek, které vznikají při dokonalém spalování a jsou podrobeny hlubší analýze.

V rámci řešení disertační práce jsou tak posuzována paliva, která by v budoucnu mohla být atraktivní, jako brikety z kompostu nebo odpady upravené hydrotermální karbonizací. Pozornost je také věnována běžně dostupnými palivům a problémům, vznikajících při jejich spalování. Měření byla realizována na spalovacích teplovzdušných zařízeních malých výkonů. Analýza naměřených hodnot potom slouží k potvrzení nebo vyvrácení hypotéz.

2 Současný přehled a problematika

2.1 Organický odpad jako palivo

Využíváním odpadů pro energetické účely se nahrazují primární energetické zdroje, především hnědé uhlí, kterého pro potřeby českého teplárenství bude patrně už v blízké době nedostatek. Tímto opatřením se sice může nahradit jen malá část současného uhlí využívaného v teplárenství, to však nesnižuje nutnost využití druhotných energetických zdrojů (Johansson, 2004).

Energetické využívání biomasy jako obnovitelného zdroje energie (OZE) má celou řadu pozitivních aspektů a napomáhá řešit problémy nejen ekologické, ale i zemědělsko-lesnické. Palivo na bázi biomasy neobsahuje téměř žádnou síru (S) a emise oxidu siřičitého (SO₂), což má pozitivní dopad na životní prostředí. Ostatní škodliviny v emisích z biopaliv jsou ve srovnání s emisemi z fosilních paliv příznivější. Podroštový popel je možno z větší části použít jako hnojivo s příznivým obsahem vápníku (Ca), hořčíku (Mg), draslíku (K) a fosforu (P) (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010).

Přestože vyrobený objem energie z biomasy nemůže výrazně konkurovat jiným primárním zdrojům energie, zaujímá stále významnější komplementární postavení v energetickém mixu energetických zdrojů v ČR (APB, 2012).

Důvodem rozvoje využívání biomasy, v ČR je především naše členství v Evropské unii. Ze směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009 o podpoře využívání energie z OZE vyplývá pro Evropskou unii jako celek cíl 20% podílu energie z OZE a cíl 10% podílu energie z OZE v dopravě. Dle této směrnice jsou pro Českou republiku závazné pouze celkové cíle vztahované k roku 2020. Jedná se o závazný cíl podílu energie z OZE na hrubé konečné spotřebě energie v České republice ve výši 13 % a ve výši 10 % ve všech druzích dopravy v roce 2020. Z tohoto důvodu byl zpracován „Národní akční plán České republiky pro energii“ (NREAP) z OZE, který navrhuje cíl podílu energie z OZE na hrubé konečné spotřebě energie ve výši 15,3 % a splnění cíle podílu energie z OZE na hrubé konečné spotřebě v dopravě ve výši 10 % (NREAP, 2016).

2.1.1 Potenciál odpadu jako paliva

Dle dat Českého statistického úřadu byla v roce 2014 celková produkce odpadů v ČR 23,8 mil. tun, z toho komunální odpad zaujímá 3,3 mil. tun. Dlouhodobá diskuze v oblasti odpadového hospodářství (OH) se zabývá zejména skupinou komunálních odpadů (KO), která

má za následek legislativní kroky, jejichž cílem je snižování množství skládkování organických odpadů upřednostněním především jejich materiálového využití. Jde o rozvoj zejména kategorie biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO), která je vytríděna ze směsného komunálního odpadu (SKO).

BRKO tvoří odpady, které jsou schopny anaerobního nebo aerobního rozkladu (např. potraviny, odpad ze zeleně, papír). Ve vztahu ke komunálnímu odpadu se jedná především o odpady z údržby sadů, parků a lesoparků, sídlištní a uliční zeleně, ale i travnatých hřišť a odpady ze hřbitovů ve vlastnictví případně ve správě měst a ze zahrad ve vlastnictví fyzických osob (občanů). Patří sem také odděleně sebrané biologicky rozložitelné odpady z kuchyní a stravoven a z domácností, ale i odpady papíru, dřeva a přírodních textilií a z nich zhotovených oděvů.

ČR udává cíle v rámci energetické využití odpadových toků:

BRKO: Energetické využití by mělo klesnout v letech 2013 až 2024 z 9,7 % v roce 2013 na 1,0 % v roce 2024.

SKO: Energetické využití potenciálního SKO by mělo vzrůst v z cca 16,2 % v roce 2013 na 42,7 % v roce 2024, z celkové produkce SKO z prognózy produkce, tj. 2,4 % ročně (=14,9 % původního podílu ročně). Metodika uvažuje s výstavbou nových spaloven, které zažádali o státní nebo evropskou dotaci.

Na základě analýz uvedených v „Plánu odpadového hospodářství ČR“ (POH ČR) lze tedy předpokládat, že vzroste energetické využívání komunálních odpadů do roku 2024 minimálně na plánovanou kapacitu nových spalovacích zařízení. Lze tedy předpokládat rozvoj výroby alternativních paliv.

Z hlediska materiálové skladby SKO a náročnosti na konstrukci spalovacích zařízení, které jej využívají je tento typ paliva pro malá spalovací zařízení nevhodný, proto mu nebude v disertační práci věnována dále pozornost.

2.1.2 Legislativní opatření pro využití odpadu jako paliva

V rámci implementace směrnice EU o odpadech č. 98/2008 ES, do zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. dochází k jednoduššímu a environmentálně bezpečnějšímu využívání některých komodit původně vedených v odpadovém režimu. Jde o § 3 a odstavce 5 a 6. Pokud jsou tyto podmínky a následně navazující závazné legislativní a technické podmínky splněny pak, je nutné respektovat nakládání s touto komoditou v neodpadovém režimu.

V případě že podmínky nejsou splněny, tak je pro energetické využití odpadů zaveden nový pojem „tepelné zpracování odpadu“, který zavádí aktualizovaný zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. Za tepelné zpracování odpadu zákon považuje (dle § 2 písm. o) oxidaci odpadu nebo jeho zpracování jiným termickým procesem, včetně spalování vzniklých látek, pokud by tím mohlo dojít k vyšší úrovni znečištění oproti spálení odpovídajícího množství zemního plynu o stejném energetickém obsahu. Palivo z odpadů je pro účely ochrany ovzduší stále odpadem, který má své katalogové číslo podle odpadové legislativy národní i evropské (19 12 10). Zdroje znečištění ovzduší, jež spalují odpadová paliva, jsou stále zdroji, které tepelně zpracovávají odpady a k tomu musí mít příslušná povolení. (Tomášková, Gadas, 2013)

2.2 Problematika spalování organických paliv

Pevné palivo se skládá z chemických složek, jako jsou oxidační činidla, pohonné hmoty, pojiva, změkčovadla, vulkanizační činidla, stabilizátory, a síťovací činidla. Techniky modelování energeticko-materiálového spalování a zapalování se v posledních dvou desetiletích velmi vyvinuly. Hoření pevných paliv zahrnuje řadu složitých fyzikálně-chemických procesů a bylo předmětem intenzivního výzkumu od roku 1950. V případě podrobných modelů, zpracování plynné fáze zahrnuje řadu druhů, procesů a prochází mnoha chemickými reakcemi spojených s procesy molekulární difúze, prouděním, vedením a zářením. Poslední komplexní modely jsou schopny předpovědět nejen vlastnosti spalování, rychlost, ale také povrchové podmínky a prostorové struktury celého spalovacího procesu. I přes úspěchy, současné techniky modelování trpí několika nedostatky. Nedostatek experimentálních diagnostiky a teoretického modelování představuje vážnou výzvu (Beckstead et al, 2007).

Všechny druhy tuhých paliv se skládají ze tří základních složek dle vztahu:

$$W + ASH + h = 100, \text{ (hm. \%)} \quad (2.1)$$

Kde: zdánlivá hořlavina (h), obsah celkové vody (W), popel (ASH).

Vodu obsahuje každé tuhé palivo a její obsah je jedním z jeho základních palivářských charakteristik. Vlhkost paliva je do určité míry nežádoucí, protože snižuje energetickou hodnotu paliva, ovšem nízký obsah vlhkosti může někdy působit i blahodárně na rychlost hoření, teplotu v kotli apod. (Malaťák, Jevič, Vaculík, 2010). Laboratorní stanovení obsahu vody v palivu gravimetrickou metodou vychází z normy ČSN EN ISO 18 134-3.

Popel stejně je jako voda nežádoucí složkou paliva, jak z hlediska výhřevnosti, tak chování paliva (jeho spékání, struskování, prašnosti spalin atd.). Pro důkladnější popis chování popela je důležité znát také jeho složení (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010). Laboratorní stanovení obsahu popela v palivu gravimetrickou metodou vychází z normy ČSN EN ISO 18 134-3.

Využitím popela jako hnojiva ze spálené biomasy se zabýval ve své práci Hájek (2015). Na základě výsledků analýz popelů z vybraných vzorků biomasy lze tyto popele kategorizovat dle vstupní suroviny a je možné je doporučit pro aplikaci přímo do půdy s ohledem na platnou legislativu České republiky v oblasti hnojiv, která upravuje maximální přípustné obsahy rizikových prvků v materiálech vnášených na zemědělskou půdu. Při celkovém hodnocení obsahu P, K, Ca a Mg vyšších koncentrací je dosaženo ve škváře při nedostatečném či velkém přebytku spalovacího vzduchu. Při spalování za optimálního součinitele přebytku vzduchu je dosaženo vyšších koncentrací P, K, Ca a Mg v popílku (Hájek, 2015).

Hořlavina v tuhém palivu

Zdánlivá hořlavina je součtem hořlavin prchavé a neprchavé, dle vztahu:

$$h = VM + FC, \text{ (hm. \%)} \quad (2.2)$$

Kde: prchavá hořlavina (VM-volatile matter), neprchavá hořlavina (FC – fixed carbon).

Prchavá hořlavina je tvořena plynnými hořlavými látkami, které se z paliva uvolňují při zahřátí na určitou teplotu. Hoření prchavé hořlaviny se jeví jako plamen (Malat'ák, Vaculík, 2008). Obsah prchavé hořlaviny pro biopaliva se určí dle ČSN EN ISO 18 123.

Chemické složení hořlaviny tuhého paliva

Hořlavá část paliva se skládá z uhlíku (C), vodíku (H), síry (S) a dusíku (N). Z těchto prvků se účastní vlastního spalování, tj. exotermických reakcí se vzdušným kyslíkem, pouze uhlík, vodík a síra. Kyslík z hořlaviny působí jako okysličovadlo. Jedinou složkou, která se neúčastní spalování je dusík (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010).

Postup stanovení prvků C, H a N v palivu vychází z normy ČSN EN ISO 16 948. Postup ke stanovení obsahu síry a chloru stanovuje postup potom norma

ČSN EN ISO 16 994. K analýzám je využíváno automatických chromatografů, které pomocí spektrometrie určují ze spalin tyto prvky podle referenčních kalibračních plynů.

Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům na pořízení laboratorní techniky k prvkovým analýzám se vědci zabývají posuzováním databáze laboratorně analyzovaných paliv korelací mezi prvkovým obsahem paliva a jeho skladby dle vztahu 2.1. Parikh (2007) publikoval v závislosti na rozboru 250 vzorků korelační vztahy pro výpočet obsahu C, H, O. V současné době byly tyto rovnice díky databázi 447 vzorků rozšířeny. Do databáze byly zařazeny i vzorky torrefakované biomasy. Korelační koeficienty jsou pro posuzované prvky 0,83, 0,70, 0,84. Rovnice mají následovný vztah (Nhuchhen, 2016):

$$C = -35,9972 + 0,7698 \cdot VM + 1,3269 \cdot FC + 0,3250 \cdot ASH, (\%) \quad (2.3)$$

$$H = 55,3678 - 0,4830 \cdot VM - 0,5319 \cdot FC - 0,5600 \cdot ASH, (\%) \quad (2.4)$$

$$O = 223,6805 - 1,7226 \cdot VM - 2,2296 \cdot FC - 2,2463 \cdot ASH, (\%) \quad (2.5)$$

Na základě prvkových rozborů lze obecně říci, že fosilní paliva obsahují mezi 75 – 90 % hm. C, biomasa okolo 50 % na úkor obsahu O. Zásadní rozdíl těchto paliv spočívá také v obsahu prchavé a neprchavé hořlaviny (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2008, 2010). Rozdílný obsah prvků, kterými jsou paliva tvořena, mají vliv na výsledné spalné teplo paliva. Podle poměru obsahu prvků, O:C a H:C lze znázornit palivo v tzv. Van Krevelen diagramu. Diagram se využívá pro zhodnocení a kategorizaci paliv (Krevelen, 1950).

2.2.1 Výhřevnost a spalné teplo tuhých paliv

Při spalování se hořlavé látky paliva slučují s kyslíkem a vznikají produkty spalování, nazývané spaliny. Tento pochod je doprovázen uvolňováním určitého množství tepla, které je u tuhých a kapalných paliv vztahováno na hmotnostní jednotku $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. V technické praxi se uvolněné teplo vyjadřuje jako spalné teplo Q_s nebo jako výhřevnost Q_i paliva (Malat'ák, Vaculík, 2008).

Spalné teplo tuhých paliv

Spalné teplo je množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení měrné jednotky paliva $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}_N$ za předpokladu, že se spaliny ochladí na $0\text{ }^\circ\text{C}$ a že veškerá pára vzniklá při spalování zkondenzuje (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010). Spalné teplo lze nejpřesněji určit

měření v kalorimetrech pro biopaliva dle ČSN EN 14 918, v publikacích je označováno jako „higher heating value“ (HHV).

I v této oblasti se vědci zabývají korelací laboratorně změřených paliv korelací mezi spalným teplem paliva a jeho skladby dle vztahu 2.1. Nejnovější vztah publikoval Nhuchhen (2016) pomocí lineárního vztahu a přesnějšího nelineárního vztahu 2.6 korelací databáze 250 vzorků paliv.

$$\begin{aligned} \text{HHV} = & 20,7999 - 0,3214 \cdot \frac{\text{VM}}{\text{FC}} + 0,051 \cdot \left(\frac{\text{VM}}{\text{FC}}\right)^2 - 11,2277 \cdot \frac{\text{ASH}}{\text{VM}} + 4,4953 \cdot \left(\frac{\text{ASH}}{\text{VM}}\right)^2 - \\ & 0,7223 \cdot \left(\frac{\text{ASH}}{\text{VM}}\right)^3 + 0,0383 \cdot \left(\frac{\text{ASH}}{\text{VM}}\right)^4 + 0,0076 \cdot \frac{\text{FC}}{\text{ASH}}, \text{ (MJ.kg}^{-1}\text{)} \quad (2.6) \end{aligned}$$

Pro chybové hodnoty: střední absolutní odchylky 0,96 MJ.kg⁻¹, průměrnou absolutní chybu 5,88 % a průměrná chyba zkreslení 0,80 %

Výhřevnost tuhých paliv

V praxi se běžně počítá s výhřevností tuhého paliva, protože při jeho spalování paliv v topeništi odchází odpařená voda se spaliny do komína o vyšší teplotě, než je rosný bod vodní páry, takže nedochází k její kondenzaci, odnáší tedy sebou část tepla v podobě tepla výparného (Obroučka, 2001).

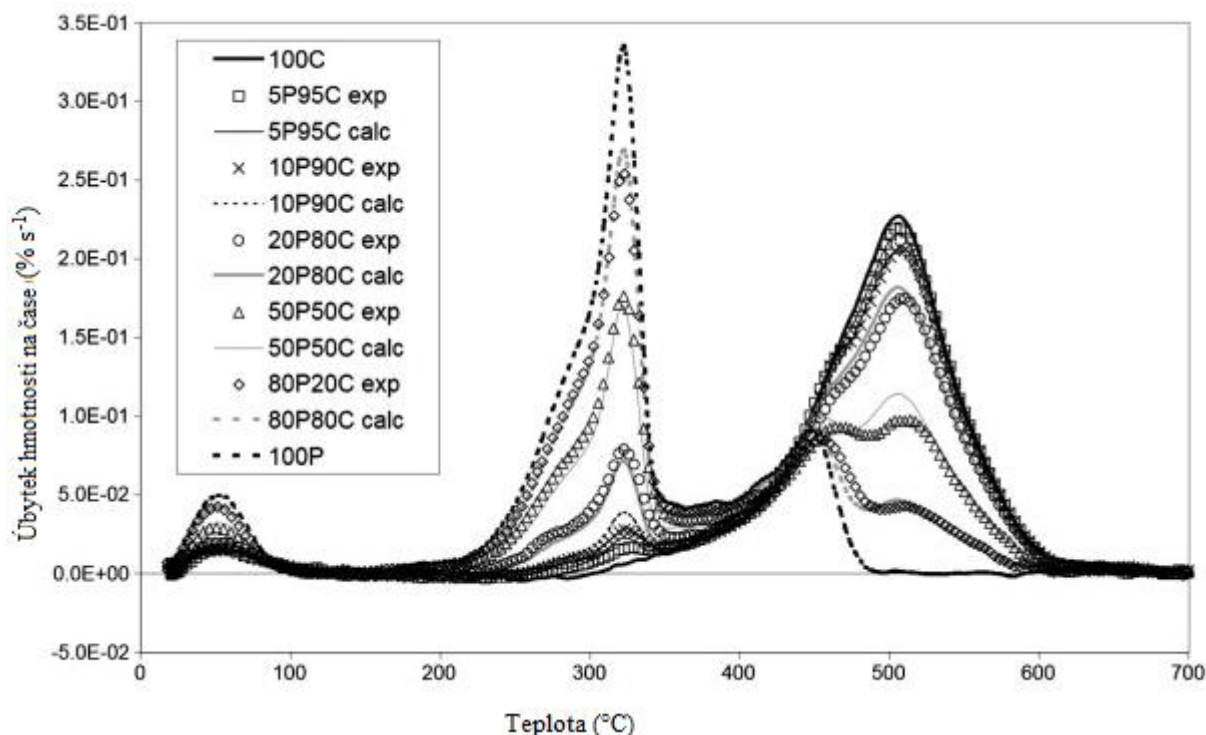
Závislostí mezi spalným teplem a výhřevností se zabývá norma pro tuhá biopaliva ČSN EN 14 918 v publikacích je označováno jako „lower heating value“ (LHV), nebo „net calorific value“ (NCV). Výpočet je uveden v metodice.

2.3 Analýza spalovacího procesu

Termogravimetrická analýza (TGA) je jednou z nejčastějších laboratorních metod používaných k vyšetřování a rychlému porovnání tepelného procesu a kinetiky spalování v průběhu spalování a pyrolýzy pevných surovin, jako je uhlí a dřevo. Jedná se o metodu, při které je vzorek vystaven tepelnému namáhání a na citlivých váhách je sledována změna jeho hmotnosti. Kromě toho, kvantitativní metody mohou být použity pro zpracování křivky TGA za účelem získání kinetických parametrů.

Znalost tepelných vlastností a kinetiky hoření biomasy je zásadní pro pochopení a modelování spalování v topeništích v průmyslovém měřítku (Munir et al, 2009). V posledních letech bylo zkoumáno mnoho technologií pro využití biomasy nebo alternativních paliv (spalování, zplyňování, pyrolýza a zkapalňování). Vlastnosti zkoumaných paliv lze nejlépe porovnat se spoluspalováním stávajících fosilních paliv. Někdy lze využít spalování paliv z biomasy společně s uhlím pro lepší kontrolu procesu hoření (Wang et al, 2009).

Pro spoluspalování bylo připraveno 12 vzorků z černého uhlí a pilin z borovice. Jde o 2 vzorky čistých paliv a 10 směsí v hmotnostním poměru sušiny pro obě paliva 5, 10, 20, 50 a 80%. Prvkový a palivový rozbor je uveden v tab. 2.1. Na obrázku 2.1 je znázorněna výsledná TGA analýza, z které je patrné, že k počáteční ztrátě hmotnosti došlo mezi teplotami 25 °C a 105 °C, což je pro všechny vzorky důsledek odpařování vody obsažené v palivu, fáze sušení. Piliny z borovice hořely ve dvou krocích: mezi 200 až 360 °C, kdy se uvolnila prchavá hořlavina, a mezi 360 a 490 °C, kdy došlo k spalování neprchavé hořlaviny. Uhlí hořelo pouze během jednoho spalovacího kroku a to mezi 315 a 615 °C (Gil et al, 2010).



Obr. 2.1: Termogravimetrická analýza směsi pilin a uhlí
Zdroj: Gil et al. (2010)

Tab. 2.1: Prvkový a palivový rozbor paliv TGA analýzy

Palivo	prchavá hořlavina	popel	uhlík	vodík	dusík	kyslík	síra	spalné teplo
	%	%	%	%	%	%	%	(MJ/kg)
uhlí (100C)	55,1	15,0	69,3	4,2	1,8	8,9	0,8	27,8
borovice (100P)	16,4	3,8	44,1	5,9	0,7	45,5	0,0	18,9

hmotnostní podíly vztaženy v % k sušině

Zdroj: Gil et al. (2010)

Pomocí TGA lze přehledně znázornit rozdílnou problematiku spalování fosilních a organických paliv. Velmi zajímavé využití TGA bylo např. při porovnání spalování prasečí kejdy a uhlí, prasečí kejda měla nejvyšší teplotní bod pro prchavou hořlavinu cca 270 °C a pro pevnou hořlavinu 460 °C (Otero, Sanchez, Gómez, 2011). TGA drůbežího trusu publikoval ve své práci Zhu, Lee, (2005). Míchání paliv jednotlivých kategorií je vhodné pro udržení průběhu hoření. Například 20 % a 40 % přídavek vlákniny z ligninu do pšeničné slámy, mění rychlost odpařování prchavé hořlaviny a ovlivňuje oxidaci. Uvolňování tepla je vyváženější (Jiříček, Rudasová, Žemlová, 2012).

2.4 Standardizace paliv

Paliva, která jsou uváděná na trh v ČR, musí být v souladu se zákonem č. 22/1997 Sb. V tomto zákoně je stanoven proces schvalování dle technických norem, certifikace a udělování autorizací Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO). Pokud je výrobek balen do obalů musí být splněn zákon o obalech č. 477/2001 Sb.

Standardizace paliv dle technických norem je vyžadovaná jak výrobcem paliva, spalovacího zařízení, tak odběrateli. Technické normy obsahují terminologii a klasifikaci paliv, metody odběru a zkoušení vzorků, stanovuje požadavek na fyzikálně chemické vlastnosti.

V rámci disertační práce a použití paliv v malých spalovacích zařízeních je věnována pozornost především tuhým biopalivům.

2.4.1 Tuhá paliva a biopaliva, pelety, brikety, štěpka a kusové dřevo

Paliva vyrobená z organických materiálů (dřevěná, rostlinná) jsou nazývána „biopaliva“ a na trhu jsou dostupné ve formě pelet nebo briket (štěpka spíše pro střední zdroje). Tvarově zpracovaná biopaliva mají pro spotřebitele výhodu, že se dají používat do automatických teplovodních kotlů či kamen. Z hlediska tepelně-emisních vlastností se jako palivo přibližují fosilním. Tvarově upravená biopaliva mají lepší emisní vlastnosti a vyšší výhřevnost než neupravená (štěpka, apod.). Z hlediska environmentálního a současného znění, zejména evropské legislativy, jde o ekologické palivo, které má nulovou produkci oxidu uhličitého (CO₂).

Obdobně jako u běžných druhů paliv jsou i u dřevních odpadů ukazatelem kvality paliva následující hodnoty (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010):

- obsah vody v palivu,
- chemické složení hořlaviny paliva,
- obsah popelovin v palivu,
- obsah prchavé hořlaviny,
- výhřevnost paliva Q_i .

Původní soubor evropských norem pro tuhá biopaliva EN 14 961-1 až EN 14 961-7 byl platný do konce roku 2014. Od počátku roku 2015 přešel celý systém pod mezinárodní standardy ISO v sedmi specifických normách:

- ISO 17 225-1, Obecné požadavky pro tuhá biopaliva.
- ISO 17 225-2, Tříděné dřevní pelety.
- ISO 17 225-3, Tříděné dřevní brikety.
- ISO 17 225-4, Tříděná dřevní štěpka.
- ISO 17 225-5, Tříděné palivové dřevo.
- ISO 17 225-6, Tříděné nedřevní pelety.
- ISO 17 225-7, Tříděné nedřevní brikety.

K souboru těchto sedmi norem ještě přibude standard pro Torrefakovaná biopaliva ISO 17 225-8, který zatím není v rámci ISO schválen.

Cílem této normy je poskytnout jednoznačné a jasné zásady klasifikace tuhých biopaliv a sloužit jako nástroj pro co nejefektivnější obchodování s biopalivy a také umožnit dobré porozumění mezi prodejcem a odběratelem. Norma obsahuje tabulky pro klasifikaci tuhých biopaliv podle obchodní formy, zdroje suroviny a jednotlivé specifikace tuhých

biopaliv. Dále obsahují typické fyzikálně chemické hodnoty tuhých biopaliv, příklady možných příčin odchylek od kvality tuhých biopaliv a přepočty výhřevnosti pro různé stavy, v souvislosti s obsahem vody. Dále jsou v technické normě ISO 17 225 uvedeny odkazy na normy, která stanovují, mechanické vlastnosti, velikost a průměr biopaliv a názvosloví.

Certifikáty

Pokud splňuje palivo určité parametry, lze k zvýhodnění jeho pozice na trhu využít možnost certifikace. V případě pelet např. k zapůjčení ochranné známky „Ekologický šetrný výrobek“ vydalo MŽP směrnici č. 55 – 2010. Při porovnání požadavku na kvalitu pelet, však vychází přísněji nová ISO 17 225-2. To souvisí zejména s implementací mezinárodní certifikace pelet ENplus do normy ISO 17 225-2, pod kterou se vyrábí více jak 50 % všech dřevních pelet na světě. V České republice, Rakousku, Itálii nebo Německu je to více jak 75 % všech dřevních pelet (Stupavský, 2016).

2.4.2 Alternativní paliva

Tuhá paliva vyráběná v režimu, kdy nebyla vyřazena z označení odpad, jsou označována jako Tuhá alternativní paliva (TAP).

Technické požadavky na TAP jsou uvedeny v 3 technických normách:

- ČSN EN 15 357: Tuhá alternativní paliva - Terminologie, definice a popis.
- ČSN EN 15 358: Tuhá alternativní paliva - Systémy managementu kvality - Specifické požadavky pro jejich použití při výrobě tuhých alternativních paliv.
- ČSN EN 15 359: Tuhá alternativní paliva - Specifikace a třídy Tuhá alternativní paliva.

TAP je materiál, který vznikne separací a úpravou odpadních materiálů složených z plastů, papíru, textilu, pryže a jiných spalitelných látek. Je to drcená směs látek z vybraných průmyslových a tříděných komunálních odpadů, které mají jasně definované složení látek a určenou granulometrickou strukturu, z níž vznikne palivová směs pravidelně kontrolovaných parametrů s minimálním obsahem nebezpečného odpadu a odpadu znečištěného nebezpečnými látkami. Pro výrobu TAP jsou důležité zejména fyzikální a chemické vlastnosti vstupních surovin, a druhů odpadů dle Katalogu odpadů, které splňují požadavky zařízení, ve kterých budou spalovány (Matoušek, 2009).

2.4.3 Torrefakovaná biopaliva

Výroba a využívání pelet se neustále rozšiřuje a zdálo by se, že již toto šetrné palivo narazilo na své technologické možnosti, jak jej více zlepšovat. Torrefakovaná biomasa má oproti tradiční biomase tři hlavní výhody, kterými jsou větší výhřevnost paliva, větší hustota energie a zlepšení řady fyzikálních vlastností, jako je tvarová stálost, stejnorodost a hydrofobní chování (Stupavský 2012).

Více informací o průběhu procesu torrefakace biomasy a technologie zvýšení účinnosti tohoto procesu jsou shrnuty ve více publikacích autorů např. Tumuluru et al. (2011) a Stelt et al. (2011), Acharya, Sule, Dutta (2012), Nhuchhen (2014) a Chen, Peng, Bi (2015). Uváděné výsledky naznačují, že torrefakace vlivem jemné pyrolýzy snižuje obsah prchavé hořlaviny obsažené v palivu biomasy a zvyšuje podíl pevného C a obsah popela na jednotku hmotnosti torrefakované biomasy (Anca-Couce, Obernberger, 2016). Celý mechanismus se skládá ze dvou reakcí a to rozkladu hemicelulózy a depolymerace celulózy a ligninu obsažených ve vzorku biomasy. To jsou dvě hlavní reakce procesu torrefakace, které uvolňují různé lehké těkavé plyny, včetně nekondenzovatelných plynů (CO_2 a CO) a kondenzovatelných plynů (voda, methanol a karboxylové kyseliny). Tímto dochází k zvýšení obsahu uhlíku a snižuje obsah H a O právě z prchavé hořlaviny (Nhuchhen et al., 2016).

V tab. 2.2 jsou uvedeny výsledné hodnoty torrefakovaných vzorků vrby seté a eukalyptu, tedy alternativních paliv potenciálně využitelných ve Velké Británii. Z tabulky byly vyjmuty obsah chloru (Cl) a K a jsou uvedeny hodnoty výsledné torrefakace při 290 °C po dobu 30 minut. Výhřevnost paliva se tak zvýšila o 24 % u vzorku vrby a o 45 % u vzorku eukalyptu (McNamee, 2015).

Tab. 2.2: Prvkový a palivový rozbor torrefakovaných vzorků

Palivo	Obsah vody	prchavá hořlavina	Pevný uhlík	popel	uhlík	vodík	dusík	kyslík	spalné teplo
		VM*	FC*	ASH*	C	H	N	O	HHV
	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ.kg ⁻¹
Vrba	6	84,4	15,1	0,5	49,1	5,8	0,5	44,6	19,6
Vrba Torr.	3,6	63,2	36,8	1,1	58,9	5,4	0,3	35,5	24,4
Eukalypt	8	79,6	18,8	1,6	50,8	5,4	0,4	43,4	19,6
Eukalypt Torr.	4,2	60,3	39,7	2,2	59,6	5,1	0,2	35,1	28,5

*k suchému stavu

Zdroj: McNamee (2015)

2.4.4 Ostatní alternativní paliva z organických odpadů a jejich budoucnost

Tekuté organické odpady jako kejda a další odpady jsou využívány zejména v bioplynových stanicích, kde při anaerobním procesu vzniká bioplyn, který je následně zpracován. Další skupinu tvoří plodiny pěstované pro energetické účely, zejména olejniny, škrobové rostliny a cukernaté plodiny, které se využívají zejména pro výrobu bionafty a lihu. Obě tyto skupiny se zdají být bez předchozí úpravy pro malé spalovací zdroje nevhodné, nebo příliš drahé.

Určitou alternativu do budoucna pro malé spalovací zdroje by mohlo představovat využití odpadních pyrolýzních produktů jako například biokoks, pyrolýzní olej, případně lokální využití syntézního plynu (Jevič, Šedivá, 2013).

2.5 Malá spalovací zařízení na pevná paliva

Malá spalovací zařízení byla kategorizována v původním zákonu o ochraně ovzduší 86/2002 Sb. jako zařízení o jmenovitém tepelném výkonu do 200 kW. Současný zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. kategorizaci vyjma rozdělení na mobilní a stacionární zdroj neuvádí, ale hovoří o povinnostech provozovatelů pro zdroje o jmenovitém tepelném příkonu do 300 kW. V rámci disertační práce bude věnována pozornost zdrojům do tepelného výkonu 50 kW.

V ČR jsou biopaliva hojně využívána zejména v malých spalovacích zařízeních s tepelným výkonem do 50 kW. Jde převážně o automatické kotle, krbové vložky a kamna, které jsou instalovány v rodinných domech nebo podnikových provozovnách. Rostlinná a alternativní biopaliva jsou na trhu novinkou a nebudí přílišný zájem. Je to způsobeno zhoršením provozních aspektů spalovacího zařízení, jde především o nižší výhřevnost paliva, horší emisní vlastnosti, špatné prohořívání paliva, struskování popele a ostatní nežádoucí jevy, které zkracují životnost zařízení.

Dle posledního sčítání lidu z roku 2011 bylo cca 621 tis. domácností vytápěno tuhými palivy. Ve srovnání s výsledkem sčítání lidu z roku 2001 se jasně ukazuje, že za posledních 10 let vzrostla obliba a podpora spalování paliv na bázi dřeva (nárůst o 88 % ze 152 tis. na 285 tis. domácností), zatímco ubývá zařízení, která spalují uhlí (pokles o 47 % z 570 tis. na 336 tis. domácností) (Horák et al., 2013). Tato spalovací zařízení jsou významným producentem znečišťujících látek.

2.5.1 Technologie malých spalovacích zařízení

Spalovací zařízení je konstruováno na spalování konkrétního typu paliva, které je definován mj. tvarem. V závislosti na spalování konkrétního typu je konstruován spalovací prostor kotle a ostatní příslušenství zdroje, které mají vliv na spalovací proces (přikládání, přívod spalovacího vzduchu). Pro paliva z biomasy z pravidla nelze využít spalovací zařízení na spalování uhlí, jelikož biomasa mj. hoří dlouhým plamenem.

Moderní spalování zdroje na biomasu dosahují účinnosti přes 90 % a používají sofistikované technologie pro řízení procesu s cílem minimalizovat jeho dopady na životní prostředí a zvyšování účinnosti (Leskens, Kessel, Bosgra 2013). V posledních letech se využívání biomasy jako paliva ve spalovacích zařízeních těšilo velkému zájmu, protože tyto zdroje představovaly alternativu a náhradu za spalování fosilních paliv. Nicméně, stále existují nevyřešené problémy související se složitostí procesu spalování biomasy, mezi něž patří mimo jiné relativně nízká teplota tání popela nebo, změny ve vlastnostech paliv. Navíc, zvýšení účinnosti a ekonomické proveditelnosti projektů využívající obnovitelné zdroje energie jsou často klíčové otázky (Strzalka et al, 2010). Jedním z problémů, biomasy jako paliva je různé složení paliva, jako je obsah vlhkosti, výhřevnosti a geometrického tvaru a velikosti (Shin, Choi, 2000). Kromě toho, stabilní spalování biomasy může být vždy dosaženo díky tomu, že běžně používané kontrolní strategie nejsou dosud zcela optimální (Bauer et al, 2010). Hlavním důvodem nestabilního provozu spalovacích zařízení na biomasu jsou především problémy související s popelem strusky a znečištění spalovacího prostoru, stejně jako její vliv na snížení životnosti spalovacího zařízení (Dare et al, 2001).

Spalovací zařízení s ručním přikládáním a pevným roštem

Tato spalovací zařízení jsou v ČR nejrozšířenější (dle odhadu ČZSO až 500 tis. domácností v ČR), jde o staré dosluhující zdroje, kterými jsou vybaveny rodinné domy, splňují emisní limity na úrovni třídy 1, nebo 2 a jsou velkým producentem emisí prachových částic. Jde o kamna, kotle a krbové vložky. Konstrukčně jde o jednoduché spalovací zařízení, které umožňuje ruční přikládání a ruční nastavení přívodu spalovacího primárního vzduchu, často bývají doplněna klapkou pro přívod sekundárního vzduchu pro spalování paliv, které vyžadují pro spalování větší přebytek vzduchu - dřevní biomasa. Hoření je realizováno na roštu, kde vyhořené palivo propadává do popelníku.

Mezi hlavní výhody tohoto zdroje tepla patří, že je to levný zdroj vytápění. Mezi nevýhody patří zejména nízká účinnost zařízení, která lze zvýšit instalací výměníku tepla do komínového systému. Náročný na obsluhu. Mezery v roštu limitují spalování drobných

materiálů (např. pelety), které jím propadnou, čímž se snižuje účinnost zařízení, a proto jsou využívány pro spalování briket nebo kusového dřeva. Od zpřísnění emisních limitů na teplovodní kotle, jsou zastoupeny tyto výrobky zejména v kategorii teplovzdušného způsobu vytápění (kamna, krbové vložky, atd.).

V letech 2010–2013 bylo na tuzemský trh dodáváno každoročně okolo 80 tisíc malých spalovacích zařízení na pevná paliva. Z toho bylo zhruba 20 tisíc krbových a kamnových vložek, přes 50 tisíc krbových kamen, přes okolo 6 tisíc kuchyňských sporáků a 1 tisíc kamen lázeňských. Zhruba polovina těchto zařízení je z dovozu. V letech 2010 až 2013 významně stoupl podíl novostaveb rodinných domů, které již v době kolaudace měly jako druhý zdroj vytápění krbová kamna nebo krb. V roce 2013 činil tento podíl 49 %. Podle hrubého odhadu by mohlo být koncem roku 2013 v provozu až 850 tisíc krbových kamen a krbových vložek, z toho necelých 90 tisíc s vodním výměníkem (MPO, 2015).

Zplyňovací spalovací zařízení

Zplyňovací kotel na kusové dřevo je vhodný pro ústřední vytápění rodinných domů nebo menších budov a pro přípravu teplé užitkové vody. Palivem mohou být polena nebo dřevěné brikety. Výkon kotle, který se dle provedení pohybuje mezi 10 až 100 kW, je možno regulovat. Oproti automatickým kotlům na pelety nebo štěpku se zde jedná o kotle s nízkou pořizovací cenou, ovšem kompenzovanou nutností pravidelné obsluhy. V kotlích se systémem zplyňování dřevního paliva se tvoří v zásobníku polen při nedokonalém hoření s omezeným přístupem (primárního) vzduchu spalný plyn, ke kterému se následně při průchodu tryskou přidává regulované množství sekundárního vzduchu. Směs prochází do dohořovací komory, kde dokonale prohoří. Nejrozšířenější a neúčinnější koncepce zplyňovacích kotlů je tvořena spodním odhoříváním paliva, existují však i starší kotle s horním odhoříváním nebo s postupným prohoříváním paliva. Účinnost zplyňovacích kotlů na biomasu je mezi 88 až 92 %, tepelný výkon je možno automaticky regulovat přívodem vzduchu v závislosti na venkovní teplotě a požadované vnitřní teplotě. Moderní zplyňovací kotle na biomasu nabízejí funkci automatizovaného zapalování paliva elektricky ohřátým vzduchem a ventilátorem (Stupavský, 2010, a).

V ČR byl tento zdroj velmi rozšířený a tato technologie rozvíjena zejména v 70. letech minulého století. Například spalovací zdroje Klemsa jsou zajímavým příkladem vývoje.

V současné době se tématem využívání dřevoplynu zabývají vědci zejména v oblasti malých kogeneračních jednotkách vybavených spalovacím motorem (ICE) nebo turbínou. Tyto zdroje představují zajímavou formu dostupné energie ve venkovských a odlehlých

oblastech. Při využití syntézního plynu ve spalovacím motoru je díky jeho účinnosti využito k výrobě elektrické energie přibližně 32 % z vyrobené tepelné energie, z toho zbytek tepelné energie je využitelný ve formě tepla pro vytápění a pro provoz zařízení (Coronado, Yoshioka, Silveira 2010).

Při porovnávání využití syntézního plynu oproti benzínu nebo methanu (zemní plyn), se po správném nastavení předstihu a komprese spalovacího motoru dosáhlo účinnosti 59 – 65 % oproti spalování benzínu v spalovacím motoru (Cento 2013).

Na základě ekonomické analýzy systémů 15 kW teplo, 6 kW elektrická energie, je i přes nulovou cenu paliva tento typ decentralizovaného zdroje zatím neekonomický, pokud by nebyl zvýhodněn tarifem pro výkup nevyužité elektrické energie z OZE dodané do el. sítě (Mc Henry, 2012).

Automatické kotle

Konstrukčního řešení automatických kotlů je využíváno v rámci malých výkonů pro spalování pelet a dřevní štěpky.

Pro automatické kotle na spalování pelet jsou jako palivo určeny dřevěné pelety. U některých kotlů je možno použít i jiné pelety, např. rostlinné, kůrové, slámové, apod. Po úpravě hořáku je možné spalovat i slupky z ořechů apod. Moderní peletové kotle jsou plně automatizovaná zařízení s dobrými spalovacími vlastnostmi s nízkými emisemi díky přesnému elektronicky řízenému systému dávkování paliva a spalného vzduchu. Tepelný výkon je řízen plynule regulovaným přívodem paliva a vzduchu. Účinnost kotle dosahuje až 94 %. Důležitou součástí peletového kotle je hořák, základní typy hořáku jsou podsuvný nebo hrncový hořák. Zapalování kotle se děje automaticky horkým vzduchem, přísun paliva do hořáku je také automatický a zpravidla elektronicky řízený. Pelety jsou dávkovány na odhořivací talíř nebo šnekovým dopravníkem do odhořivacího hrnce (Stupavský, 2010, b).

Důležitou součástí kotle na štěpku je hořák a systém uchycení roštu, u kotlů menších výkonů se používají hořáky horizontální, hořáky s posuvným plněním nebo hořáky retortové (Stupavský, 2010, c).

2.5.2 Problematika provozu malých spalovacích zařízení

Díky spalování biomasy dochází k významné tvorbě škodlivých látek, a proto je třeba tento proces zlepšit. Je prokázáno, že k tvorbě znečišťujících látek dochází v důsledku dvou důvodů:

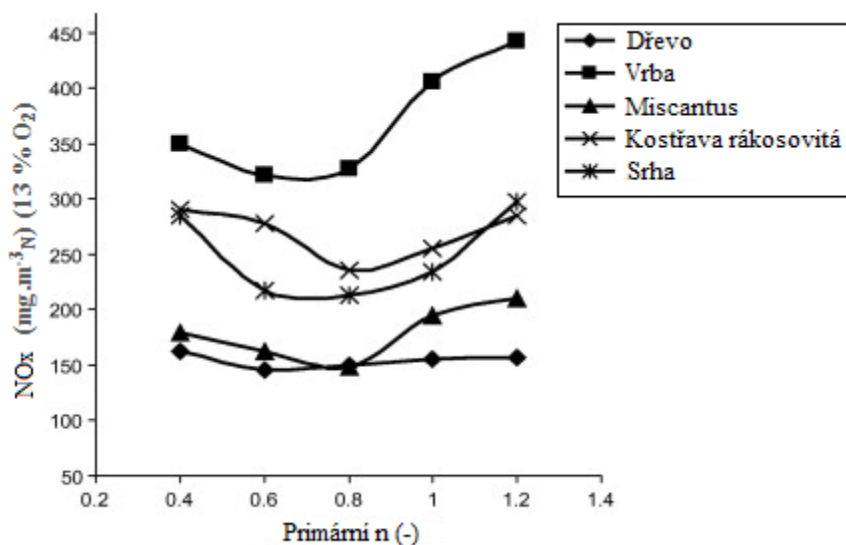
- 1) Nedokonalé spalování může vést k vysokým emisím koncentracím znečišťujících látek, jako jsou CO, saze a polycyklické aromatické uhlovodíky.
- 2) Znečišťující látky, jako jsou oxidy dusíku (NO_x) a pevné prachové částice (PM) jsou tvořeny v důsledku palivových složek, jako je N, K, Cl, Ca, Na, Mg, P, a S.

Z tohoto důvodu spalovací zdroje na biomasu vykazují poměrně vysoké emise NO_x a PM. Jako opatření pro jejich snížení se osvědčilo postupné spalování v rámci dávkování paliva a spalovacího vzduchu díky, kterému dochází ke snížení emisí NO_x až 50 – 80 %. Metodika snižování primárního spalovacího vzduchu je prezentována jako opatření, které by mohly vést k nové konstrukce spalovacích zdrojů se sníženými emisemi pevných částic. Dále je zapotřebí podporovat snahy pro optimální provoz zařízení pro zajištění nízké emise a vysokou účinnost v reálných podmínkách (Nussbaumer, 2003).

2.5.2.1 Snížení emisních koncentrací regulací spalovacího procesu

Výzkumem snížení emisí NO_x vlivem řízení spalovacího vzduchu se zabýval mj. Carroll et al. (2016). Pět různých vzorků biomasy bylo spalováno v malém zplyňovacím zdroji o výkonu 35 kW. Sledovanými provozními parametry byly poměr spalovacího vzduchu v primární zplyňovací komoře, teplota primární spalovací komory a celkový vliv přebytečného vzduchu, na produkci emisí NO_x a PM. Z měření bylo prokázáno, že změnou poměru primárního spalovacího vzduchu dochází ke snížení emisí NO_x v rozmezí od 15 % pro dřevo a 30 % pro Miscanthus. Dále ke snížení emisí PM v hodnotách 16 % pro vzorek srhy a 26 % pro dřevo. Pro všechna paliva, dochází k největšímu poklesu emisí při poměru primárního vzduchu na hodnotě 0,8, viz obrázek 2.2.

Celkový poměr přebytečného spalovacího vzduchu, měřený na výstupu ze zdroje nemá žádný vliv na emise pro žádné palivo. Emise PM a NO_x z posuzovaných paliv biomasy lze minimalizovat tím, že se optimalizuje poměr primárního vzduchu a že se udržuje teplota v primární spalovací komoře přibližně okolo 900 °C (Carroll et al., 2016).



Obr. 2.2: Vliv primárního přebytku vzduchu na emise NO_x
Zdroj: Carroll et al. (2016)

2.5.2.2 Snížení emisí přidávkou aditiv do paliva

Carroll, Finnan (2014) prováděl pokus, jehož záměrem bylo snížit emise PM přidáním aditiv do paliva. Jako aditivum použil rašelínu (0, 25, 50, 75 a 100% hm.) a kaolin (0, 1, 4, 7% hm.) v peletách vyrobených z Miscanthusu a kostřavy rákosovité.

Aditivum rašelina

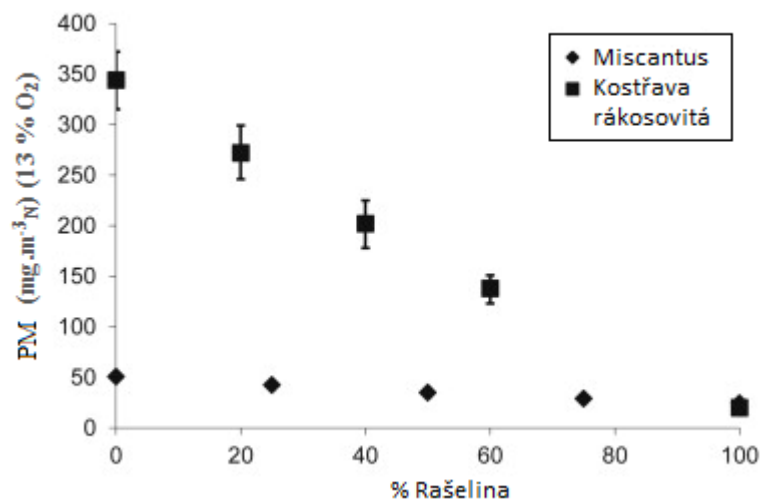
Na obrázku 2.3 je uveden výsledek analýzy. Aditivum rašeliny má významný vliv pouze na snížení produkce PM u vzorku kostřavy, což je způsobeno díky jejímu chemickému složení. U obou vzorků došlo k zvýšení produkce emisí NO_x, které je odstranitelné snížením spalovacího vzduchu v primární spalovací komoře Carroll, Finnan (2014).

Na podobné výsledky poukazuje Pommer et al. (2009), při spalování směsi rašeliny a lesních zbytků a Fageström et al. (2010), který prezentoval významné snížení jemných pevných částic směsi a paliv na popel bohaté biomasy (pšeničné slámy a lesního odpadu).

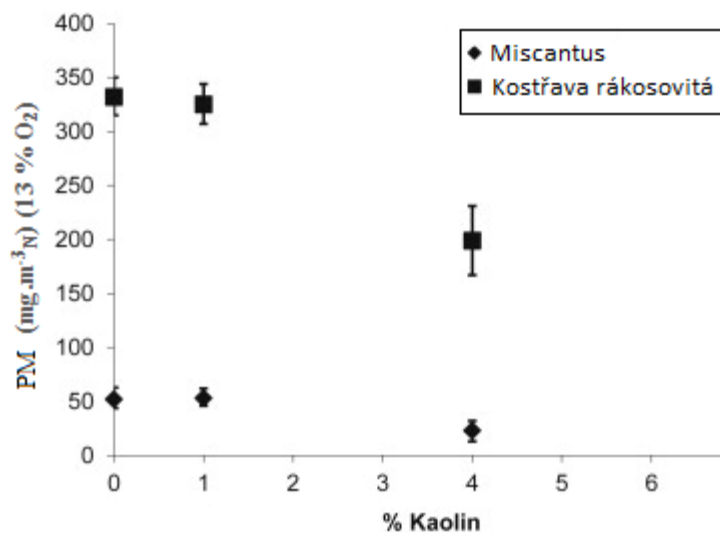
Aditivum kaolin

Kaolin má velmi vysokou koncentraci prvků v popelu Si (46 %) a Al (40 %). Na obrázku 2.4 je uvedena analýza, z které je patrné, že k nejvyššímu snížení emisí PM dochází u pelet s obsahem kaolinu 4 %. Zvýšené koncentrace Si a Al mají za důsledek výrazné

zvýšení teploty tání popela, a proto popel obsahuje méně strusky (Carroll, Finnan, 2014). Shodné výsledky s 4 % kaolínu také potvrdily studie Bäfver, Boman, Rönnbäck (2011) a Boman, Boström, Öhman (2008) při spalování slaměných a dřevních pelet.



Obr. 2.3: Vliv obsahu aditiva rašeliny na emise PM
Zdroj: Carroll, Finnan (2014)

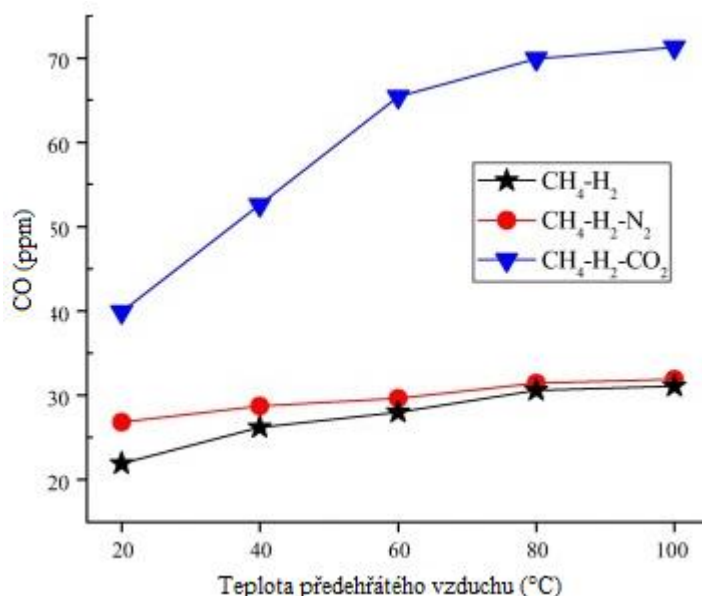


Obr. 2.4: Vliv obsahu aditiva kaolínu na emise PM
Zdroj: Carroll, Finnan (2014)

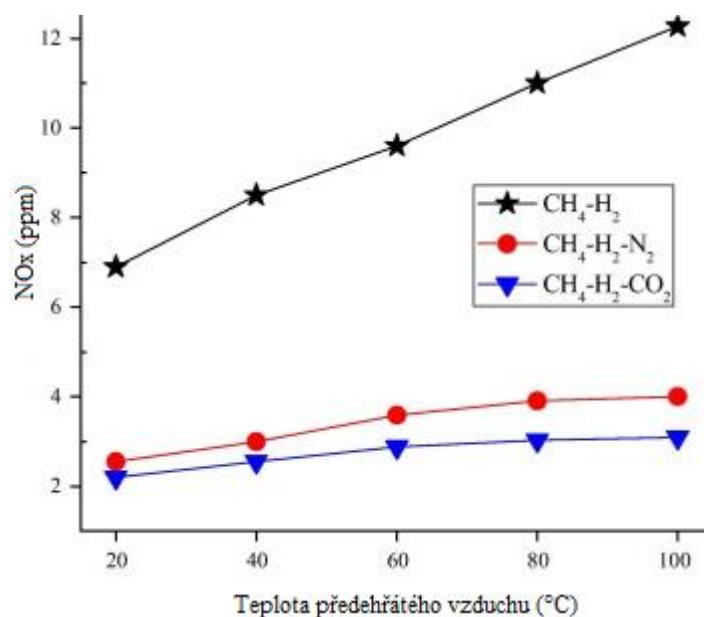
2.5.2.3 Předehřev spalovacího vzduchu a recirkulace spalin

Recirkulace spalin (FGR) se využívá ve velkých průmyslových pecích pro úsporu energie. Zhen et al. (2016) prováděl experiment se třemi plynnými palivy ve složení $\text{CH}_4\text{-H}_2$, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ a $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$. Směs plynů byla předehřívána na 20 – 100 °C, jako spalovací zdroj byl využit Bunsenův kahan. Na obr. 2.5 je uvedena závislost emisních koncentrací CO na teplotě předehřátého vzduchu. U paliva ve složení $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$ dochází k nejvyššímu nárůstu emisních koncentrací CO. Příčinou toho procesu je přítomnost CO_2 , který má buď vliv na vyšší teplotu plamene, která podporuje disociaci CO_2 nebo vliv zpětných chemických reakcí (Zhen et al., 2016).

Na obr. 2.6 je uvedena závislost emisních koncentrací NO_x na teplotě předehřátého vzduchu. U paliva ve složení $\text{CH}_4\text{-H}_2$ dochází k nejvyššímu nárůstu emisních koncentrací NO_x . Příčinou toho procesu je vyšší teplota plamene, která podporuje teplotní mechanismus tvorby NO_x (Zhen et al., 2016). Při recirkulaci spalin dochází rovněž k zvýšení emisních koncentrací CO a NO_x v závislosti na množství recirkulovaných spalin Weber, Smart, Kamp (2005), Zhen et al. (2016).



Obr. 2.5: Vliv předehřátého spalovacího vzduchu na emisní koncentrace CO
Zdroj: Zhen et al. (2016)



Obr. 2.6: Vliv předehřátého spalovacího vzduchu na emisní koncentrace NO_x
Zdroj: Zhen et al. (2016)

2.6 Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů

Důsledkem nekontrolovaného spalování biopaliv dochází k uvolňování řady látek znečišťujících ovzduší (Boubel R., 1994). Van Loo a Koppejan (2008) sestavili seznam hlavních emisí vznikajících při spalování dřeva: CO₂, oxid uhelnatý CO, methan (CH₄), prchavé nemethanové organické sloučeniny (NMOC), NO_x a oxid dusný (N₂O), amoniak (NH₃), oxidů síry (SO_x), PM, dále též stopová množství těžkých kovů, dioxinů a polychlorovaných dibenzo-p-dioxinů (PCDD) a polychlorovaných dibenzofuranů (PCDF).

Při spalování materiálu s obsahem Cl mohou vznikat toxické sloučeniny např. dioxiny a furany. Tyto látky patří do skupiny velmi jemných částic (průměr částic méně než 1 μm), které jsou uvolňovány do ovzduší při spalování dřeva. Dioxiny a furany, nacházející se ve vodě, půdě a potravě, mohou mít negativní vliv na lidské zdraví, např. podílet se na rozvoji rakoviny, působit imunotoxicky anebo způsobit poruchy v metabolismu lipidů (Flesch-Janys D., 1995).

Bylo pozorováno, že u lidí vystavených účinkům dioxinů a furanů docházelo ke zvýšenému počtu úmrtí v důsledku všech typů rakoviny včetně rakoviny konečníku a plic (Bertazzi PA, 2001). Mezi hlavní působení dioxinů a furanů patří negativní vliv na endokrinní a reprodukční systém (Kogevinas M, 2001). Kovy jako jsou Na, K, kadmium (Cd), Pb, rtuť

(Hg) anebo arsen (As), které je možné detekovat ve spalinách při spalování dřevěných částic, mohou mít toxický vliv na lidské zdraví i při velmi nízkých koncentracích (Harrison RM, 2000).

Aerosol je heterogenní směs malých pevných nebo kapalných částic v plynu. První případ se také označuje jako dým, druhý jako mlha. Rozptýlené částice mají velikost od 10 nm do 10 μm , což odpovídá shlukům několika molekul až částicím tak hmotným, že už nemohou snadno poletovat v atmosféře. Samet a kol. (2000) objevili korelaci mezi úrovní koncentrace PM₁₀ (pevných částic s průměrem 10 μm) v okolním vzduchu a mírou úmrtí. Pope a kol. (2002) došel k závěru, že dlouhodobá expozice PM vzniklých při spalování, má za následek zvýšení rizika úmrtí v důsledku rakoviny kardiopulmonálního systému přibližně o 6 % – 8 % (Peters A, 1997). Vystavení velmi jemným pevným částicím (0.01–2.5 μm PM_{2.5}) může zvýšit riziko incidence závažného onemocnění respirační soustavy (Peters A, 1997). Stejně tak i chemické složení pevných částic má vliv na závažnosti a typ účinku na zdraví.

Z výše uvedených důvodů by měla mít kontrola koncentrací a složení prachových částic ve vzduchu nejvyšší důležitost pro územní samosprávy (Harrison RM, 2000).

2.6.1 Laboratorní přístroje a postupy měření malých spalovacích zařízení

Každé spalovací zařízení určené k vytápění prochází certifikací v autorizované zkušebně, která ověřuje jeho základní tepelné, technické a bezpečnostní parametry, mezi které patří také úroveň produkovaných škodlivin. Zkoušení spalovacích zařízení je prováděno dle postupů uvedených v příslušných normách. Pro jednotlivá zařízení spalující tuhá paliva jsou platné tyto normy:

- ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW – terminologie, požadavky a zkoušení.
- ČSN EN 12 815: Varné spotřebiče pro domácnost na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody (sporáky).
- ČSN EN 13 240: Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů – Požadavky a zkušební metody (krbová kamna).
- ČSN EN 13 229: Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody (krbové vložky).

Z pohledu měření emisí řeší normy zejména umístění odběrových sond a rozměry měřicího úseku. Měření koncentrací škodlivin je prováděno po celou periodu spalovací

zkoušky v závislosti na typu spalovacího zařízení a požadavku normy a výsledná hodnota je stanovena jako průměr z celé zkoušky. Hodnoty jsou přepočítávány na referenční koncentraci kyslíku tak, aby bylo možno získané výsledky srovnat s limity (a také proto, aby výrobci nemohli „zlepšovat“ emisní parametry svých kotlů přísáváním vzduchu do spalin za kotlem) (Krpec, 2012).

Účinnost spalovacího zařízení je možné přibližně odhadnout pomocí tzv. nepřímé metody stanovení účinnosti. Metoda vychází z předpokladu, že účinnost zařízení je rovna 100 % minus jednotlivé ztráty spalovacího zařízení (především komínová ztráta). Teplotu spalin bychom u krbových kamen měli udržovat v rozsahu od 150 do 250 °C. Pokud bude teplota příliš vysoká, provozujeme zařízení s velkou komínovou ztrátou, což znamená, že mnoho tepla „vyletí“ komínem. Přestože se snižující teplotou spalin, klesá hodnota komínové ztráty, nemůžeme teplotu spalin snižovat donekonečna, protože pokud budou spaliny příliš chladné (cca 150 °C, záleží na složení spalin, zejména obsah vody), může dojít ke kondenzaci dehtových látek a vodní páry (kratší životnost zařízení) a při nízké teplotě spalin může dojít i k výraznému snížení komínového tahu (problém s bezpečným odvodem spalin). Pokud teplotu spalin měříme, známe typ zařízení a jsme schopni odhadnout těsnost zařízení, můžeme orientačně spočítat, jaká je účinnost zdroje (Lyčka, 2011; Horák et al, 2012).

2.6.1.1 Měření koncentrace plyných škodlivin

K měření koncentrace plyných škodlivin ve spalinách se využívá plynových analyzátorů.

Ruční přenosné analyzátory spalin

Přenosné analyzátory spalin jsou většinou vhodné pro rychlé stanovení koncentrací základních škodlivin ve spalinách. Pracují na principu elektrochemických převodníků. Přístroje jsou schopny analyzovat dle instalovaných elektrochemických čidel koncentrace CO, CO₂, O₂, SO₂, NO. (Krpec, 2012).

Stacionární analyzátory spalin

Stacionární analyzátory spalin jsou využívány na zkušebnách kotlů a při monitorování větších zdrojů znečištění. Disponují kvalitní úpravou a dopravou vzorku spalin – chladnička vzorku, kyselinové a prachové filtry, hlídání průtoku vzorku. Základní složky spalin jsou měřeny na principu absorpce IR záření ve vzorku spalin (CO, CO₂, NO, SO₂). Koncentrace O₂ ve spalinách je pak stanovena paramagnetickým principem. Analyzátory mohou být vícerozsahové. (Krpec, 2012).

Vyhodnocení měření

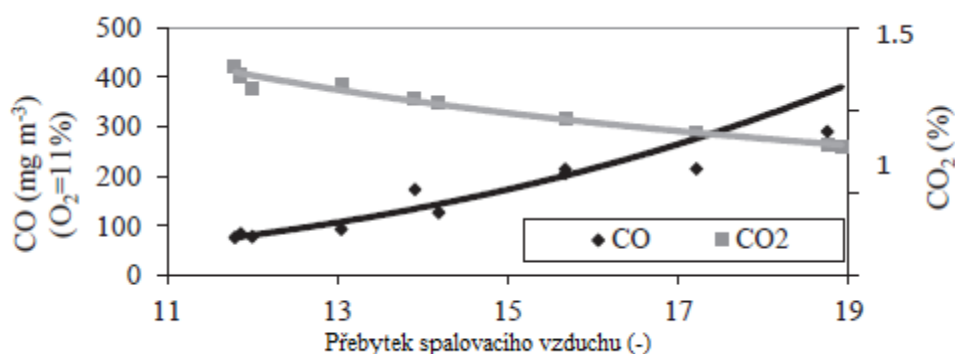
Vyhodnocení naměřených hodnot je potom provedeno buď v průměrných hodnotách emisních koncentrací CO a NO_x. Nebo jsou emisní koncentrace vyhodnocovány v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu, jako například uvádí Skanderová, Malaťák, Bradna (2015) při spalování pelet z kompostu v automatických peletových kamnech. Prvkový a technický rozbor vzorku je uveden v tab. 2.3.

Tab. 2.3: Prvkový rozbor vzorku pelet z kompostu

Palivo	Obsah vody	popel	uhlík	vodík	dusík	kyslík	síra	spalné teplo	výhřevnost
	W	ASH	C	H	N	O	S	Q _s	Q _i
	%	%	%	%	%	%	%	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
Pelety kompost	6,72	36,85	29,30	2,95	1,03	23,13	0,00	11,05	10,24

Zdroj: Skanderová, Malaťák, Bradna (2015)

Průběh emisních koncentrací CO v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu je uveden na obr. 2.7. Emisní koncentrace CO rostou se součinitelem přebytku spalovacího vzduchu. Celý spalovací proces probíhá za relativně vysokého přebytku spalovacího vzduchu. Takto vyjádřené hodnoty umožňují nastavení optimálního provozního parametru, tedy množství spalovacího vzduchu, při kterém dochází k nejmenší tvorbě emisních koncentrací CO.



Obr. 2.7: Vliv emisních koncentrací CO a CO₂ v závislosti na přebytku vzduchu
Zdroj: Skanderová, Malaťák, Bradna (2015)

2.6.1.2 Měření koncentrace prachu ve spalínách

Zatímco měření koncentrace plynných škodlivin je za dodržení určitých podmínek v podstatě bezproblémovou záležitostí, stanovení koncentrace prachu (TZL) ve spalínách je složitější. K měření se využívá například ředící tunel, nebo gravimetrické přenosné analyzátoři. Gravimetrická metodika vychází z ISO 9096. Kromě klasického gravimetrického způsobu stanovení koncentrace TZL ve spalínách z malých zdrojů znečišťování se nabízejí ještě další možnosti. Jedná se např. o optické prachoměry pracujícími na principu rozptylu laserového paprsku, záchyt TZL v elektroodlučovači, triboelektrické prachoměry, atd. Většinou se jedná o zařízení určená pro měření na větších zdrojích znečišťování. Před měřením je nutno je kalibrovat na konkrétní typ prachu pomocí gravimetrické metody a proto nejsou běžně využívány. Měření koncentrace TZL (z malých zdrojů znečištění) ve spalínách je komplikované a neexistuje úplně jednotný postup pro měření. V současné době lze pozorovat snahy napříč celou EU o vytvoření jednotného způsobu měření (Krpec, 2012).

2.6.1.3 Dynamický komínový tah

Jedná se o výpočet tlakové diference způsobené prouděním vzduchu, bez ohledu na způsob vzniku tohoto proudění. Výpočet vychází z dynamicky a tudíž vnějšími vlivy ovlivněné veličiny, a to rychlosti proudění. Výsledky jsou tedy prakticky relevantní a měřitelné. Výpočet dynamického komínového tlaku je uveden ve vztahu (Sodomka, 2015):

$$P_d = \frac{v^2}{2} \rho_{stř.} \cdot c, \text{ (Pa)} \quad (2.7)$$

Kde je:

v	rychlost proudění spalin ve spalinové cestě v (m.s ⁻¹),
$\rho_{stř.}$	střední hustota spalin (kg.m ⁻³),
c	součinitel místního odporu (-).

2.6.2 Provoz malého spalovacího zařízení

Povinnost provozovatele

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší nově zavádí povinnosti pro provozovatele spalovacích zařízení. Zákon zakazuje ve všech spalovacích zařízeních do příkonu 300 kW spalování lignitu, hnědého energetického uhlí a kalů (dle § 17 odst. 5). Dále se na všechny spalovací zařízení vztahuje ustanovení o přípustné tmavosti kouře (dle § 17 odst. 1).

Pro stacionární spalovací zdroje na pevná paliva o jmenovitém tepelném příkonu od 10 do 300 kW včetně, který slouží jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění, je provozovatel povinen dle § 17 odst. h) provádět jednou za dva kalendářní roky kontrolu technického stavu a provozu spalovacího zařízení prostřednictvím osoby, proškolené výrobcem zařízení a oprávněné k jeho instalaci (odborně způsobilá osoba). První kontrolu musí provozovatel zajistit nejpozději do 31. 12. 2016 (dle § 41, odst. 15). Doklad o provedení výše zmíněné kontroly má provozovatel povinnost předložit na základě žádosti obecního úřadu obce s rozšířenou působností.

Od září 2022 (dle § 41, odst. 16) bude možné provozovat pouze taková zařízení (nejen kotle, ale i lokální topeniště pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění o celkovém příkonu od 10 do 300 kW, která splňují požadavek, viz tab. 5.2 v kapitole 5.2.

Základní limit pro koncentrace CO je nyní v EU 1 %, což je v současné době hodnota překonaná a neodpovídá vývoji těchto spotřebičů. Vzhledem k tomu, že poslední opravy souvisejících norem vyšly v roce 2008, hlavní břímě zvyšování požadavků zůstává na legislativě jednotlivých států (Horák, 2013).

3. Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je zabývat se problematikou využíváním organických odpadů jako paliv pro spalovací zařízení o malých tepelných výkonech. Pro řešení této problematiky tepelného využívání tuhých organických odpadů v malých spalovacích zařízeních jsou předloženy odborné hypotézy.

Hypotéza 1: *„Největší vliv na kvalitu spalovacího procesu má množství přiváděného spalovacího vzduchu, který ovlivňuje účinnost spalovacího zařízení.“*

Hypotéza 2: *„Přebytek vzduchu je velmi důležitou provozní veličinou, která ovlivňuje jednotlivé emisní koncentrace oxidu uhelnatého při spalování organických odpadů.“*

Hypotéza 3: *„Největší tepelné ztráty spalovacího zařízení jsou ztráty citelným teplem odcházejících spalin, ostatní tepelné ztráty jsou zanedbatelné.“*

Hypotéza 4: *„Největší vliv na tepelné vlastnosti vzorků tuhých organických odpadů má voda obsažená v palivu, která vedle popelovin nejvíce ovlivňuje tepelné účinnosti spalovacího zařízení.“*

Pro potvrzení či vyvrácení těchto hypotéz je potřeba stanovit následující cíle:

- 1) Provést literární rešerši zkoumaného tématu a seznámit se s nejnovějšími poznatky v oboru. Zejména s legislativními podmínkami, a to především v oblasti emisních limitů.
- 2) U posuzovaných vzorků paliv, které mají nejasné složení nebo svým charakterem neodpovídají běžným palivům, bude proveden technický rozbor, z kterého bude za nejnovějších poznatků v oboru stanovena prvková analýza a další potřebné palivářské vlastnosti.
- 3) Spálení vybraných vzorků paliv realizovat na vhodném spalovacím zařízení. Při spalování provést měření tepelně-emisních parametrů, zejména teploty spalin, emisních koncentrací O₂, CO a NO_x ve spalinách pomocí plynového analyzátoru.
- 4) Pokud bude palivo svým charakterem odlišné od paliva v katalogu paliv analyzátoru, je nutné pro vyhodnocení naměřených hodnot provést stechiometrickou analýzu.
- 5) Provést analýzu naměřených hodnot a potvrdit nebo vyvrátit vyřčené hypotézy.

4 Materiály a metody

Metodika řešení jednotlivých hypotéz a cílů disertační práce je založena na analytickém zpracování naměřených a vypočítaných hodnot a jejich syntéze. Metodika proto vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců biopaliv a charakteristiky souvisejících právních předpisů, typů běžných lisovaných biopaliv a právních předpisů v oblasti emisních limitů a kvality paliv z hlediska ochrany ovzduší.

Zjišťování tepelně-emisních parametrů organických odpadů je uskutečněno především na zhutněných palivech. Ta mohou být zhutněna do různých tvarů, velikostí a za použití různých lisovacích tlaků. Použity budou zhutněné materiály v podobě pelet a briket. Pokud paliva nejsou zhutněna do kompaktních tvarů, zabírají velký objem, zvyšují náklady na dopravu, přepravu a uskladnění. Při jejich hoření dochází k rychlému vzplanutí a předání jen části měrného tepla, naopak lisovaná paliva při hoření vydrží v topeništi déle (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010).

Pro stanovení, zpracování a vyhodnocení výsledných tepelně-emisních procesů ve spalovacích zařízeních budou použity jednotlivé metodiky.

4.1 Metodika měření a výpočtu emisních koncentrací

Emisní koncentrace ve spalinách byly měřeny pomocí přenosných plynových analyzátorů. Odběrové sondy byly instalovány do měřicího otvoru v komínu. Naměřené hodnoty je potřeba za použití stechiometrie převést na normální podmínky a pro legislativou požadovaný obsah vzduchu.

4.1.1 Analyzátory spalin

Při měření v laboratorních podmínkách bylo použito analyzátoru spalin Madur GA-60 (viz obr. 4.1). Měření v provozu bylo realizováno pomocí přístroje Casper 301 od firmy Seitron (viz obr. 4.1). Oba přístroje fungují na stejném principu a byly kalibrovány v autorizované laboratoři, splňují podmínky souboru norem ČSN EN 50 379-1-2-3. Jejich technické údaje jsou uvedeny v tab. 4.1

Měření spalovacího zařízení musí probíhat dle typu zařízení (kotel, křbová vložka, kamna). Plynový analyzátor je vybaven měřicí odsávací sondou. Odsávací sonda se instaluje do kouřovodu, tak aby její náustek byl ve středu spalinové cesty a umožnil odběr středního

proudu emisí a co nejbližší k výstupnímu hrdlu spalovacího zařízení, což odpovídá vzdálenosti dvou průměrů spalovací cesty. Při laboratorní certifikaci spalovacích zařízení jsou vzdálenosti odběrných bodů (teplota, tlak) předepsány příslušnou normou na základě průměru spalinové cesty a jejímu způsobu vyvedení ze spalovacího zařízení. Odsávací sonda je vybavena hadicí napojenou na tělo analyzátoru. Součástí analyzátoru je membránová pumpa, která vytvořením podtlaku umožní odběr vzorku spalin z komína, a jejich dopravu do těla analyzátoru. Těsně před vstupem do těla analyzátoru je hadice vybavena filtrem a odlučovačem kondenzátu. Teplota spalin je měřena pomocí termočlánku instalovaného v odběrné sondě, teplota okolí pomocí termočlánku v těle analyzátoru. Vzorek spalin je tak dopraven na elektrochemické převodníky a tím dochází k stanovení koncentrace škodlivin v odebíraném vzorku. Oba přístroje jsou vybaveny elektrochemickými senzory pro O₂, CO, NO. Přístroj přebírá signály ze všech převodníků a s využitím charakteristik převodníků, nastavených kalibračními plyny, pak průběžně vypočítává koncentrace jednotlivých složek.

Přístroj tak pomocí uvedených senzorů měří:

- Teplotu spalin (° C).
- Teplotu okolí (° C).
- Koncentraci O₂ (%).
- Koncentraci CO (ppm).
- Koncentraci NO (ppm).



Obr. 4.1: Analyzátor Madur GA60, analyzátor Casper 301

- Zdroj: www.madur.com, www.seitron.com

Tab. 4.1: Technické údaje analyzátorů pro měřené veličiny

Parametr	jednotka	Madur GA60	Casper 301
O ₂	%	0 - 20,95	0 - 25
CO	ppm	0 - 20 000	0 - 8 000
NO	ppm	0 - 5 000	0 - 5 000
NO ₂	ppm	0 - 800	x
SO ₂	ppm	0 - 2 000	x
Tlak	Pa	± 5 000	0 - 10 000
Teplota okolí	°C	0 - 100	-20 - 120
Teplota spalin	°C	0 - 1 300	-30 - 900

* odchylky a rozsah měřených hodnot u obou analyzátorů splňují podmínky ČSN EN 50 379

Naměřené hodnoty jsou u obou přístrojů zobrazeny na LCD monitoru. Analyzátoři dále dopočítávají a zobrazují další hodnoty, viz následující kapitola. V případě analyzátoru Madur GA60, lze uložit až 786 souborů dat, které lze ukládat do paměti přístroje ve zvoleném časovém intervalu. Tyto hodnoty lze po ukončení měření stáhnout pomocí sériového rozhraní RS 232C stáhnout s pomocí softwaru od firmy Madur exportovat do stolního počítače (PC) ve formátu .csv a hodnoty analyzovat např. v programu MS Excel, nebo zpracovat z průměrných hodnot protokol, který lze vytisknout integrovanou termotiskárnou. Casper 301 umožňuje na rozdíl od přístroje Madur GA60 provést jen 300 analýz, které lze exportovat pomocí rozhraní mini USB rovněž do programu MS Excel. Přičemž jedna analýza je zpracována jako průměr ze tří po sobě jdoucích zaznamenaných hodnot. Casper 301 lze rovněž dovybavit termotiskárnou, není však součástí přístroje. Madur GA60, tak umožňuje přehlednější měření při delších měřeních, díky průběžnému ukládání naměřených a dopočtených hodnot.

4.1.1.1 *Emisní koncentrace vypočtené analyzátořem*

Analyzátoři spalin jsou vybaveny mikroprocesorem, který automaticky dopočítá ostatní posuzované parametry, a zejména přepočítávají naměřené hodnoty emisních koncentrací na přebytek kyslíku dle legislativních požadavků. K dopočítání ostatních parametrů využívá analyzátor tabulku paliv. To znamená, že pro každé měřené palivo se vybere ze seznamu palivo. V tab. 4.2 je uveden částečný výpis pro paliva která odpovídají svým charakterem posuzovaným vzorkům. Zdrojem je katalog paliv analyzátoru Casper 301, který je přebírá z normy UNI 10 389.

Tab. 4.2: Technické údaje analyzátorů pro měřené veličiny

Název paliva	CO _{2max}	A1	A2	B	CO konv	NO konv	NO _x konv	SO ₂ konv
	(%)	-	-	-	-			
Dřevo 20%	18,93	0,761	0,686	0,0089	1,166	1,249	1,915	2,665
Uhlí	19,06	0,762	0,691	0,0023	1,165	1,248	1,914	2,663
Pelety 8%	19,01	0,74	0,67	0,0071	1,135	1,216	1,864	2,594

*8% a 20% udávají hmotnostní podíl vody v palivu

Výpočet obsahu oxidu uhličitého

$$CO_2 = CO_{2max} \cdot \left(1 - \frac{O_{2m}}{20,95}\right) \quad (4.1)$$

Kde je: CO_{2max} je maximální obsah oxidu uhličitého, z katalogu paliv,
 O_{2m} přímo měřený obsah kyslíku ve spalinách (% hm.),
 20,95 obsah kyslíku ve vzduchu (% hm.).

Výpočet obsahu NO_x

Vztah pro analyzátor Madur GA60 a pro Casper 301.

$$NO_x = NO + NO_2 \quad (4.2)$$

$$NO_x = NO \times 1,05$$

Kde: NO a NO_x jsou hodnoty přímo měřené v ppm.

Hmotnostní koncentrace

Analyzátor využívá pro převod hodnot v ppm na hmotnostní koncentraci (mg.m⁻³) násobku převodových koeficientů, pro vybraná paliva viz tab. 4.2.

Absolutní hmotnostní koncentrace

Absolutní hmotnostní koncentrace udávají, kolik miligramů dané látky obsahuje krychlový metr plynu za normálních podmínek (0 °C; 101,332 kPa). Pro převod hodnot v ppm využívá analyzátor pro přepočítání na hmotnostní koncentraci (mg.m⁻³) převodových koeficientů uvedených v tab. 4.2. Výpočet znázorněn pro CO ve vztahu (4.3)

$$CO = A_{CO} \times CO \quad (4.3)$$

Kde: A_i jsou hodnoty pro CO dle tabulky 4.2 (mg.m⁻³.ppm⁻¹),
 CO naměřené hodnoty (ppm).

Absolutní koncentrace přepočítaná na obsah kyslíku

Na základě typu spalovacího zařízení je dle legislativy požadován přepočet emisních koncentrací ke vztažnému obsahu kyslíku za normálních podmínek. Pro jednotlivé znečišťující látky se vychází ze vztahu (4.4).

$$CO_r = CO \cdot \left(\frac{20,95 - O_{2v}}{20,95 - O_{2m}} \right), (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (4.4)$$

Kde je: CO koncentrace CO za normálních podmínek ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 O_{2v} vztažný obsah kyslíku 10 % kotle a 13 % kamna tuhá paliva (%),
 O_{2m} skutečně měřený obsah kyslíku (%),
 20,95 obsah kyslíku ve vzduchu (% hm.).

4.1.1.2 Charakteristiky spalování vypočtené analyzátozem

Výpočet přebytku spalovacího vzduchu

Tento poměr, vypočtený dle vztahu (4.5), zobrazuje kolikrát větší množství spalovacího vzduchu je přiváděno do spalovacího procesu ve srovnání s optimálním (stechiometrickým) množstvím.

$$\lambda = \frac{CO_{2\max}}{CO_{2m}}, (-) \quad (4.5)$$

Kde je: $CO_{2\max}$ je maximální obsah oxidu uhličitého, z katalogu paliv (% hm.),
 CO_{2m} Naměřená, resp. dopočtená hodnota (% hm.).

Výpočet komínové ztráty a účinnosti spalovacího zařízení

Plynové analyzátory vycházejí z teoretického předpokladu, že účinnost je tvořena především komínovou ztrátou. Tedy tepelná ztráta způsobená fyzickým teplem z odváděných spalin do ovzduší. Komínová ztráta je počítána dle vztahu (4.6).

$$q_a = (t_s - t_o) \cdot \left(\frac{A_2}{20,95 - O_{2m}} + B \right), (\%) \quad (4.6)$$

Účinnost je pak stanovena jako rozdíl:

$$\eta = 100 - q_A, (\%) \quad (4.7)$$

Analýzátor Madur GA60, dopočítává ještě ztrátu chemickým nedopalem podle vztahu:

$$q_{CO} = \frac{\alpha \cdot CO}{CO + CO_2}, (\%) \quad (4.8)$$

Výsledná účinnost je potom:

$$\eta_{kor} = 100 - q_a - q_b, (\%) \quad (4.9)$$

Kde je:

t_s	naměřená teplota spalin (°C),
t_o	naměřená teplota okolí (°C),
A_2	konstanta závislá na palivu, tab. 4.2,
B	konstanta závislá na palivu, tab. 4.2,
O_{2m}	přímo měřený obsah kyslíku ve spalinách (% hm.),
20,95	obsah kyslíku ve vzduchu (% hm.),
α	koeficient pro tuhá paliva 69 (-).

4.1.2 Stechiometrie spalovacích procesů

Pokud jsou palivové vlastnosti vzorku odlišné od paliv uvedených v seznamu, je nutné provést přepočítání naměřených hodnot. Pro přepočítání je využita metodika stochiometrie spalování tuhých paliv, která vychází z Malaťák, Jevič, Vaculík (2010.), Obroučka (2001).

Výpočet spotřeby vzduchu a množství spalin

Podle podmínek, které se vytvoří pro spalovací proces, rozeznáváme dokonalé a nedokonalé spalování. Dokonalého spalování s teoretickým přebytkem vzduchu, které se dá vypočítat ze stochiometrických vztahů spalovacích rovnic, lze dosáhnout jen při zcela dokonalém promísení paliva se vzduchem a při ideálních spalovacích podmínkách. V praktickém provozu je pro zajištění dokonalého spalování spotřeba vzduchu větší než teoretická a závisí na druhu paliva, typu spalovacího zařízení, atd. Poměr mezi skutečnou a teoretickou spotřebou vzduchu se nazývá součinitel přebytku vzduchu a je vyjádřen dle vztahu 4.10. Dokonalé spalování pak probíhá při $n > 1$ a nedokonalé spalování při $n < 1$.

$$n = \frac{L_{skut}}{L_{min}} = \frac{O_{skut}}{O_{min}} \doteq \frac{20,95}{20,95 - O_2} \doteq \frac{CO_{2max}}{CO_2}, (-) \quad (4.10)$$

Tab. 4.3: Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu

Plyn	Objemové složení (%)	Hmotnostní složení (%)
O ₂	21,000	23,200
N ₂	78,050	75,474
Ar	0,920	1,280
CO ₂	0,030	0,046

Tab. 4.4: Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině

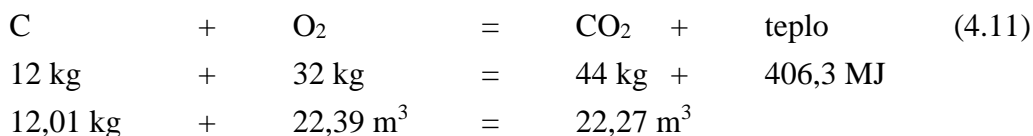
Prvek	Kilomol	
	Objemové složení (m ³)	Hmotnostní složení (kg)
H	22,390	2,016
C	22,390	12,010
O	22,390	32,000
S	22,390	32,060
N	22,390	28,020

Objemové a hmotností složení suchého vzduchu bez vodní páry, při zanedbání vzácných plynů, vychází z hodnot uvedených v tab. 4.3. Při přesných výpočtech objemových množství produktů spalování a potřebného objemu spalovacího vzduchu se při spalování vychází z molekulové hmotnosti jednotlivých prvků hořlaviny, viz tab. 4.4.

Spalování tuhých paliv:

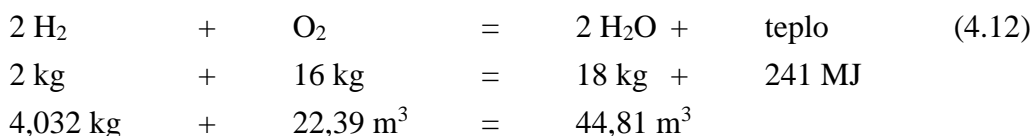
Použitím molekulových hmotností jednotlivých prvků lze vyjádřit vztahy pro oxidační reakce při spalování následujícími stechiometrickými rovnicemi.

Spalování uhlíku na oxid uhličitý:



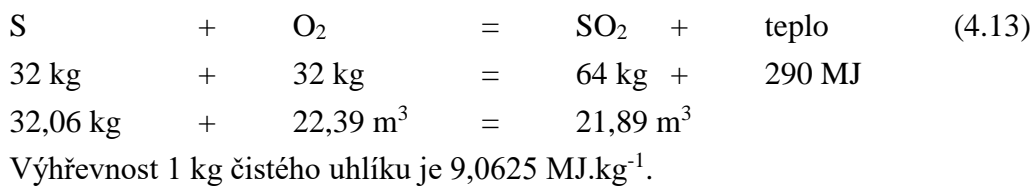
Výhřevnost 1 kg čistého uhlíku je 33,85 MJ.kg⁻¹.

Spalování vodíku na vodní páru:



Výhřevnost 1 kg čistého uhlíku je 120,5 MJ.kg⁻¹.

Spalování síry na oxid siřičitý:



Převod ostatních prvků a vlhkosti (vody) do plynné fáze platí:

Pro dusík:



Pro kyslík:



Pro vlhkost:



Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin v rovnicích jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tj. při teplotě $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $P = 101,325 \text{ kPa}$.

Objemové spalování (hodnoty reálných molárních objemů plynů)

Ke spalování se uvažuje jako okysličovadlo suchý vzduch o zjednodušeném složení, které vychází z tab. 4.3. Z tohoto složení lze vypočítat poměr kyslíku, dusíku a vzduchu jako:

$$\text{O}_2 : \text{N}_2 : \text{vzduch} = \frac{21}{21} : \frac{78,05}{21} : \frac{100}{21} = 1 : 3,716 : 4,76 \quad (4.17)$$

Součinitel, který vyjadřuje objemové množství vodní páry obsažené ve vzduchu, má při dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu velikost:

$$\nu = 1 + \varphi \frac{p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s} \cong 1,012 \quad (4.18)$$

Kde je: p_s tlak syté vodní páry (kPa), pro výpočet 2,34 kPa,
 p_c celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu (kPa), pro výpočet 101,2 kPa,
 φ relativní vlhkost (-), pro výpočet 0,5.

K následujícím výpočtům byly použity rovnice 4.11 až 4.17.

Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spálení:

$$O_{\min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C + \frac{22,39}{4,032} \cdot H + \frac{22,39}{32,06} \cdot S + \frac{22,39}{32} \cdot O, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.19)$$

Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spálení:

$$L_{\min} = O_{\min} \cdot \frac{100}{21}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.20)$$

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spálení:

$$L_{skut} = O_{\min} \cdot \frac{100}{21} \cdot n, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.21)$$

Teoretické objemové množství suchých spalin:

$$v_{sp\min}^s = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + \frac{21,89}{32,06} \cdot S + \frac{22,40}{28,013} \cdot N + 0,7805 \cdot L_{\min}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.22)$$

Kde: C, H, O, S, N, W jsou poměrné množství uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu (kg.kg^{-1}), n je součinitel přebytku vzduchu vypočtený dle vztahu 4.10.

Objemové množství suchých spalin:

$$v_{sp}^v = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{Ar}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.23)$$

Objemové množství vlhkých spalin:

$$v_{sp}^v = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{H_2O} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{Ar}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.24)$$

Kde: $v_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + 0,0003 \cdot L_{skut}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.25)$

$$v_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.26)$$

$$v_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H + \frac{22,41}{18,015} \cdot W + 0,04 \cdot L_{skut}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (4.27)$$

$$v_{N_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot N + O_{\min} \cdot \frac{78,05}{21} \cdot n, \text{ (m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)} \quad (4.28)$$

$$m_{O_2} = O_{\min} \cdot (n-1), \text{ (m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)} \quad (4.29)$$

$$m_{Ar} = 0,0092 \cdot L_{skut}, \text{ (m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)} \quad (4.30)$$

Vyjádření jednotlivých složek spalín v %:

Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách:

$$CO_{2\max} = \frac{\frac{22,27}{12,01} \cdot C}{v_{sp\min}^s} \cdot 100, \text{ (%) } \quad (4.31)$$

Hmotnostní koncentrace složek spalín ve vlhkých spalínách:

$$CO_2 = \frac{v_{CO_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \text{ (%) } \quad (4.32)$$

$$H_2O = \frac{v_{H_2O}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \text{ (%) } \quad (4.33)$$

$$SO_2 = \frac{v_{SO_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \text{ (%) } \quad (4.34)$$

$$N_2 = \frac{v_{N_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \text{ (%) } \quad (4.35)$$

$$O_2 = \frac{v_{O_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \text{ (%) } \quad (4.36)$$

Stanovení přebytku spalovacího vzduchu v závislosti na CO₂:

$$n = 1 + \frac{CO_{2,\max}}{CO_2} \cdot \frac{v_{sp,\min}^s}{L_{\min}}, \text{ (-)} \quad (4.37)$$

Kde je: CO₂ hodnota zjištěná analyzátozem (%).

4.1.3 Metodika přepočtu koncentrace znečišťujících látek

Pro vlastní zhodnocení výsledků měření je nevyhnutelné provést přepočet koncentrace znečišťujících látek dle ČSN 44 1310.

Veškeré naměřené hodnoty emisních koncentrací jsou udávány v ppm a v %. Koncentrace v ppm jsou přepočteny na hmotnostní koncentrace v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro přepočty podílového složení v ppm na hmotnostní koncentraci v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ platí vztah:

$$1\text{ppm} = \frac{M}{m} = \frac{M}{22,414} = 0,0446M \text{ (mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} \quad (4.38)$$

kde: M molekulová hmotnost škodliviny ($\text{mg}\cdot\text{mol}^{-1}$),
 m molární objem škodliviny ($22,414 \text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$).

V praxi pro přepočty používáme hodnoty *reálných molárních objemů plynů*, které odpovídají hodnotám v tab. 5 a to:

$$1\text{ppmNO}_2 = \frac{46,01}{22,41} = 2,05 \text{ , (mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} \quad (4.39)$$

$$1\text{ppmCO} = \frac{28,01}{22,40} = 1,25 \text{ , (mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} \quad (4.40)$$

$$1\text{ppmNO} = \frac{30,01}{22,41} = 1,34 \text{ , (mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} \quad (4.41)$$

Pro přepočty naměřených množství škodlivin ve vlhkých spalinách (vzdušině) při teplotě t a tlaku p na normální podmínky ($0 \text{ }^\circ\text{C}$; $101,325 \text{ kPa}$) a pro přepočet na referenční obsah kyslíku ve spalinách používáme následujících vztahů:

Výpočet emisního faktoru pro normální stav vlhkých spalin:

$$E_v = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101325}{101325+p} \cdot E_n \quad (4.42)$$

Výpočet emisního faktoru pro normální stav suchých spalin:

$$E_s = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101325}{101325+p} \cdot \frac{100}{100-w} \cdot E_n \quad (4.43)$$

kde: E_n je naměřený obsah škodlivin v 1 m^3 spalin za provozních podmínek ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$),

- E_v obsah škodliviny v 1 m³ vlhkých spalin za normálních podmínek (mg.m_N⁻³),
 E_s obsah škodliviny v 1 m³ suchých spalin za normálních podmínek (mg.m_N⁻³),
 t provozní teplota spalin (°C),
 p tlakový rozdíl provozního tlaku k normálnímu tlaku (Pa),
 w obsah vodní páry ve spalinách (% obj.),
 O_p obsah kyslíku ve spalinách odpovídající provozním podmínkám (změřený) (% obj.),
 O_r referenční obsah kyslíku ve spalinách (% obj.).

Pro přepočítání naměřených hodnot pro vzorky briket z kompostu a kalu na základě měření jsou tyto koeficienty následující, viz tab. 4.5. K přepočtu je využit vztah 4.3 a 4.4.

Tab. 4.5: Emisní faktory pro suché spaliny vzorků briket z kompostu a kalu

Veličina	Jednotka	konst.	Brikety kompost	Kal
teplota spalin*	°C	-	28,00	30,00
obsah vodní páry**	%	-	3,01	3,50
Emisní faktor E_s	-	-	1,14	1,15
CO	mg.m ^{-3*}	1,25	1,42	1,44
NO	mg.m ^{-3*}	1,34	1,52	1,54
NO ₂	mg.m ^{-3*}	2,05	2,33	2,36

* Průměrná teplota okolí při měření.

** 20 % hodnoty vypočtené ze stechiometrie pro dané palivo (zbytek je odloučen).

4.1.4 Metodika výpočtu výkonu a účinnosti spalovacího zařízení

Pokud není použit výpočet pomocí analyzátoru, vychází metodika výpočtu výkonu z normy ČSN EN 13 240, dle vztahu 4.43.

$$P = \frac{\eta \cdot B \cdot Q_i}{100 \cdot 3600}, \text{ (kW)} \quad (4.43)$$

Kde je výpočet účinnosti spalovacího zařízení:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r), \text{ (%) } \quad (4.44)$$

Kde je výpočet poměrné ztráty citelným teplem spalin:

$$q_a = 100 \cdot \frac{Q_a}{Q_i}, (\%) \quad (4.45)$$

$$Q_a = (t_s - t_o) \cdot \left[\frac{c_{pmd} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \left[\frac{c_{pmH_2O} \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \right] \quad (4.46)$$

Výpočet střední měrné tepelné kapacity vodní páry:

$$C_{pmH_2O} = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right)^2 \right] \quad (4.47)$$

Výpočet střední měrné tepelné kapacity suchých spalin při srovnávacích podmínkách:

$$C_{pmd} = 3,6 \cdot \left[0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right)^2 + a_1 + a_2 \right] \quad (4.48)$$

$$a_1 = \left[0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right)$$

$$a_2 = \left[0,03 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_s}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right)$$

Kde je výpočet poměrné ztráty plynným nedopalem:

$$q_b = 100 \cdot \frac{Q_b}{Q_i}, (\%) \quad (4.49)$$

$$Q_b = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{[0,536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100]}, (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (4.50)$$

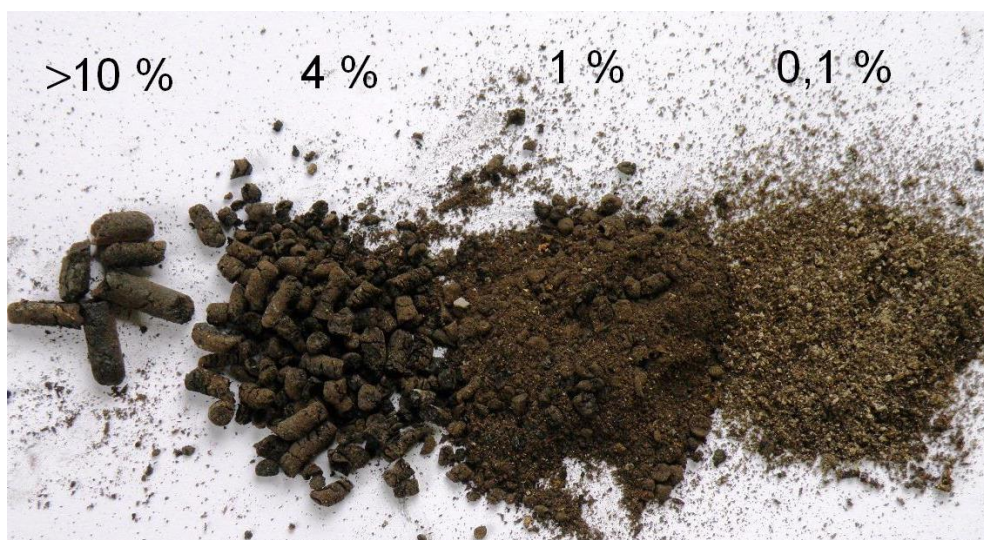
Kde je ztráta mechanickým nedopalem:

$$q_r \cong 0, (\%) \quad (4.51)$$

Jelikož výpočet zahrnuje rozbor pevných zbytků paliva propadlých roštem, je tato ztráta v rámci disertační práce uvažována jako nulová, tudíž i redukovaný hmotností podíl uhlíku $C_r = 0$. Tato ztráta je při dokonalém spálení paliva se téměř blíží nule, viz obr. 4.2 (Lyčka, 2011).

kde:

B	hmotnostní tok zkušebního paliva ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$),
Q_i	výhřevnost zkušebního paliva ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),
Q_a	ztráta citelným teplem ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),
$C_{\text{pmH}_2\text{O}}$	střední měrné tepelné kapacity vodní páry ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$),
C_{pmd}	střední měrné tepelné kapacity suchých spalin ($\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$),
t_s	teplota spalin ($^{\circ}\text{C}$),
t_o	teplota okolí ($^{\circ}\text{C}$),
CO	objemová koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách (%),
CO ₂	objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách (%),
C	hmotnostní podíl uhlíku ve zkušebním vzorku (%),
C_r	redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v pevných zbytcích spalování (%), v rámci disertační práce uvažován $C_r = 0$.



Obr. 4.2: Odhad ztráty mechanickým nedopalem

Zdroj: Lyčka (2011)

4.2 Metody, postupy a zařízení použité pro analýzu vzorků

Při přípravě vzorků a zjišťování jejich palivových charakteristik bylo použito následujících metod, postupů a zařízení.

Stanovení obsahu vody v palivu, spalného tepla a výhřevnosti paliva

Obsah vody v palivu byl stanoven pomocí gravimetrické metody dle normy ČSN EN ISO 18 134-3. Pro stanovení byl využit přenosný analyzátor vlhkosti MB 25, firma Ohaus (viz obr. 4.3) a pro vzorky briket z kompostu, HTC kalu analyzátor TGA 701 výrobce Leco (viz obr. 4.3), který je ve výbavě katedry (Laboratoř analýzy organických materiálů). Sušením paliva za zvýšené teploty při teplotě 105 °C se z paliva uvolňuje hygroskopická voda a toto množství vody se nazývá zbylá voda, nebo těž analytická voda.

Pro přepočítání výhřevnosti zkoumaného vzorku paliva je využito vztahu 4.51, který vychází z ČSN EN 14 918, výpočet při konstantním tlaku.

$$Q_i = (Q_s - 212,2 \cdot w(H)_d - 0,8 \cdot (w(O)_d + w(N)_d)) \cdot (1 - 0,01M) - 24,43M \quad (4.51)$$

Kde: Q_i je výhřevnost paliva ($J \cdot g^{-1}$, $kJ \cdot kg^{-1}$),
 Q_s je spalné teplo paliva ($J \cdot g^{-1}$, $kJ \cdot kg^{-1}$),
 $w(H)_d$ obsah vodíku v sušině paliva (hmotnostní %),
 $w(O)_d$ obsah kyslíku v sušině paliva (hmotnostní %),
 $w(N)_d$ obsah dusíku v sušině paliva (hmotnostní %),
 M obsah vody, pro který se požaduje výpočet (hmotnostní %).



Obr. 4.3: Analyzátor vlhkosti Ohaus MB 25, analyzátor Leco TGA701

Prvkový a technický rozbor paliva

Technický rozbor vzorků briket z kompostu, HTC kalu byl proveden pomocí TGA 701. Metodika technického rozboru vzorku paliva vychází z technických norem pro určení vody v palivu, prchavé a neprchavé hořlaviny a obsahu popela. Podstata metody spočívá v postupném zahřívání analyzovaného vzorku ve 3 krocích. Vzorek je zahříván při teplotě 105 °C, dokud není jeho hmotnost konstantní, úbytek hmotnosti představuje hodnotu vlhkosti v palivu. Dále je teplota vzorku zvýšena na 900 °C po dobu 7 minut, úbytek hmotnosti představuje hodnotu prchavé hořlaviny. Dále je vzorek ochlazen na 550 °C a při této teplotě udržován do konstantní teploty. Tento zbytek představuje hodnotu podílu popela. Na základě vztahu 1 a 2, představuje výsledek rozdílu naměřených hodnot hodnotu pevné hořlaviny.

Obsah prchavé hořlaviny pro biopaliva se určí dle ČSN EN ISO 18 123. Laboratorní stanovení obsahu popela v palivu vychází z normy dle ČSN EN ISO 18 134-3.

Vztah pro přepočítání hmotnostní koncentrace zkoumaného prvku v závislosti na rozdílném obsahu vody ve vzorku paliva byl použit následující vztah dle ČSN 44 1310:

$$n_w = \left(\frac{100 - W_w}{100 - W_s} \right) \cdot n_s, (\%) \quad (4.52)$$

Kde: n_s hmotnostní podíl prvku při suchém nebo výchozím obsahu vody (%),
 W_s hmotnostní podíl vody při suchém nebo výchozím obsahu vody (%),
 W_w hmotnostní podíl vody při novém obsahu vody (%).

Vážení hmotností vzorků

Kromě laboratorní váhy Ohaus MB 25, bylo použito na navažování vzorků paliv pro spalování v rozsahu hmotností od 100 do 1 500 gramů stolních vah. Nejčastěji v laboratoři katedry obchodní váha Transporta, s váživostí 1 000g, dílkem 5 g. Pro měření v provozu byla použita přenosná stolní váha Philips typu HR 2 393 s váživostí 5 000 g, dílkem 1 g.

4.3 Použité vzorky paliv, jejich příprava a palivové charakteristiky

V rámci řešení dizertační práce byly spáleny vzorky kusových a tvarově upravených paliv (brikety, pelety). Pro každou skupinu je v následujících kapitolách uvedena i jejich palivová charakteristika, která bude potom použita pro přepočítání naměřených hodnot.

4.3.1 Komerční brikety z biomasy

Na trhu v ČR je široká nabídka komerčních briket vyráběných z odpadní biomasy. V rámci porovnání tepelně-emisních charakteristik při spalovacím procesu na roštovém topeništi byly posuzovány 4 vzorky briket a vzorek hnědého uhlí ve formě briket, které jsou dostupné na trhu v 10 kg balení, obr. 4.4.



Obr. 4.4: Vzorky komerčních briket, brikety z kůry

Tab. 4.6: Palivová charakteristika spalovaných vzorků komerčních briket

č. vzorku	složení vzorku	certifikace	výhřevnost	obsah popele deklarovaný	obsah vody deklarovaný	obsah vody naměřený
			MJ.kg ⁻¹	%	%	%
1	odpadní dřevní piliny	-	19,0	0,5	8,0	8,2
2	odpadní fytomasa	ÖNORM M 7 135	17,2	0,6	7,4	8,4
3	vyprané katrové odpady z tvrdého dřeva (dub, buk)	-	18,8	1,0	9,2	7,0
4	vypraná stromová kůra bez příměsí	ÖNORM M 7 135	18,6	2,7	9,8	15,2
5	hnědé uhlí	-	19,8	3,5	-	18,3

U vzorků nejsou uvedeny názvy záměrně, jejich základní popis je uveden v tab. 4.6 včetně jejich charakteristických hodnot uvedených na obalech příp. certifikátech, dále je v tabulce uveden naměřený obsah vody.

Pro vzorky nebyl realizován jejich prvkový ani technický rozbor, pro vyhodnocení přebytku spalovacího vzduchu a výpočet účinnosti, resp. komínové ztráty jsou využity hodnoty z analyzátoru pro dřevo a uhlí z tab. 4.2.

4.3.2 Brikety z kompostu

Nevyužitý odpad z kompostáren představuje zajímavý zdroj materiálu pro výrobu tuhých paliv. Jde zejména o zbytky z nadsítného nerozloženého odpadu, který je tvořen dřevními a bylinnými zbytky. V rámci disertační práce byl tento odpad využit pro výrobu briket.

Materiál pro výrobu briket poskytla Ing. Severová z firmy Agromarket, jde o odpadní zbytky z provozovny kompostárny Dolínek. Vzhledem k poměrně vysokému obsahu vody 29,4 %, byl materiál před dalšími úpravami poměrně dlouho dobu sušen za přirozených podmínek. Po té byl v zahradním štěpkovači AL-KO 2500 homogenizován do velikosti vhodné pro briketování. Při briketování byla hodnota obsahu vody okolo 10 %. K briketování byl využit BrikStar EK 20 od firmy Brikdis (viz obr. 4.5), který poskytla v rámci fakulní spolupráce Fakulta tropického zemědělství, katedra udržitelných technologií. I přes optimální vlhkost některé brikety nebyly soudružné, což lze připsat nerovnoměrnému obsahu vody ve vzorku. Lze odhadnout, že takovýchto briket bylo cca 15 % z celé lisovací dávky, zbylé brikety byly v pořádku (viz obr. 4.5).



Obr. 4.5: BrikStar EK 20, brikety z kompostu

Technickým rozbor paliva byl proveden pomocí TGA 701. V tab. 4.8 jsou výsledky z technického rozboru v suchém a vlhkém stavu, prvkový rozbor je dopočten dle vztahu 2.3 – 2.5 v suchém stavu na základě technického rozboru z TGA 701, hodnota N je převzata z tab. 2.3, spalné teplo vypočteno dle vztahu 2.7, výhřevnost dle vztahu 4.51. Pro výpočet stechiometrie spalovacího procesu jsou uvažovány hodnoty pro vlhký vzorek, výsledky jsou uvedeny v příloze A, tabulka 1.

Tab. 4.8: Přepočtený prvkový rozbor vzorku brikety z kompostu

Palivo	Obsah vody	prchavá hořlavina	pevná hořlavina	popel	uhlík	vodík	dusík	kyslík	síra	spalné teplo	výhřevnost
	W	VM	FC	ASH	C	H	N	O	S	Q _s	Q _i
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
S vzorek	0,00	71,43	22,98	5,59	51,30	5,51	1,03	36,84	0,00	19,01	17,81
W vzorek	12,01	62,85	20,22	4,91	45,13	4,84	0,09	32,41	0,00	19,01	15,38

4.3.3 Vzorek čistírenského kalu

Na konferenci Mladých BioPhys Spring 2013 v polském Lublinu, se mi podařilo navázat spolupráci s výzkumným ústavem Leibniz Institutem pro Zemědělskou Techniku (ATB) a domluvit se na zaslání vzorku biokalu (viz obr. 4.6) pro spalovací účely. ATB se zabývá úpravou kalu z čistíren odpadních vod pomocí hydrotermální karbonizace (HTC).

Vzorek biokalu byl zpracován pomocí HTC a pochází ze studie, kdy byly porovnány vybrané parametry vzorků HTC laboratorní hodnoty s pilotními provozy, ve kterých byla tato metoda pro zvýšení výtěžnosti bioplynu z kalu zavedena do provozu čistíren odpadních vod na území Německa. Čistírenské kaly byly zpracovány metodou HTC při teplotě 180 °C, tlaku 1 MPa v laboratoři, 2,5 MPa v provozu, po dobu 150 minut. (Remy et al. 2016; Wirth Herklotz, Lüder, 2015).

K zjišťování obsahu vody ve vzorcích bylo využito metody TGA 701, tudíž jsou dostupné i hodnoty z technického rozboru. Na základě analýzy byl dopočten obsah C, H a O dle vztahu 2.3 – 2.5. Obsah N a S není uvažován, i když v publikacích ATB má zvýšenou hodnotu než běžná biopaliva (2 – 5 %). Spalné teplo je vypočteno dle vztahu 2.7, výhřevnost dle vztahu 4.51. Souhrnné hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.9. Pro výpočet stechiometrie spalovacího procesu jsou uvažovány hodnoty pro vlhký vzorek, výsledky jsou uvedeny v příloze A tabulce 2.

Tab. 4.10: Technický a prvkový rozbor vzorku HTC kalu

Palivo	Obsah vody	prchavá hořlavina	pevná hořlavina	popel	uhlík	vodík	dusík	kyslík	síra	spalné teplo	výhřevnost
	W	VM	FC	ASH	C	H	N	O	S	Q _s	Q _i
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
S HTC	0,00	68,47	4,37	27,16	31,34	4,76	0,00	34,98	0,00	12,61	11,57
W HTC	3,37	66,16	4,22	26,24	30,28	4,59	0,00	33,80	0,00	12,61	11,09



Obr. 4.6: Vzorek HTC kalu

4.3.4 Komerční pelety ENplus A1

Pro spalování v automatických kamnech byly použity dřevní pelety ENplus A1 od výrobce Zdeňka Kuldy v balení 15 kg. Dřevní pelety ENplus A1 jsou vyráběny z pilin vznikajících zpracováním odkorněného dřeva. Pelety byly lisovány v prstencovém granulovacím lisu do válečků o průměru 6 mm. Pelety splňují evropskou normu ENplus A1.

Vzhledem k certifikaci paliva ENplus A1 je prvkový rozbor sestaven z hodnot uvedených z certifikátů, který předložil výrobce. K zjišťování obsahu vody bylo využito metody TGA 701, na základě analýzy byl dopočten obsah C a O dle vztahu 2.3 – 2.5. Spalné teplo bylo převzato z certifikátu, výhřevnost dle vztahu 4.51. Výsledné hodnoty jsou přepočteny na naměřený obsah vody v palivu v druhém řádku tab. 4.10. Při měření je využito převodový konstant viz tab. 4.2.

Tab. 4.10: Technický a prvkový rozbor vzorku pelet ENplus A1

Palivo	Obsah vody	prchavá hořlavina	pevná hořlavina	popel	uhlík	vodík	dušík	kyslík	síra	spalné teplo	výhřevnost
	W	VM	FC	ASH	C	H	N	O	S	HHV	LHV
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
S pel A1	0,00	83,33	16,29	0,38	49,89	6,08	0,08	42,96	0,01	19,62	18,29
W pel A1	7,86	76,78	15,01	0,35	45,96	5,60	0,07	39,58	0,00	19,62	16,66

4.4 Použitá spalovací zařízení

Měření bylo prováděno na spalovacích zařízeních bez teplovodního výměníku. Tedy přesněji na interiérových, krbových a automatických kamnech. Měření bylo realizováno v laboratoři katedry a v provozu.

4.4.1 Interiérová kamna Calor s roštovým topeništěm

Měření tepelně emisních charakteristik v laboratoři katedry pro vzorky komerčních briket bylo provedeno v kamnech na tuhá paliva od společnosti V.J.Rousek, interiérová kamna Calor. Předepsané palivo pro kamna je dřevo, uhlí a uhelné brikety. Kamna jsou vybavena roštem a šamotovým odhořivacím prostorem. Přikládání paliva je realizováno ručně. Přikládací dvířka jsou prosklená, tudíž je možné vizuálně pozorovat spalovací proces. Technické parametry kamen jsou uvedeny v tab. 4.11. Kamna byla pořízena pro spalování briket z grantu IGA 2013.

Tab. 4.11: Technické parametry kamen Calor

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon[kW]	5
Účinnost [%]	70 – 80
Max. délka polen [m]	0,3
Průměr kouřovodu [mm]	80
Účinnost při jmenovitém výkonu [%]	88
Spotřeba paliva [kg.h ⁻¹]	0,8 – 1,5

Zdroj: V.J.Rousek, Kamna Calor - Návod k obsluze

4.4.2 Interiérová krbová kamna Romotop

Měření tepelně emisních charakteristik pro vzorky briket z kompostu a HTC kalu bylo realizováno v provozu v krbových kamnech Riano 02 od české firmy Romotop, viz obr. 4.7. Krbová kamna jsou instalována v obývacím pokoji rodinného domu a slouží k příležitostnému vytápění od roku 2014. Jde o verzi s horní keramickou deskou. Krbová kamna mají šamotový spalovací prostor a rošt. Pod roštem je přívod primárního spalovacího vzduchu s popelníkem. Sekundární spalovací vzduch je přiváděn nad dvířky. Spalovací prostor je vybaven deflektorem. Kamna jsou konstruována na spalování kusového dřeva a briket s ručním přikládáním. Technické parametry kamen jsou uvedeny v tab. 4.12. Výrobek je certifikován dle ČSN EN 13 240/A2, tabulky 1 - zařízení pro přerušovaný provoz.

Tab. 4.12: Technické parametry kamen Romotop Riano 02

Parametr	Hodnota
Výkon [kW]	4 - 11
Účinnost při jmenovitém výkonu [%]	80
Max. délka polen [m]	0,3
Průměr kouřovodu [mm]	150
Rozměry kamen: šířka x hloubka x výška [mm]	834 x 434 x 904
Spotřeba paliva [kg.h ⁻¹]	1,7
Předepsaný tah [Pa]	12

Zdroj: www.romotop.cz



Obr. 4.7: Interiérová krbová kamna Romotop Riano 02

4.4.3 Interiérová automatická kamna Matilde

Pro zkoumání spalovacího procesu a jeho optimalizaci bylo realizováno spalování vzorku pelet v automatických kamnech Matilde, italského výrobce Eva Calór. Kamna slouží pro vytápění dílenských prostor. Výrobce uvádí základní popis výrobku jako malý kompaktní spalovací zdroj o výkonu 4 kW, který je určen k vytápění prostor do 100 m³. Předepsaným palivem jsou dřevní nebo rostlinné pelety o průměru 6 mm.

Automatická kamna jsou vybavena miskovým hořákem, do kterého je palivo dopravováno ze zásobníku šnekovým dopravníkem, palivo je dávkováno horem. Kamna jsou dále vybavena topnou patronou pro roztopení, odtahovým ventilátorem, ventilátorem teplého vzduchu, který odvádí teplý vzduch z okolí spalovací komory do interiéru místnosti, teplotním čidlem spalin a interiéru, dále jsou vybavena regulací. Spalovací komora je ocelová

(viz obr. 4.8) a spaliny jsou z ní odváděny odtahovým ventilátorem přes horní průduch směrem dolů. Výkon automatických kamen se dá nastavit pomocí pětistupňového voliče, kterým se mění rychlost otáčení šneku a tím množství dodávaného paliva, dále se zvýší otáčky odtahového ventilátoru a ventilátoru na teplý vzduch do interiéru. V tab. 4.13 jsou uvedeny technické parametry od výrobce. Výrobek splňuje normu EN 14 785 pro kamna na pelety. Při zkoumání změny tepelně-emisních charakteristik byl v průběhu měření instalován teplovzdušný výměník, viz obr. 4.8.

Tab. 4.13: Technické parametry automatických kamen Eva Matilde

Parametr	Hodnota
Výkon [kW]	2,3 – 5,6
Účinnost [%]	86 – 88,5
Hodnoty CO (při 13 % O ₂) [%]	0,010 – 0,023
Spotřeba paliva [kg.h ⁻¹]	0,5 – 1,1
Kapacita zásobníku paliva [kg]	4,7
Velikost vytápěného prostoru [m ³]	40 - 100
Průměr kouřovodu [mm]	80
Frekvence a napětí [Hz]/ [V]	50/230
El. příkon [W]	320

Zdroj: www.evacalor.com



Obr. 4.8: Spalovací prostor a pohled na kamna Matilde, teplovzdušný výměník

4.5 Metodika testování výsledků

K vyhodnocení naměřených a přepočtených hodnot jsou využity, kromě aritmetického průměru, rozptylu a směrodatné odchylky následující statistické metody.

Regresní analýza

Regresní analýza je statistická analýza vztahů mezi veličinami, kdy tato analýza umožňuje řešit dva základní úkoly: zajistit formu závislosti a vyjádřit ji matematickou funkcí (tzv. regresní funkcí – regresní úloha); určit stupeň síly, s jakou se daná závislost projevuje uprostřed různých rušících vedlejších faktorů – korelační analýza (Svatošová, 2005; Kába, 2007).

Korelace

Zatímco regresní analýza se zaměřuje na formu vztahu mezi sledovanými veličinami, korelační analýza ukazuje, jak tento vztah je silný. Východiskem pro měření těsnosti závislosti je příslušný regresní model (Nešetřilová, 2005).

Korelační koeficient je metoda na testování nezávislosti, kdy je zřejmé, že čím jsou určité veličiny těsněji vázány, s tím větší pravděpodobností lze očekávat, že změny jedné veličiny budou mít za následek změny veličiny s ní statisticky vázané. Stupeň vázanosti náhodných veličin charakterizuje, jaká je vypovídající schopnost užitého regresního modelu. Čím bude rozptyl empirických hodnot závislé proměnné kolem příslušné regrese menší (a tedy závislost těsnější), tím budou regresní odhady, založené na dané regresní funkci, přesnější (Kába, 2005).

5 Výsledky a diskuze

Tato kapitola je členěna do tří hlavních podkapitol, jejichž obsahem je interpretace naměřených výsledků, jejich analýza a diskuze, která slouží k ověření vyřčených hypotéz.

5.1 Kritéria a metodika hodnocení naměřených výsledků

Výsledky z měření jsou uvedeny v časové posloupnosti, tak jak probíhala jednotlivá měření. Naměřené hodnoty z analyzátoru, jejich přepoččet a grafické vyjádření vztahových závislostí vychází ze stanovených cílů a hypotéz v kapitole 3 a jsou hodnoceny dle následujících tří kritérií.

Technické hodnocení

Hodnocení technických parametrů spalovacího procesu, které obnáší analýzu emisí oxidu uhelnatého a účinnosti spalovacího zařízení. Interpretace naměřených hodnot je stanoveno pro účely disertační práce dle ČSN EN 13 240 za následujících podmínek:

- emisní koncentrace oxidu uhelnatého jsou vyjádřeny objemově v (ppm) a přepočteny na referenční obsah kyslíku 13 % (dle vztahu 13), emise CO jsou vyjádřeny v grafu závislosti na čase a jejich průměrná hodnota porovnána s hodnotami uvedenými v tab. 5.1,
- vypočtená účinnost zařízení dle vztahu 4.43, průměrná hodnota je porovnána s hodnotami uvedenými v tab. 5.1,
- pro hodnocení autoamtických kamen dle ČSN EN 14 785, v samostatné kapitole.

Tab. 5.1: Kategorizace pro spalovací spotřebiče s uzavřenými dvířky

Klasifikace zdroje	Mezní hodnoty tříd emisí CO (při 13 % O ₂)	Mezní hodnoty třídy účinnosti
	%	%
Třída 1	≤ 0,3	≥ 70
Třída 2	> 0,3 ≤ 1,0	≥ 60 < 70
Třída 3	-	≥ 50 < 60

Zdroj: ČSN EN 13 240

Ekologické hodnocení

Ekologické hodnocení vychází z požadavku na emisní limity stanovené zákonem o ovzduší 201/2012 Sb., které jsou uvedeny v jednotkách $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vztaženy na suchý plyn a referenční obsahu kyslíku 13 %, proto je nutné provést přepočty naměřených emisních koncentrací CO, z jednotek objemových na hmotnostní a v suchých spalínách. Ekologické vyhodnocení naměřených a přepočtených dat je potom provedeno následujícím způsobem:

- emisní koncentrace CO budou porovnány s hodnotami v tab. 5.2 dle typu dodávky paliva a typu paliva.

Tab. 5.2: Požadavky na spalovací stacionární zdroj na pevná paliva

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon kW	Mezní hodnoty emisí		
			CO	TOC	prach
			$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}^*$		
ruční	biologické	0 - 65	5 000	150	150
	fosilní	0 - 65	5 000	150	125
samočinná	biologické	0 - 65	3 000	100	150

**Vztahuje se k suchým spalínám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 kPa; pro sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti, se hodnoty vztahují k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %*

Zdroj: Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb.

Závislost emisních koncentrací CO ve spalínách na přebytku vzduchu

Vstupní hodnoty pro posouzení závislosti emisních koncentrací na provozních parametrech spalovacího zařízení vycházejí z přepočtených hodnot pro ekologické hodnocení. Vyhodnocení dat je provedeno následujícím způsobem:

- hodnoty emisních koncentrací CO jsou sledovány v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu,

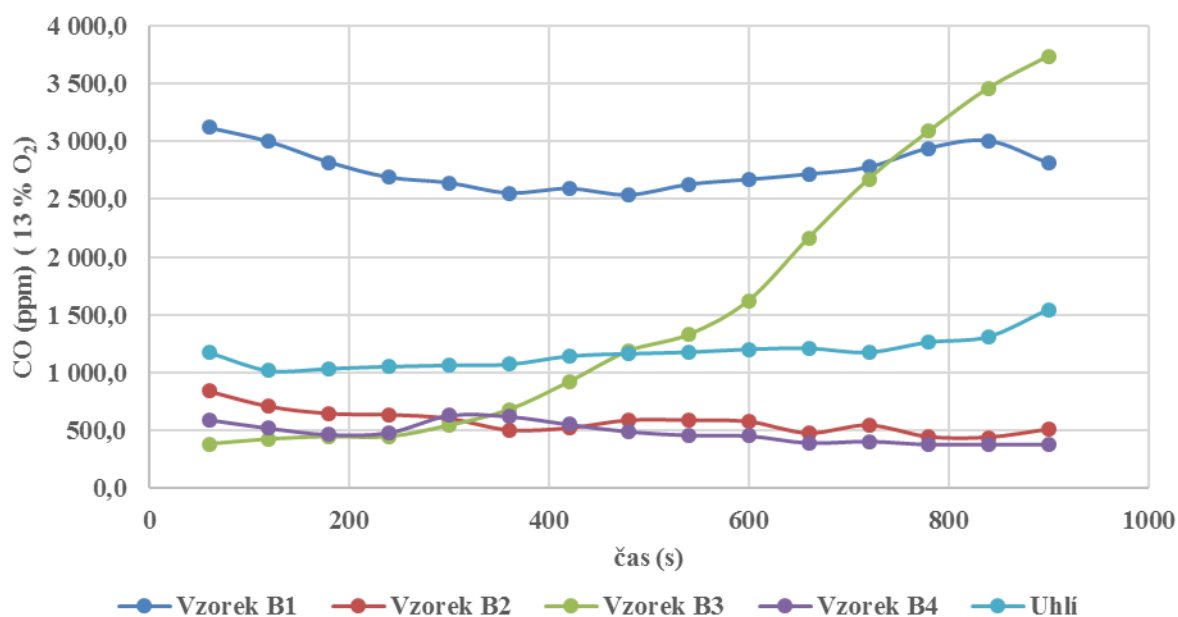
Hodnocením závislosti vztahu emisních koncentrací CO ve spalínách na součiniteli spalovacího vzduchu se s poměrně těsnou polynomickou korelací zabývá mnoho autorů (Malat'ák, Kučera, Hájek, Velebil, Skanderová, atd.), proto je pro sledování závislostí využit obdobný přístup.

5.2 Výsledky měření a jejich analýza

5.2.1 Spalování komerčních briket

Při spalování vzorků komerčních briket bylo hlavním cílem sledovat jejich rozdílné tepelně-emisní charakteristiky, k porovnání s charakteristikami vznikajícími při spalování fosilních paliv byl přidán mezi vzorky z biopaliv také vzorek hnědo uhlých briket.

K měření byl použit plynový analyzátor Madur GA60, ukládání záznamu do paměti po 60-ti sekundách. Jako spalovací zdroj byla použita kamna Calor s tuhým roštem. Přívod primárního vzduchu byl naplno otevřen. K převodu hodnot objemových na hmotnostní se vychází z tab. 4.2, pro paliva dřevo a uhlí. Pro přepočítání na suché spaliny je využito vztahu 4.3 dle převodových konstant z tab. 4.2. Naměřené hodnoty a jejich převod je uveden v příloze B, tabulka 1 – 6. Na obr. 5.1 jsou znázorněny naměřené a přepočtené hodnoty emisních koncentrací CO na referenční obsah kyslíku 13 % v objemovém množství v závislosti na čase.



Obr. 5.1: Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, komerční brikety

Spalování komerčních briket, vliv přebytku vzduchu na emise CO

Na obr. 5.2 je znázorněna závislost koncentrace CO ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu pro jednotlivé vzorky. U vzorků B1, B2 a B4 nelze sledovat závislost. Hoření vzorku 1 probíhalo v rozmezí $n = 5,2 - 6,0$, vzorku B2 v rozmezí $n = 2,3 - 4,0$, vzorku B4 v rozmezí $n = 2,3 - 5,3$.

U vzorků 3 a 5 lze sledovat rostoucí závislost emisních koncentrací CO s přibývajícím součinitelem přebytku spalovacího vzduchu. Na základě regresní analýzy je závislost popsána dle vztahu 5.1 a 5.2, s těsnou korelací.

Pro vzorek B3 (brikety z katrových odpadů):

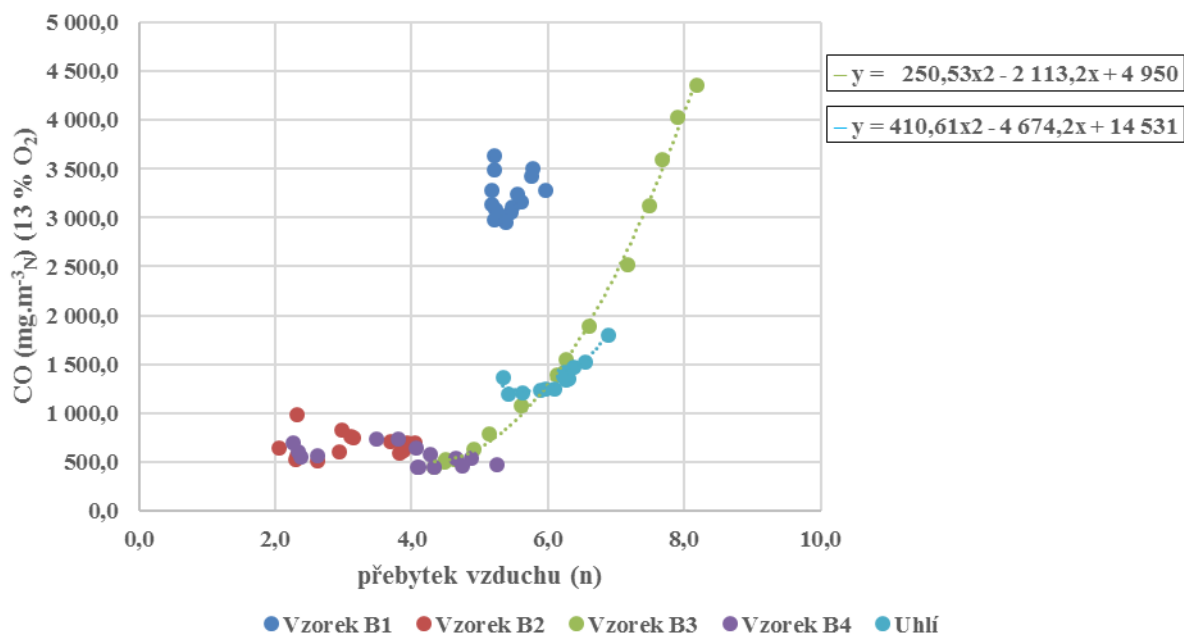
$$CO = 250,53 \cdot n^2 - 2113,2 \cdot n + 4950, \text{ (mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad (5.1)$$

S hladinou spolehlivosti $R^2 = 0,99$, kdy hodnoty n se pohybují v rozmezí $n = 4,3 - 8,2$.

Pro vzorek B5 (hnědo úhelné brikety):

$$CO = 410,61 \cdot n^2 - 4674,2 \cdot n + 14531, \text{ (mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad (5.2)$$

S hladinou spolehlivosti $R^2 = 0,92$, kdy hodnoty n se pohybují v rozmezí $n = 5,3 - 6,9$.



Obr. 5.2: Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, komerční brikety

Vyhodnocení spalování komerčních briket

Vzhledem k tomu, že vzorek B3 v posuzovaném intervalu dohořival, budou z naměřených hodnot uvažovány maximální hodnoty do $n \leq 7$, nedojde tak ke zkreslení při vyhodnocování výsledků. Výsledné přepočtené a naměřené hodnoty z přílohy B jsou potom uvedeny v následující tab. 5.3.

Tab. 5.3: Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování komerčních briket

		T_s	T_o	O₂	CO	NO_x	CO₂	λ	CO	q_A	q_B	η	n	CO	NO_x
		°C	°C	%	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
Vzorek B1	\bar{x}	303,1	28,5	17,1	1 341,9	195,7	3,5	5,4	2 767,0	49,0	2,6	48,4	5,4	3 226,3	773,5
	X _{max}	317,0	29,0	17,4	1 574,0	200,0	3,7	6,0	3 120,5	52,0	2,9	49,3	6,0	3 638,5	824,3
	X _{min}	277,0	28,0	16,9	1 241,0	183,0	3,2	5,2	2 536,2	48,0	2,4	45,1	5,2	2 957,2	744,3
	s	10,6	0,5	0,2	95,3	3,8	0,2	0,2	174,2	0,9	0,2	1,0	0,2	203,2	24,9
	s ²	3,3	0,7	0,4	9,8	1,9	0,4	0,5	13,2	1,0	0,4	1,0	0,5	14,3	5,0
Vzorek B2	\bar{x}	328,0	31,1	13,9	508,3	150,1	6,3	3,1	577,1	32,1	0,5	67,4	3,1	672,9	328,3
	X _{max}	418,0	32,0	15,8	960,0	211,0	9,2	4,0	844,2	39,8	0,8	73,0	4,0	984,4	381,7
	X _{min}	263,0	31,0	10,8	347,0	119,0	4,7	2,1	440,8	26,2	0,4	59,7	2,1	514,0	269,5
	s	58,8	0,3	1,6	156,3	32,7	1,5	0,7	102,9	3,1	0,1	3,1	0,7	120,0	27,9
	s ²	7,7	0,6	1,3	12,5	5,7	1,2	0,8	10,1	1,8	0,3	1,8	0,8	11,0	5,3
Vzorek B3	\bar{x}	356,5	34,0	16,9	378,0	145,5	3,7	5,3	797,4	58,0	0,8	41,2	5,3	929,8	556,2
	X _{max}	374,0	34,0	17,8	647,0	149,0	4,4	6,6	1 622,6	66,0	1,5	48,3	6,6	1 892,0	706,0
	X _{min}	327,0	34,0	16,1	232,0	142,0	2,9	4,3	381,9	51,3	0,4	32,5	4,3	445,3	460,2
	s	16,2	0,0	0,6	141,6	2,1	0,5	0,8	420,3	5,3	0,4	5,7	0,8	490,1	81,9
	s ²	4,0	0,0	0,8	11,9	1,4	0,7	0,9	20,5	2,3	0,6	2,4	0,9	22,1	9,1
Vzorek B4	\bar{x}	369,8	35,0	15,0	366,7	448,4	5,4	3,8	481,0	43,0	0,5	56,6	3,8	560,8	1 193,6
	X _{max}	477,0	35,0	17,0	694,0	575,0	8,4	5,3	631,0	47,4	0,6	62,8	5,3	735,7	1 400,3
	X _{min}	297,0	35,0	11,7	204,0	367,0	3,6	2,3	379,6	36,6	0,4	52,2	2,3	442,6	943,3
	s	60,2	0,0	1,8	149,6	74,5	1,6	1,0	84,8	3,8	0,1	3,8	1,0	98,9	141,7
	s ²	7,8	0,0	1,3	12,2	8,6	1,3	1,0	9,2	1,9	0,3	1,9	1,0	9,9	11,9
Hnědé uhlí	\bar{x}	275,9	36,0	17,5	505,4	402,5	3,1	6,1	1 173,8	50,1	1,1	48,8	6,1	1 367,5	1 785,5
	X _{max}	281,0	36,0	17,9	590,0	415,0	3,6	6,9	1 542,9	54,2	1,4	53,8	6,9	1 797,5	1 942,1
	X _{min}	267,0	36,0	17,0	464,0	388,0	2,8	5,3	1 018,9	45,1	1,0	44,4	5,3	1 187,0	1 610,9
	s	3,9	0,0	0,2	35,7	6,7	0,2	0,4	127,8	2,4	0,1	2,5	0,4	148,9	89,2
	s ²	2,0	0,0	0,5	6,0	2,6	0,5	0,6	11,3	1,6	0,3	1,6	0,6	12,2	9,4

Technické hodnocení

Vzorky byly před vložením do spalovací komory naváženy na shodné hmotnosti 0,8 kg, hnědo uhelné brikety na hmotnost 0,5 kg (protože hoří déle). V tab. 5.4 je uveden

výpočet výkonu spalovacího zařízení s použitými palivy. Jmenovitý výkon krbové vložky Calor je 5 kW. I když mají vzorky shodné hmotnosti každý vzorek má jinou rychlost hoření, resp. rozdílnou dobu fáze hoření a fáze žhnutí tuhých zbytků. Vzorek B1 hořel velmi rychle a z vypočteného výkonu zařízení vyplývá, že měl být použit v nižší hmotnosti, protože byl překročen jmenovitý výkon spalovacího zařízení.

Při posouzení dle kritérií tab. 5.1, lze říci, že při spalování všech sledovaných paliv jsou splněny emisní limity CO pro třídu 1. Velmi dobrých emisních výsledků je dosaženo u vzorků B2 a B4. Účinnost spalovacího zařízení je nejvyšší při spalování paliva B2 (odpovídá 2. třídě) a B4 (odpovídá 3. třídě), ostatní vzorky nesplňují ani požadavek na účinnost 50 %.

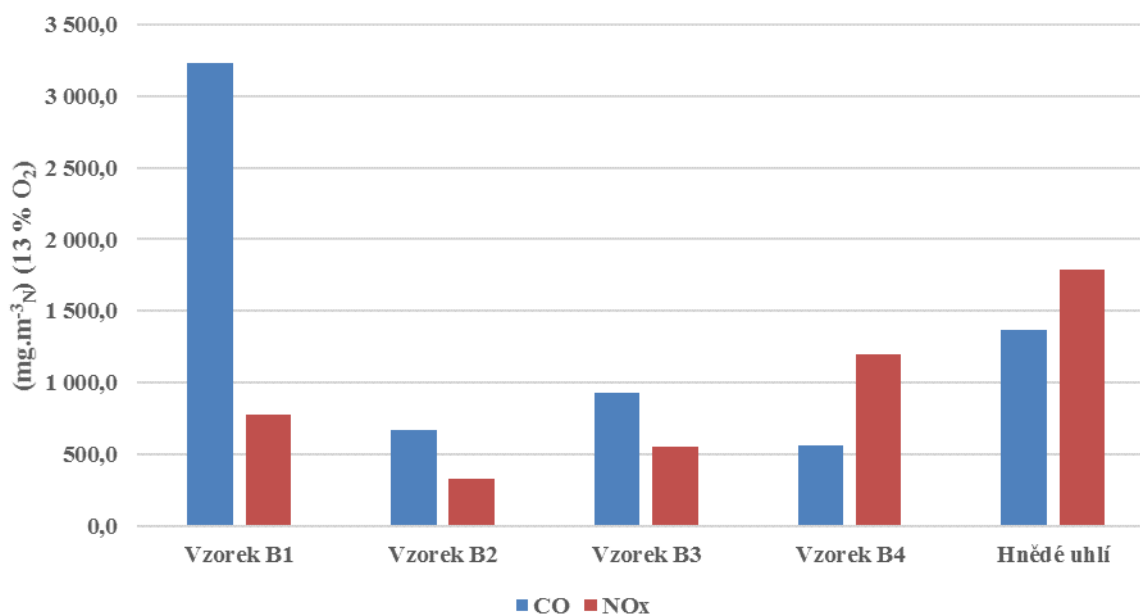
Tab. 5.4: Výkon spalovacího zařízení při spalování komerčních briket

Vzorek	Výhřevnost paliva	Účinnost	Vsázka paliva	Doba hoření	Hmotnostní tok paliva	Vypočtený výkon
	Q_i (kJ.kg ⁻¹)	η (%)	-	-	B (kg.h ⁻¹)	P (kW)
Vzorek B1	19 000,00	48,45	0,80	0,27	3,00	7,67
Vzorek B2	17 200,00	67,39	0,80	0,42	1,92	6,18
Vzorek B3	18 800,00	41,20	0,80	0,63	1,26	2,72
Vzorek B4	18 600,00	56,56	0,80	0,42	1,92	5,61
Hnědé uhlí	19 800,00	48,78	0,50	0,70	0,71	1,92

Spalování komerčních briket, ekologické vyhodnocení

Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x z tab. 5.3 přepočtené dle požadavků pro ekologická kritéria, jsou znázorněny na obrázku 5.3. Podle hodnot CO lze říci, že emisní limity jsou splněny ve všech případech. Emise NO_x nejsou pro tento typ spalovacího zařízení legislativou hodnoceny, ale jsou důležitým parametrem spalovacího zařízení, který ovlivňuje zejména produkci PM a má tak vliv na lidské zdraví.

Nejvyšších naměřených koncentrací CO bylo u vzorku B1 s hodnotou 3 226,3 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 203,2 mg.m⁻³, což bylo způsobeno rychlým hořením vzorku. Nejlepšího výsledku emisních koncentrací CO dosáhl vzorek B4 s hodnotou 560,8 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 98,9 mg.m⁻³, naopak tento vzorek má nejvyšší hodnotu emisních koncentrací NO_x z posuzovaných komerčních biopaliv s hodnotou 1 193,6 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 141,7 mg.m⁻³. Jelikož jsou splněny legislativní požadavky, lze tato paliva doporučit k využití v krbových kamnech. Neoptimálněji hořel vzorek B4, brikety z kůry. I co se týče průběhu hoření. Bylo by však hodné se zaměřit na snížení emisních koncentrací NO_x.

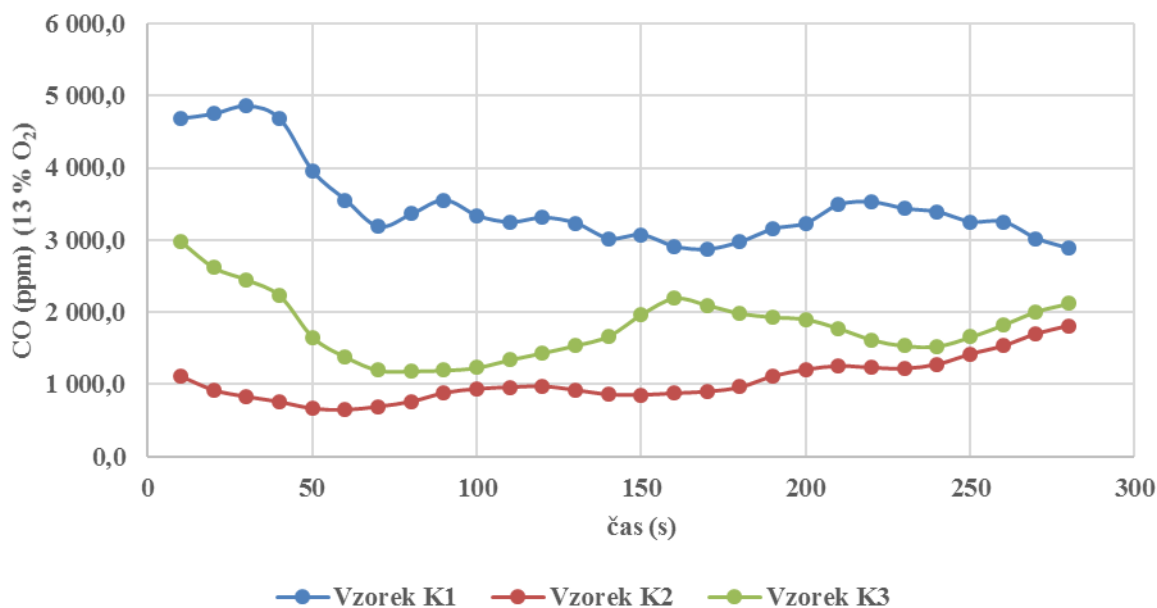


Obr. 5.3: Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x, komerční brikety

5.2.2 Spalování briket z kompostu

Cílem pokusu bylo sledování změn provozních parametrů spalovacího zařízení a emisních koncentrací ve spalinách při použití rozdílné hmotnosti paliva stejného vzorku paliva. Spalovací zkouška těchto briket tak probíhala na tři měření (hmotnosti jsou uvedené v tab. 5.7).

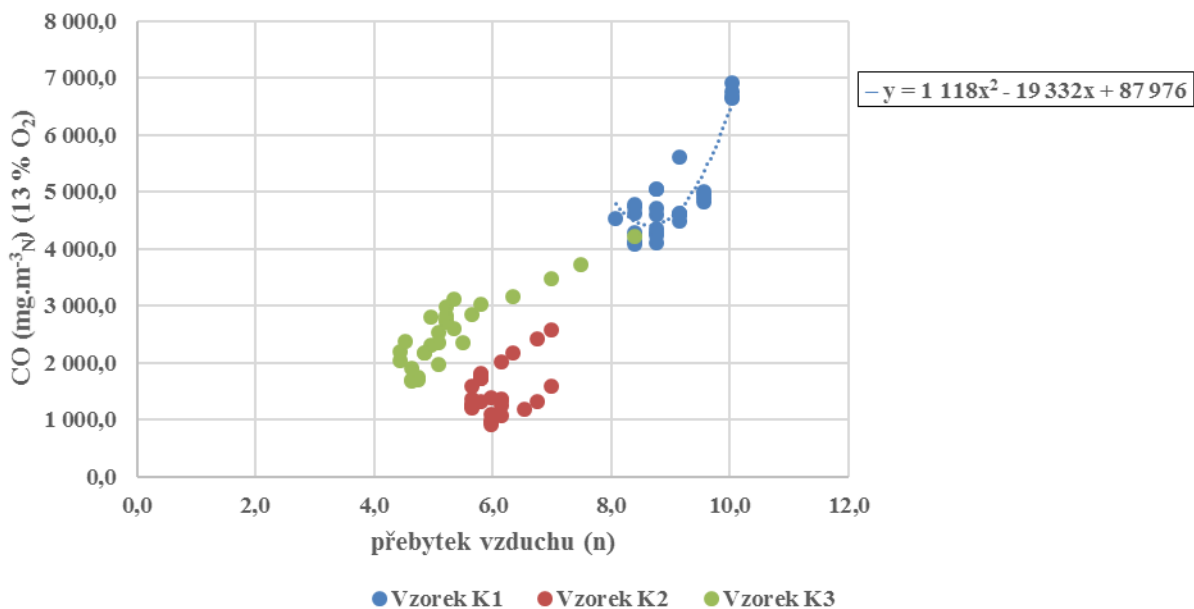
Měření bylo provedeno v krbových kamnech Romotop Riano 02. Přívod primárního a byl naplno otevřen. K měření byl použit plynový analyzátor Casper 301 záznam do paměti po 60 sekundách, který byl kvůli rychlému hoření vzorku doplněn fotologem po 10 sekundách, z kterého byly naměřené hodnoty přepsány do měřicího protokolu. Pro tento vzorek paliva byla zpracována stechiometrická analýza, viz příloha A, tabulka 1. K převodu naměřených hodnot se vychází z tab. 4.5. Naměřené hodnoty a jejich převod je uveden v příloze C, tabulka 1 – 3. Na obr. 5.4 jsou znázorněny naměřené a přepočtené hodnoty emisních koncentrací CO na referenční obsah kyslíku 13 % v objemovém množství v závislosti na čase.



Obr. 5.4: Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, brikety z kompostu

Spalování briket z kompostu, vliv přebytku vzduchu na emise CO

Na obr. 5.5 je znázorněna závislost koncentrace CO ve spalínách na přebytku spalovacího vzduchu pro jednotlivé vzorky.



Obr. 5.5: Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, brikety z kompostu

U vzorků K2 a K3 nelze sledovat závislost. Hoření vzorku K2 probíhalo v rozmezí $n = 5,6 - 7,0$, vzorku K3 v rozmezí $n = 4,4 - 8,4$. U vzorků K1 lze sledovat rostoucí závislost emisních koncentrací CO s přibývajícím součinitelem přebytku spalovacího vzduchu. Na základě regresní analýzy je závislost popsána dle vztahu 5.3, s mírnou korelací.

Pro vzorek K1 (brikety z kompostu 300 g):

$$CO = 1118 \cdot n^2 - 19332 \cdot n + 87976, \text{ (mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad (5.3)$$

S hladinou spolehlivosti $R^2 = 0,82$, kdy hodnoty n se pohybují v rozmezí $n = 8,1 - 10$.

Vyhodnocení spalování briket z kompostu

Výsledné přepočtené a naměřené hodnoty z přílohy C jsou potom uvedeny v následující tab. 5.5.

Tab. 5.5: Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování briket z kompostu

		T_s	T_o	O_2	CO	NO _x	CO ₂	λ	CO	q_A	q_B	η	n	CO	NO _x
		°C	°C	%	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg·m ⁻³	
Vzorek K1	\bar{x}	212,3	27,3	18,7	992,4	48,4	2,2	9,1	3 473,5	58,9	3,0	38,1	9,0	4 932,4	261,8
	x_{max}	223,4	27,4	18,9	1 255,0	58,8	2,5	10,1	4 867,0	64,2	4,1	45,2	10,0	6 911,1	310,0
	x_{min}	190,4	27,2	18,4	852,0	38,9	2,0	8,2	2 871,7	52,1	2,5	32,8	8,1	4 077,9	234,8
	s	10,0	0,1	0,1	113,3	4,5	0,1	0,6	571,7	3,2	0,5	3,2	0,6	811,8	14,7
	s^2	3,2	0,3	0,4	10,6	2,1	0,4	0,8	23,9	1,8	0,7	1,8	0,8	28,5	3,8
Vzorek K2	\bar{x}	265,8	27,8	17,5	446,9	91,0	3,3	6,1	1 047,8	50,4	0,9	48,7	6,1	1 487,8	330,8
	x_{max}	276,2	27,9	18,0	673,0	106,1	3,5	7,0	1 813,7	57,7	1,6	51,4	7,0	2 575,4	392,2
	x_{min}	242,2	27,8	17,3	282,0	72,5	2,9	5,7	649,8	47,8	0,6	40,7	5,6	922,8	292,3
	s	8,9	0,0	0,2	113,0	7,6	0,2	0,4	294,9	2,5	0,3	2,6	0,4	418,8	26,3
	s^2	3,0	0,2	0,5	10,6	2,8	0,5	0,6	17,2	1,6	0,5	1,6	0,6	20,5	5,1
Vzorek K3	\bar{x}	276,6	28,8	17,0	866,1	102,0	3,8	5,4	1 795,2	44,4	1,6	54,0	5,3	2 549,2	317,6
	x_{max}	297,1	28,9	18,5	1 063,0	121,8	4,5	8,5	2 975,6	60,3	2,6	62,6	8,4	4 225,3	355,1
	x_{min}	231,8	28,7	16,3	654,0	57,8	2,4	4,5	1 184,5	36,1	1,0	37,1	4,4	1 681,9	256,2
	s	18,5	0,1	0,5	115,0	18,5	0,5	0,9	439,0	5,5	0,4	5,9	0,9	623,4	25,3
	s^2	4,3	0,3	0,7	10,7	4,3	0,7	1,0	21,0	2,4	0,6	2,4	1,0	25,0	5,0

Technické hodnocení

Jmenovitý výkon krbové vložky Romotop Riano 02 je 4 – 11 kW. V tab. 5.6 je uveden výpočet výkonu spalovacího zařízení při použitých palivech dle vztahu 4.43. Na základě rozboru z předchozího měření (kap. 5.2.1) lze říci, že při spalování 0,51 kg k dosažení

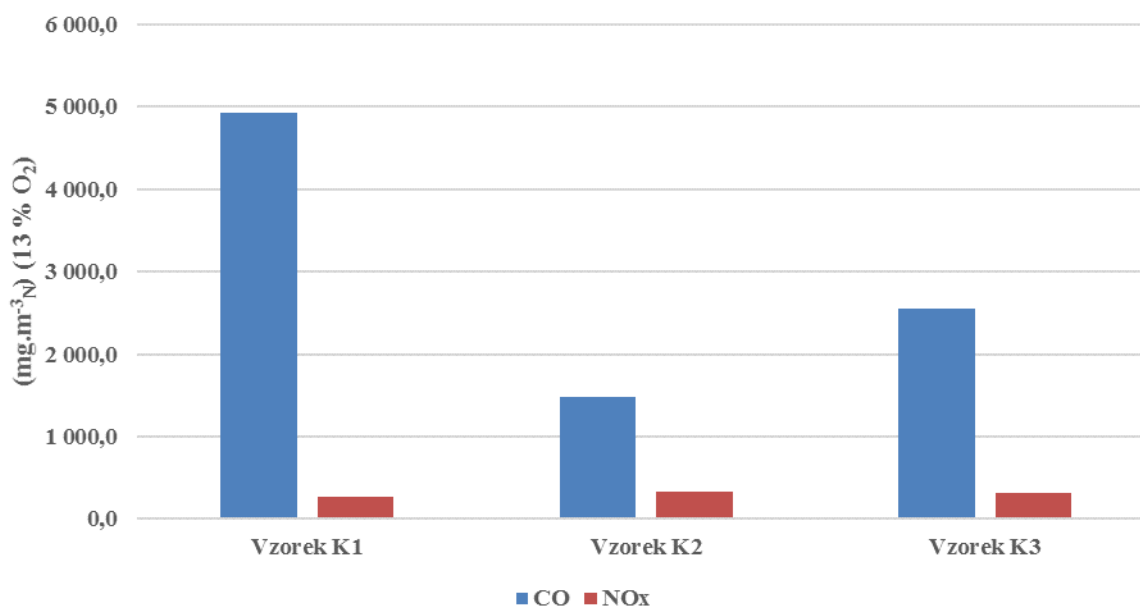
jmenovitého výkonu (vzorek K2), kdy by zařízení splnilo i parametry pro 1. třídu. Účinnost spalovacího zařízení je však velmi nízká, což je běžný problém roštových spalovacích zařízení, i když je vybaveno alespoň deflektorem spalin (Malat'ák, Jevič, Vaculík, 2010; Škaroupka, 2008).

Tab. 5.6: Výkon spalovacího zařízení při spalování briket z kompostu

Vzorek	Výhřevnost paliva	Účinnost	Vsázka paliva	Doba hoření	Hmotnostní tok paliva	Vypočtený výkon
	Q_i (kJ.kg ⁻¹)	η (%)	-	-	B (kg.h ⁻¹)	P (kW)
Vzorek K1	15 380,00	38,12	0,30	0,08	3,60	5,86
Vzorek K2	15 380,00	48,71	0,51	0,10	5,10	10,61
Vzorek K3	15 380,00	53,99	0,85	0,15	5,67	13,07

Spalování briket z kompostu, ekologické vyhodnocení

Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x z tab. 5.5 přepočtené dle požadavků pro ekologická kritéria, jsou znázorněny na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x, brikety z kompostu

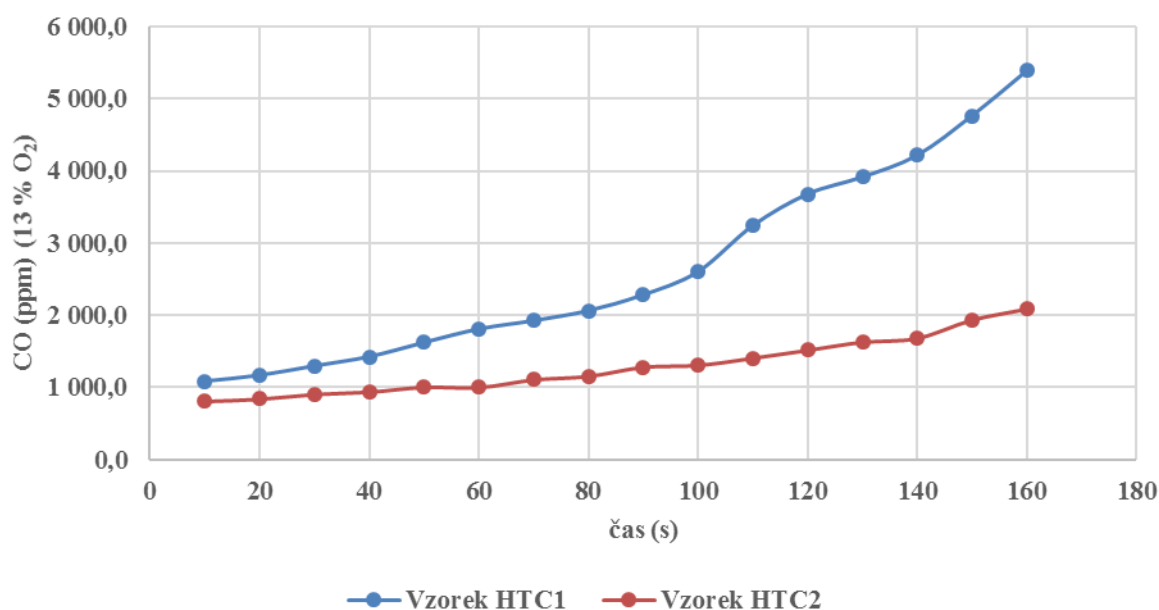
Na základě hodnot CO lze říci, že emisní limity jsou splněny ve všech případech. Emise NO_x jsou výrazně nižší než u předchozího měření komerčních briket, což je způsobeno nižším obsahem N v palivu.

Nejlepšího výsledku emisních koncentrací CO dosáhl vzorek K2 s hodnotou $1\,487,8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ se směrodatnou odchylkou $418,8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, naopak tento vzorek má nejvyšší hodnotu emisních koncentrací NO_x s hodnotou $330,8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ se směrodatnou odchylkou $26,3\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jelikož jsou splněny legislativní požadavky, lze toto palivo doporučit jako náhradu za kusové dřevo.

5.2.3 Spalování vzorku čistírenského kalu

Cílem pokusu spalování HTC kalu bylo posoudit vhodnost využití takto upraveného odpadu jako paliva. Spalovací zkouška probíhala na dvě měření dle hmotnosti vzorku.

Spalování vzorku bylo provedeno v krbových kamnech Romotop Riano 02. Přívod primárního vzduchu byl naplno otevřen. K měření byl použit plynový analyzátor Casper 301, který byl kvůli rychlému hoření vzorku doplněn fotologem po 10 sekundách, naměřené hodnoty byly přepsány do měřicího protokolu. Pro tento vzorek paliva byla zpracována stechiometrická analýza, viz příloha A, tabulka 2.

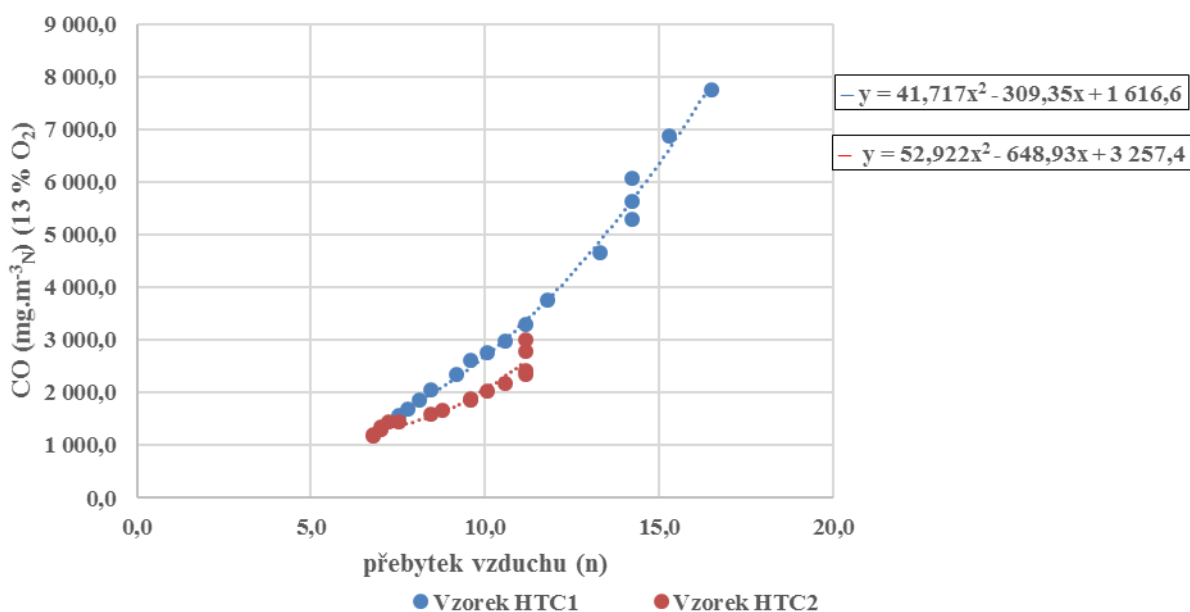


Obr. 5.7: Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, čistírenský kal

K převodu naměřených hodnot se vychází z tab. 4.5. Naměřené hodnoty a jejich převod jsou uvedeny v příloze D, tabulka 1 – 4. Na obr. 5.7 jsou znázorněny naměřené a přepočtené hodnoty emisních koncentrací CO na referenční obsah kyslíku 13 % v objemovém množství v závislosti na čase.

Spalování vzorku kalu, vliv přebytku vzduchu na emise CO

Na obr. 5.8 je znázorněna závislost koncentrace CO ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu pro jednotlivé vzorky. U obou vzorků lze sledovat rostoucí závislost emisních koncentrací CO s přibývajícím součinitelem přebytku spalovacího vzduchu. Na základě regrese analýzy je závislost popsána dle vztahu 5.4 a 5.5, s těsnou korelací.



Obr. 5.8: Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, čistírenský kal

Pro vzorek HTC1 (čistírenský kal 90 g):

$$CO = 41,717 \cdot n^2 - 309,35 \cdot n + 1616,6, \text{ (mg.m}^{-3}\text{)} \quad (5.4)$$

S hladinou spolehlivosti $R^2 = 0,99$, kdy hodnoty n se pohybují v rozmezí $n = 7,5 - 16,5$.

Pro vzorek HTC2 (čistírenský kal 150 g):

$$CO = 52,922 \cdot n^2 - 648,93 \cdot n + 3257,4, \text{ (mg.m}^{-3}\text{)} \quad (5.5)$$

S hladinou spolehlivosti $R^2 = 0,92$, kdy hodnoty n se pohybují v rozmezí $n = 6,8 - 11,1$.

Vyhodnocení spalování vzorku kalu

Vzhledem k tomu, že vzorek HTC v posuzovaném intervalu dohořival, budou z naměřených hodnot uvažovány maximální hodnoty do $n \leq 10$, nedojde tak ke zkreslení při vyhodnocování výsledků. Výsledné přepočtené a naměřené hodnoty z přílohy D jsou potom uvedeny v následující tab. 5.7.

Tab. 5.7: Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování HTC kalu

		T_s	T_o	O_2	CO	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
		°C	°C	%	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
Vzorek HTC1	\bar{x}	208,6	29,6	18,5	427,8	95,9	2,4	8,6	1 400,4	50,4	1,1	48,4	8,4	2 016,6	487,1
	x_{max}	209,5	29,7	18,8	489,0	111,3	2,7	9,7	1 808,2	57,0	1,5	54,3	9,6	2 603,8	508,1
	x_{min}	207,3	29,5	18,2	375,0	80,9	2,1	7,6	1 084,1	44,8	0,9	41,6	7,5	1 561,1	472,1
	s	0,8	0,1	0,2	39,3	10,5	0,2	0,8	252,0	4,3	0,2	4,5	0,7	362,9	12,2
	s ²	0,9	0,2	0,5	6,3	3,2	0,5	0,9	15,9	2,1	0,4	2,1	0,9	19,1	3,5
Vzorek HTC2	\bar{x}	227,2	30,0	18,3	341,3	116,3	2,6	8,0	1 037,0	51,6	0,8	47,6	7,9	1 493,3	544,8
	x_{max}	233,3	30,0	18,8	361,0	138,6	3,0	9,7	1 309,0	61,5	1,1	54,5	9,6	1 884,9	571,9
	x_{min}	220,0	29,9	17,9	311,0	87,2	2,1	6,9	810,6	44,9	0,7	37,5	6,8	1 167,3	508,9
	s	4,4	0,0	0,3	14,0	18,6	0,3	1,1	164,8	6,0	0,1	6,2	1,1	237,3	20,2
	s ²	2,1	0,2	0,6	3,7	4,3	0,6	1,0	12,8	2,5	0,4	2,5	1,0	15,4	4,5

Technické hodnocení

Při posouzení dle kritérií tab. 5.1, lze říci, že spalování sledovaných paliv splňuje emisní limity pro třídu 1, i když je zařízení provozováno hluboko pod jmenovitý výkon.

V tab. 5.8 je uveden výpočet výkonu spalovacího zařízení s použitými vzorky. Z těchto hodnot je patrné, že by při snížení přívodu spalovacího vzduchu bylo dosaženo, alespoň minimálního výkonu (4 kW). Účinnost spalovacího zařízení je velmi nízká, což se dalo díky malé hmotnosti spalovaného vzorku předpokládat.

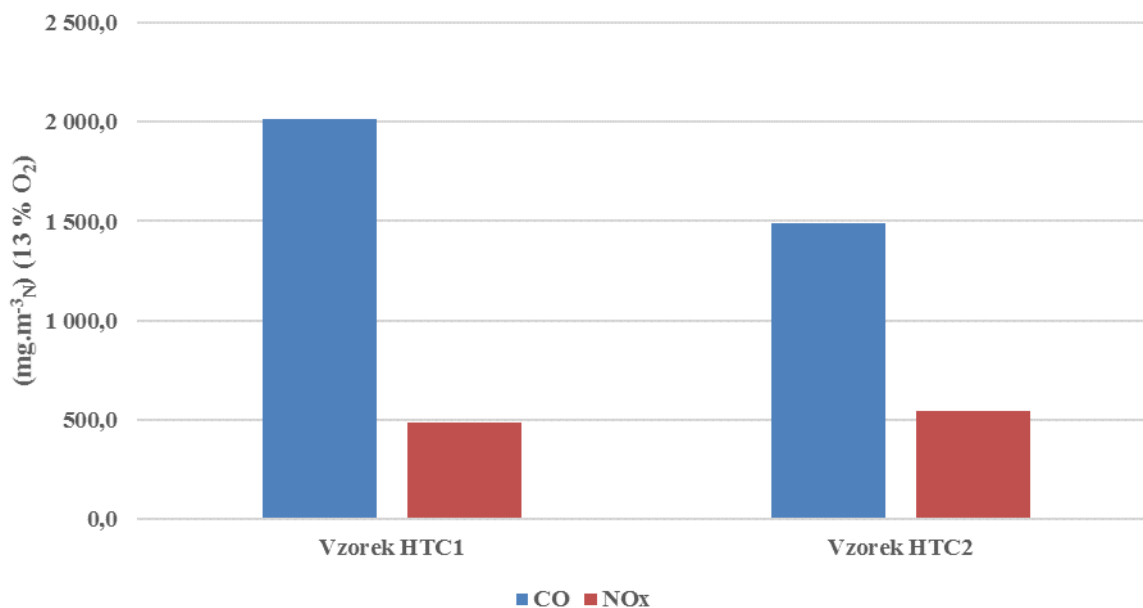
Tab. 5.8: Výkon spalovacího zařízení při spalování čistírenského kalu

Vzorek	Výhřevnost paliva	Účinnost	Vsázka paliva	Doba hoření	Hmotnostní tok paliva	Vypočtený výkon
	Q_i (kJ.kg ⁻¹)	η (%)	-	-	B (kg.h ⁻¹)	P (kW)
Vzorek HTC1	11 090,00	34,37	0,09	0,03	2,55	2,70
Vzorek HTC2	11 090,00	41,34	0,15	0,05	2,90	3,69

Spalování vzorku kalu, ekologické vyhodnocení

Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x z tab. 5.7 přepočtené dle požadavků pro ekologická kritéria, jsou znázorněny na obrázku 5.9. Na základě hodnot CO lze říci, že emisní limity jsou splněny u obou měření.

Nejlepšího výsledku emisních koncentrací CO dosáhl vzorek HTC2 s vyšší hmotností s hodnotou 1 493,3 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 237,3 mg.m⁻³, naopak tento vzorek má nejvyšší hodnotu emisních koncentrací NO_x s hodnotou 544,8 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 20,2 mg.m⁻³.


 Obr. 5.9: Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x, čistírenský kal

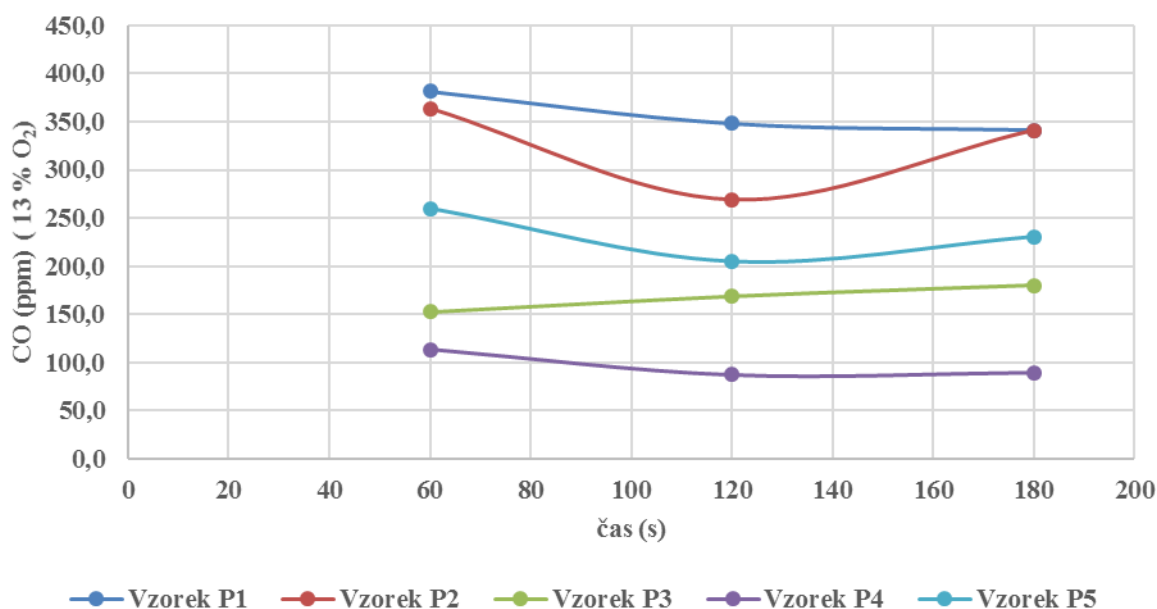
5.2.4 Automatická kamna a spalování vzorku pelet

Cílem série měření při spalování certifikovaného vzorku pelet v automatickém spalovacím zařízení bylo ověření výše uvedených naměřených hodnot na moderním spalovacím zdroji.

Spalování vzorku bylo provedeno v automatických kamnech Calor Matilde, kde je možné nastavit pouze výkon a nejde tak regulovat přívod spalovacího vzduchu. Automatická kamna mají 5 výkonových režimů. Proto bylo provedeno měření při všech režimech a navíc byla provedena kontrola měření, před utěsněním komínového tělesa, dále při instalaci teplovzdušného výměníku a ve stavu kdy bylo v provozu zapnuté přitápění.

K měření byl použit plynový analyzátor Casper 301 záznam tří hodnot do paměti po 60 sekundách. Z protokolu měření byly naměřené hodnoty přepsány a jsou uvedeny v příloze E. K převodu hodnot objemových na hmotnostní se vychází z tab. 4.2, palivo pelety. Pro přepočet na suché spaliny je využito vztahu 4.3 dle převodových konstant z tab. 4.2. Naměřené hodnoty a jejich převod je uveden v příloze E, tabulka 1 – 5.

Na obr. 5.10 jsou znázorněny naměřené a přepočtené hodnoty emisních koncentrací CO na referenční obsah kyslíku 13 % v objemovém množství v závislosti na čase.



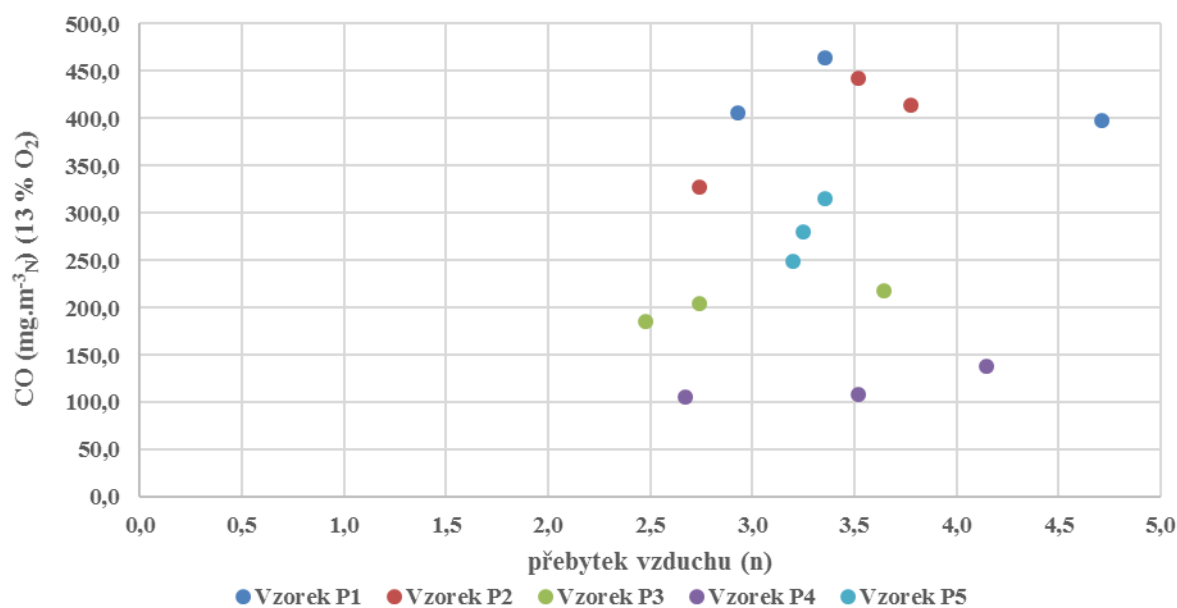
Obr. 5.10: Emisní koncentrace CO v závislosti na čase, dřevní pelety

Spalování vzorku pelet, vliv přebytku vzduchu na emise CO

Na obr. 5.11 je znázorněna závislost koncentrace CO ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu pro jednotlivé vzorky. U vzorků kvůli malému počtu bodů nelze stanovit závislost (i při více bodech by to byl stejný problém kvůli charakteru zdroje).

- Hoření vzorku 1 probíhalo v rozmezí $n = 2,9 - 4,7$.
- Hoření vzorku 2 probíhalo v rozmezí $n = 2,7 - 3,8$.
- Hoření vzorku 3 probíhalo v rozmezí $n = 2,5 - 3,6$.
- Hoření vzorku 4 probíhalo v rozmezí $n = 3,2 - 3,4$.

U automatických kamen probíhá hoření v přibližně stejném pásmu – optimálním.



Obr. 5.11: Emisní koncentrace CO v závislosti na vzduchu, dřevní pelety

Vyhodnocení spalování vzorku pelet

Výsledné přepočtené a naměřené hodnoty z přílohy E jsou potom uvedeny v následující tab. 5.9.

Tab. 5.9: Naměřené a přepočtené hodnoty, spalování pelet

		T _s	T ₀	O ₂	CO	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
		°C	°C	%	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
Vzorek P1	\bar{x}	131,4	25,2	15,0	268,0	29,4	5,4	3,7	356,9	13,2	0,3	86,4	3,7	422,6	73,8
	x _{max}	140,3	25,4	16,5	313,0	39,9	6,5	4,7	381,6	17,8	0,4	89,3	4,7	464,0	83,9
	x _{min}	116,0	25,1	13,8	191,0	23,1	4,0	2,9	341,2	10,4	0,3	81,9	2,9	397,9	54,8
	s	10,9	0,1	1,1	54,7	7,5	1,0	0,8	17,7	3,2	0,0	3,2	0,8	29,5	13,5
	s ²	3,3	0,4	1,1	7,4	2,7	1,0	0,9	4,2	1,8	0,1	1,8	0,9	5,4	3,7
Vzorek P2	\bar{x}	190,8	21,4	14,6	256,3	50,8	5,8	3,3	324,5	19,3	0,3	80,4	3,3	394,6	117,8
	x _{max}	193,2	21,5	15,4	272,0	62,0	6,9	3,8	363,4	21,9	0,3	83,7	3,8	441,9	126,2
	x _{min}	188,0	21,3	13,3	238,0	43,1	5,0	2,7	269,2	16,1	0,3	77,7	2,7	327,3	107,2
	s	2,1	0,1	0,9	14,0	8,1	0,8	0,4	40,2	2,4	0,0	2,5	0,4	48,9	7,9
	s ²	1,5	0,3	1,0	3,7	2,8	0,9	0,7	6,3	1,6	0,2	1,6	0,7	7,0	2,8
Vzorek P3	\bar{x}	204,2	23,7	13,7	151,3	53,9	6,6	3,0	166,8	18,3	0,2	81,5	3,0	202,9	109,2
	x _{max}	205,5	23,7	15,2	162,0	65,1	7,7	3,6	179,7	22,1	0,2	84,1	3,6	218,6	114,2
	x _{min}	202,6	23,6	12,5	130,0	41,0	5,2	2,5	152,4	15,7	0,1	77,7	2,5	185,3	105,5
	s	1,2	0,0	1,1	15,1	9,9	1,0	0,5	11,2	2,7	0,0	2,8	0,5	13,6	3,7
	s ²	1,1	0,2	1,1	3,9	3,2	1,0	0,7	3,3	1,7	0,1	1,7	0,7	3,7	1,9
Vzorek P4	\bar{x}	186,7	23,4	14,7	75,0	46,6	5,7	3,4	96,7	19,1	0,1	80,8	3,4	117,5	110,3
	x _{max}	191,8	23,5	15,9	86,0	56,7	7,1	4,1	113,3	21,7	0,1	84,6	4,1	137,8	114,0
	x _{min}	178,8	23,4	13,1	67,0	38,9	4,6	2,7	87,1	15,3	0,1	78,2	2,7	105,9	107,0
	s	5,6	0,0	1,2	8,0	7,5	1,1	0,6	11,8	2,7	0,0	2,7	0,6	14,4	2,9
	s ²	2,4	0,2	1,1	2,8	2,7	1,0	0,8	3,4	1,6	0,1	1,6	0,8	3,8	1,7
Vzorek P5	\bar{x}	210,4	22,7	14,5	186,7	51,8	5,8	3,3	231,7	20,9	0,2	78,8	3,3	281,7	119,6
	x _{max}	212,6	22,8	14,7	204,0	54,6	5,9	3,4	259,5	21,7	0,2	79,5	3,4	315,5	123,5
	x _{min}	208,5	22,6	14,4	169,0	50,4	5,7	3,2	205,1	20,3	0,2	78,0	3,2	249,4	115,8
	s	1,7	0,1	0,1	14,3	2,0	0,1	0,1	22,2	0,6	0,0	0,6	0,1	27,0	3,2
	s ²	1,3	0,3	0,4	3,8	1,4	0,3	0,3	4,7	0,8	0,1	0,8	0,3	5,2	1,8

Spalování vzorku pelet, technické vyhodnocení

Pro automatická kamna na pelety jsou přísnější podmínky (pro certifikaci), vycházejí z technické normy ČSN EN 14 785. Která stanoví, že při jmenovitém výkonu nesmí průměrná objemová koncentrace CO přepočtená na 13 % obsah O₂ ve spalínách překročit 0,04 % (500 mg.m⁻³) a 0,06 % (750 mg.m⁻³) při sníženém tepelném výkonu. Účinnost potom nesmí být nižší než 75 % při jmenovitém a 70 % při sníženém výkonu.

V tab. 5.10 je uveden výpočet výkonu spalovacího zařízení s použitým palivem, z něhož je patrné, že v pátém výkonnostním režimu dochází k přesahu jmenovitého výkonu spalovacího zařízení, které je uveden výrobcem 5,6 kW. Tudíž účinnost při P4 a P1 je dle požadavků normy splněna.

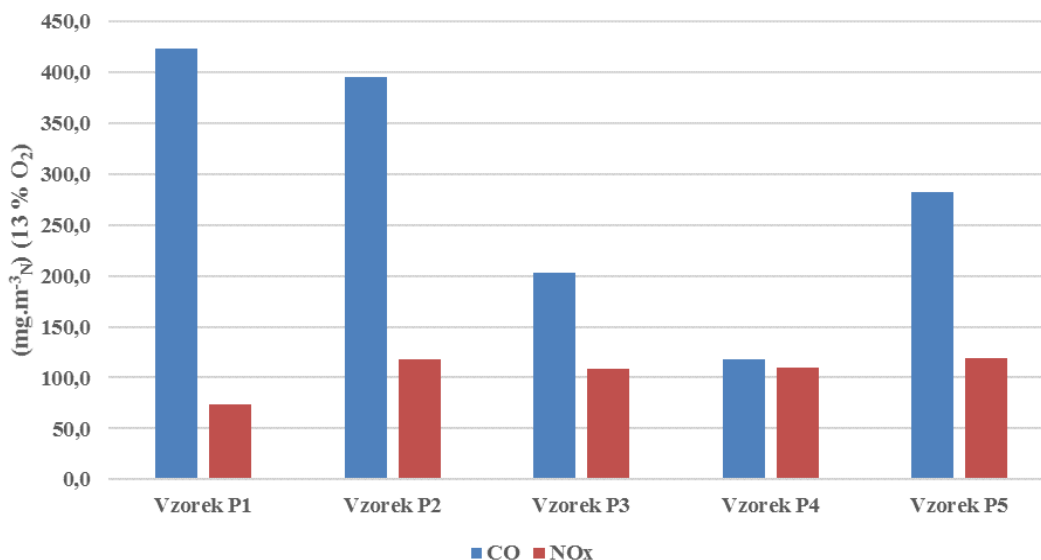
Tab. 5.10: Výkon spalovacího zařízení při spalování dřevních pelet

Vzorek	Výhřevnost paliva	Účinnost	Vsázka paliva	Doba hoření	Hmotnostní tok paliva	Vypočtený výkon
	Q_i (kJ.kg ⁻¹)	η (%)	-	-	B (kg.h ⁻¹)	P (kW)
Vzorek P1	16 660,00	86,41	0,56	0,75	0,75	2,99
Vzorek P2	16 660,00	80,36	0,80	0,75	1,07	3,97
Vzorek P3	16 660,00	81,53	1,00	0,83	1,20	4,53
Vzorek P4	16 660,00	80,84	0,70	0,50	1,40	5,24
Vzorek P5	16 660,00	78,84	1,20	0,75	1,60	5,84

Spalování vzorku pelet, ekologické vyhodnocení

Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x z tab. 5.9 přepočtené dle požadavků pro ekologická kritéria, jsou znázorněny na obrázku 5.12. Na základě hodnot CO lze říci, že emisní limity jsou splněny ve všech případech s vysokou rezervou.

Nejlepšího výsledku emisních koncentrací CO dosáhl vzorek P4, tedy při čtvrtém výkonnostním stupni, při jehož spalování dosahovalo spalovací zařízení jmenovitého výkonu. Průměrná hodnota emisních koncentrací CO je 117,5 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 14,4 mg.m⁻³. Při měření P4 je hodnotu emisních koncentrací NO_x 110,3 mg.m⁻³ se směrodatnou odchylkou 2,9 mg.m⁻³.

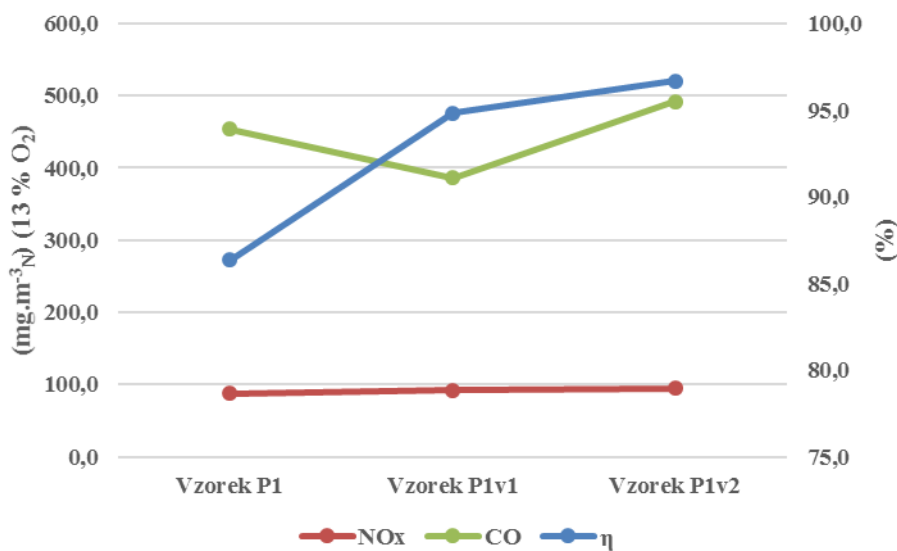

 Obr. 5.12: Průměrné emisní koncentrace CO a NO_x, dřevní pelety

Spalování vzorku pelet, zvýšení výkonu

Při pokusu o zvýšení výkonu kamen byl instalován do komínové roury za spalovací zařízení teplovzdušný výměník, který měl za účel zvýšení výkonu spalovacího zařízení, měření bylo realizováno za výměníkem. Naměřené a přepočtené hodnoty jsou v příloze E, tabulka 6, 7. Jelikož bylo cílem dosáhnout nejvyšší účinnosti spalovacího zařízení, probíhal experiment při prvním stupni výkonu P1. Dle tab. 5.9 je při tomto výkonu teplota spalin již s hodnotou 131,4 °C na kritické, jelikož jde o mezní teplotu, kdy dochází ke kondenzaci spalin ve spalinové cestě. Hodnoty označené „Vzorek P1v1“ jsou naměřené po instalaci teplovzdušného výměníku. Označení vzorku P1v2 představuje instalaci vycházející z P1v1, navíc s dodatečným zvýšením objemového průtoku chladícího vzduchu ve výměníku vlivem instalace ventilátoru. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.11 a graficky znázorněny na obr. 5.13. Při pokusu docházelo k značné kondenzaci, která ochladila pravděpodobně i spalovací prostor. Při pokusu došlo k navýšení výkonu spalovacího zařízení až o 10 %.

Tab. 5.11: Provozní parametry při zvýšeném výkonu, spalování dřevních pelet

	T_s	η	NO_x	CO
	°C	%	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³
Vzorek P1	139,2	86,4	87,7	366,3
Vzorek P1v1	71,6	94,8	92,5	293,8
Vzorek P1v2	53,8	96,7	95,2	397,0



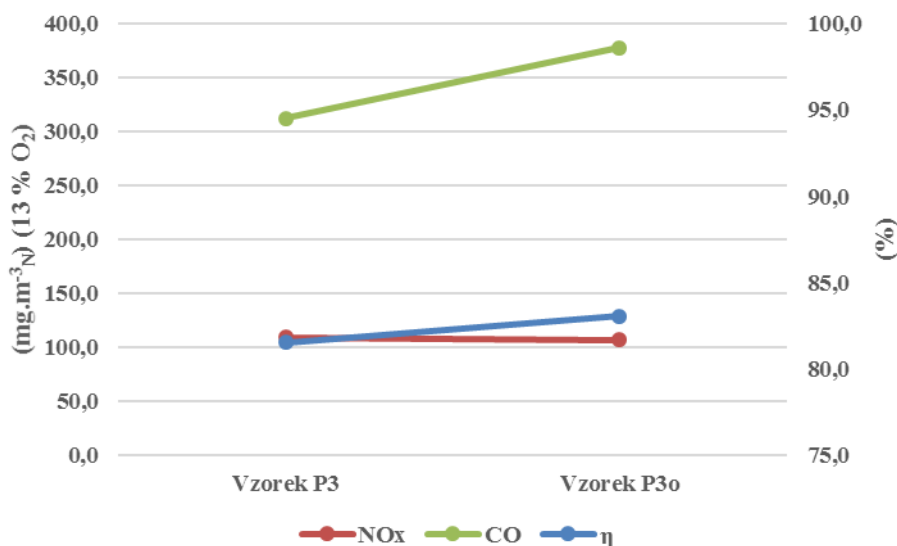
Obr. 5.13: Emisně-provozní parametry při zvýšeném výkonu

Spalování vzorku pelet, předehřev spalovacího vzduchu

Další pokus o zvýšení výkonu spalovacího zařízení vychází z předpokladu, že zvýšením vstupní teploty spalovacího vzduchu do spalovacího zařízení dojde ke snížení entalpie, která je využita na odpaření vody ze vzorku (dle 4.51). Automatická kamna Matilde jsou opatřena topnou patronou, která se aktivuje v módu roztápění, po roztopení je deaktivována. Pro potřeby experimentu byla patrona zapnuta a regulátorem výkonu nastavena na výkon 165 W (roztápěcí výkon 300 W). Experiment probíhal při výkonu P3. Hodnoty označené „Vzorek P3o“ jsou naměřené hodnoty během pokusu a jsou uvedeny v příloze E, tabulka 8. Pro přehled jsou uvedeny vybrané hodnoty v tab. 5.12 a graficky znázorněny na obr. 5.14. Při pokusu došlo k malému zvýšení účinnosti spalovacího zařízení, a k zvýšení teploty spalin, nepatrnému poklesu koncentrace NO_x a k zvýšení koncentrace CO ve spalinách.

Tab. 5.12: Provozní parametry při předehřevu vzduchu, spalování dřevních pelet

	Ts	η	NO_x	CO
	°C	%	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Vzorek P3	204,2	81,5	109,2	202,9
Vzorek P3o	221,2	83,1	106,8	270,9



Obr. 5.14: Emisně-provozní parametry při předehřevu vzduchu

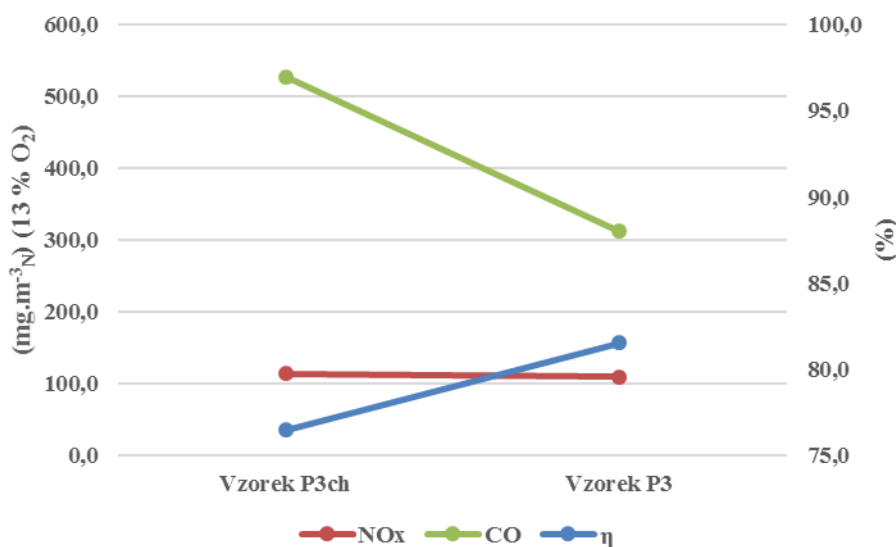
Spalování vzorku pelet, těsnost spalovacích cest

Před začátkem celého měření v kamnech Matilde bylo provedeno měření stávajícího spalovacím zdroji, hodnoty viz příloha 5, tabulka 9, označení „Vzorek P3ch“. Dále byla provedena zkouška tahu komína, v rámci doplňkové funkce analyzátoru, která upozornila na možné problémy ve spalovací cestě. Po tomto měření byla spalinná cesta až po napojení na komínové těleso demontována a utěsněna silikonem Saudal pro krby (odolnost do 250 °C), čímž se měla zaručit zvýšená těsnost spalinných cest. Měření probíhalo při výkonu P3.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že docházelo při provozu k nasávání falešného vzduchu (zřejmě za vyústkem z kamen). Pro přehled výsledků jsou uvedeny vybrané hodnoty v tab. 5.13 a jejich grafická závislost znázorněna na obr. 5.15. Z naměřených hodnot lze říci, že došlo k navýšení emisních koncentrací, ale z uživatelského hlediska došlo také k navýšení výkonu o cca 5 %.

Tab. 5.13: Emisně-provozní charakteristiky, revize spalinné cesty

	O ₂	n	η	NO _x	CO
	%	-	%	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³
Vzorek P3	13,7	3,0	81,5	109,2	202,9
Vzorek P3ch	14,6	3,5	76,5	114,0	413,5



Obr. 5.15: Emisně-provozní charakteristiky, revize spalinné cesty

5.3 Vyhodnocení výsledků

Stechiometrická analýza

Pro vyhodnocení naměřených emisních koncentrací a zejména výpočtu přebytku spalovacího vzduchu (vztah 4.1) pomocí $\text{CO}_{2\text{max}}$ (vztah 4.31) je využito metodiky vycházející ze stechiometrie spalovacích procesů. Tento postup byl využit pro vyhodnocení paliv briket z kompostu a HTC čistírenského kalu. Pro oba vzorky byla provedena technická analýza pro zjištění obsahu vody, popele a prchavé a neprchavé hořlaviny. Na základě těchto údajů byl pomocí nejnovějších korelačních vztahů 2.3 – 2.5 (Nhuchhen, 2016), dopočten prvkový rozbor hořlavé části.

Pro vzorky briket z kompostu byl pomocí stechiometrie vypočtený obsah O_2 s hodnotou 18,72 % v suchých spalinách při $n = 9,1$, naměřená hodnota byla 18,66 %, což představuje odchylku naměřených hodnot o 0,06 % nižší než stechiometrie.

Pro vzorky HTC kalu byl pomocí stechiometrie vypočtený obsah O_2 s hodnotou 19,19 % v suchých spalinách při $n = 11,5$, naměřená hodnota byla 19,02 %, což představuje odchylku naměřených hodnot o 0,17 % nižší než stechiometrie.

Vzhledem k tomu že je plynový analyzátor doplněn filtrováním a úpravou kondenzátu, propustí v objemu cca 10 – 20 % vlhkých spalin. Lze tedy říci, že pro experimentální vyhodnocení neznámého vzorku paliva jsou korelační vztahy 2.3 – 2.5 dostačující. Nicméně pokud palivo bude hořet optimálně, je nutné následně zpracovat laboratorní prvkový rozbor. V případě že je ve vzorku více dusíku nebo jiného prvku, dojde k vyšší odchylce.

Celkové zhodnocení posuzovaných paliv

Všechny spalované vzorky hořely dle sensorického hodnocení v pořádku.

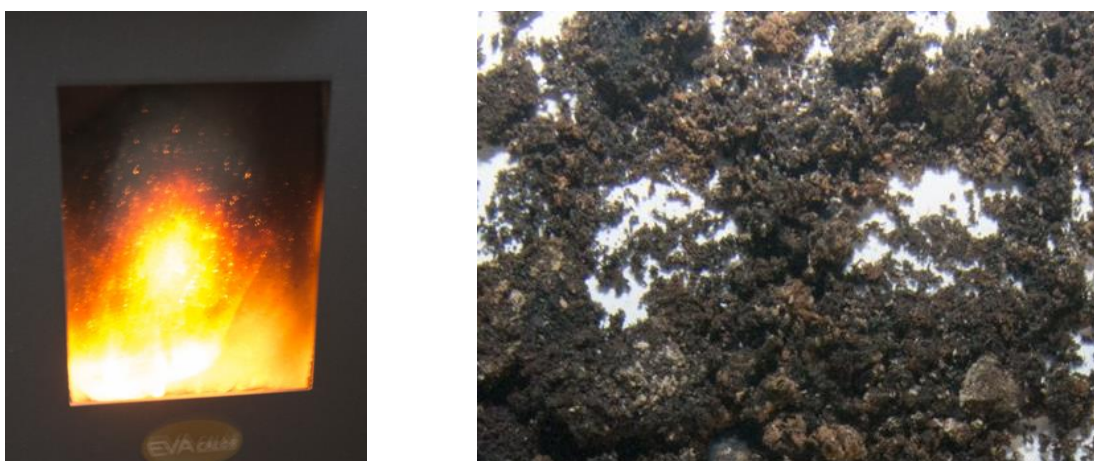
Brikety „Vzorek B1“ tedy briketa z pilin při hoření uvolňovala kousky pilin a docházelo k poměrně rychlému zanesení pozorovacího okénka černými sazemi (obr. 5.16). Ze všech komerčních briket sensoricky nejlépe (krátký světlý plamen) a časově nejdéle hořela briketa z kůry (vyjma vzorku uhlí). Brikety z kompostu hořely také dlouhým nečadivým plamenem, vyjma třetího vzorku (obr. 5.16). Nicméně po delším hoření nedošlo k jejich plnému rozpadu a dohořivaly tak s vyšším dýmem (měření již neprobíhalo). Pravděpodobně by pomohla tvarová úprava, resp. úprava jejich výroby – díra ve středu brikety, tak by došlo k lepšímu vyhoření a následnému rozpadu.



Obr. 5.16: Stopy nedokonalého spalování, komerční brikety z pilin a kompostu

Spalování čistírenského kalu proběhlo překvapivě v pořádku, plameny byly stále a plápolavé, oranžové barvy. Hoření neprobíhalo za tak jasně přechodných podmínek jako paliva z biomasy.

Při spalování pelet, bylo bez utěsnění spalinové cesty rovněž patrné začernání pozorovacího okénka (obr. 5.17), to po utěsnění spalinové cesty kamnářským tmelem zmizelo, lze to přikládat k špatné těsnosti za spalovací zařízení a jeho napojení, na litinovou rouru komínu. Na obr. 5.17 je rovněž fotografie největší nedopal, který během všech měření nastal, dle obr. 4.3, jde o nedopal mezi 0,1 – 1 %.



Obr. 5.17: Stopy nedokonalého spalování a tuhý nedopal, automatická kamna

Ověření hypotéz:

Hypotéza 1: *„Největší vliv na kvalitu spalovacího procesu má množství přiváděného spalovacího vzduchu, který ovlivňuje účinnost spalovacího zařízení.“*

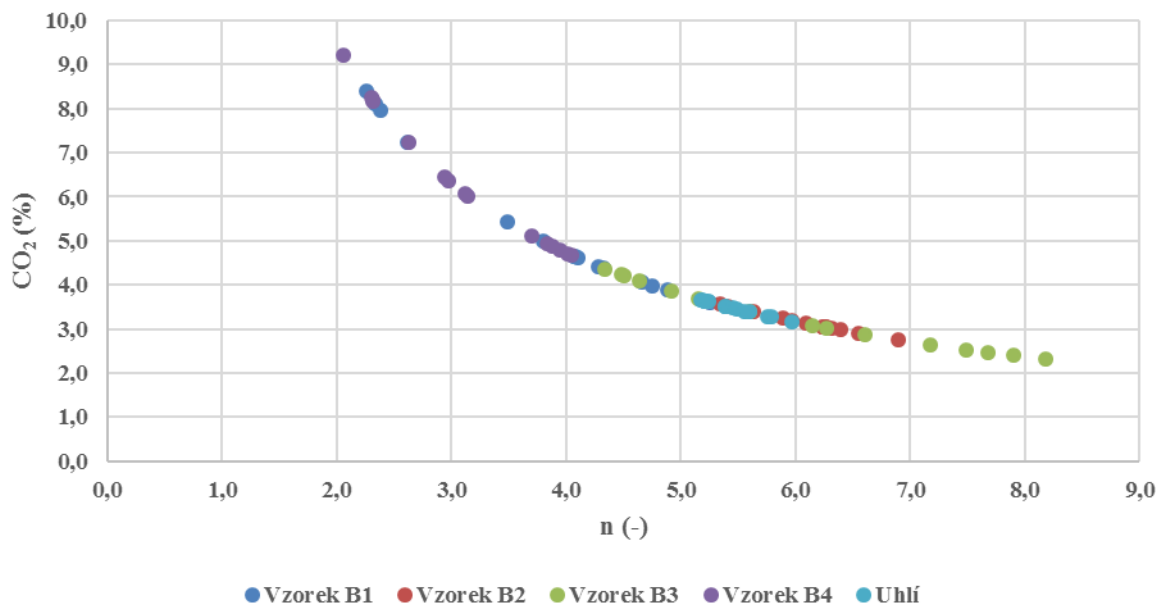
Tato hypotéza je pravdivá a vychází již ze samé podstaty výkladu stechiometrického spalování. Při měření pomocí plynového analyzátoru, který je instalován ve spalinové cestě, však toto ověřit nejde, jelikož i spaliny vzniklé při nestechiometrickém spalování budou naředěny spaliny ve spalinové cestě a budou vyhodnoceny s hodnotou $n > 1$. Lze předpokládat, že by k takovému případu mohlo dojít při extrémním přesahu jmenovitého výkonu spalovacího zařízení, tedy naměřených hodnot $n < 1$ pomocí analyzátoru.

Toto tvrzení lze ověřit z naměřených výsledků a porovnáním, kdy došlo k spalování při jmenovitým výkonu. Např. u komerčních briket k tomuto jevu došlo u vzorku 1, kdy v porovnání se vzorkem B4 jsou průměrné hodnoty CO vyšší cca o 393 % přičemž součinitel n je vyšší o cca 42 %. Tudíž když průměrný součinitel n má u vzorku B1 hodnotu 5,4 a u vzorku B4 hodnotu 3,8 je jasné že pomocí měření koncentrací spaliny ve spalinové cestě nelze skutečně posoudit kvalitu spalovacího procesu bez ověření, zdali spalování probíhá při jmenovitým výkonu.

Tato problematika se týká především zplyňovacích spalovacích zařízení, kde lze instalovat měřící sondu analyzátoru přímo do mezistupně zplyňování a hoření plynů jak uvádí např. Carroll et al. (2016).

Hypotéza 2: *„Přebytek vzduchu je velmi důležitou provozní veličinou, která ovlivňuje jednotlivé emisní koncentrace oxidu uhelnatého při spalování organických odpadů.“*

Z naměřených hodnot je zřejmé, že díky přebytku vzduchu dochází k ředěním spaliny ve spalinové cestě. U některých vzorků, kdy probíhá měření ve fázi dohoření, je patrná závislost dle spojitých exponenciálních rostoucích funkcí (vztahy 5.1 – 5.5). Což je v souladu s metodikou stechiometrie a přepočtu přebytku spalovacího vzduchu dle CO_{2max} , z které vychází, že s přibývajícím součinitelem spalovacího vzduchu klesá při konstantní hodnotě CO_{2max} (vztah 4.31), koncentrace CO_2 ve spalínách. Na obr. 5.18 je zobrazena závislost přepočtené koncentrace CO_2 pro naměřené součinitele přebytku vzduchu komerčních vzorků briket (toto měření poskytuje široký rozptyl posuzovaných hodnot). Porovnání této funkce se závislostmi ze vztahů 5.1 a 5.2 jde o téměř inverzní funkce.



Obr. 5.18: Závislost CO₂ na přebytku vzduchu, komerční paliva brikety

Pokud jsou tedy naměřené hodnoty emisních koncentrací CO vyhodnoceny regresní analýzou s těsnou korelací a vyjádřené pomocí spojitě rostoucí exponenciální funkce je vysoká pravděpodobnost, že měření probíhalo v procesu dohoření posuzovaných paliv a tudíž výsledné hodnoty emisních koncentrací CO mohou být vyšší a tudíž by nemělo být podle nich vyřčeno, zdali je posuzované palivo vhodné pro daný druh spalovacího zařízení. Proto lze předpokládat, že takto naměřené emisní koncentrace CO ve spalinách budou vždy vyšší než při spalování na jmenovitý výkon. Nebo při spalování vyšším než jmenovitý výkon a potom mají zcela logicky vyšší hodnoty emisních koncentrací, protože dochází k stavu z první hypotézy. Toto nemusí být však vždy na překážku, jelikož například u měřeného vzorku HTC kalu je patrné že emisní koncentrace CO má poměrně nízké hodnoty i při nižším než jmenovitém výkonu. Proto lze předpokládat, že při dosažení jmenovitého výkonu zařízení dodatečně klesnou, proto je vhodné je doporučit k dalšímu zkoumání.

Tato hypotéza je na základě interpretace naměřených hodnot pravdivá. Na základě této hypotézy lze doporučit, aby testování pokusných paliv a měření jejich emisních koncentrací probíhalo nejlépe při jmenovitém výkonu spalovacího zařízení v hoření při ustáleném stavu. Protože při rozhořování a dohořování paliva dochází ke zkresleným výsledkům. Jako dostatečná interpretace naměřených výsledků je potom postačující průměrná hodnota emisních koncentrací. Což odpovídá i metodice měření dle technických norem a legislativy pro malé spalovací zařízení.

Hypotéza 3: *„Největší tepelné ztráty spalovacího zařízení jsou ztráty citelným teplem odcházejících spalin, ostatní tepelné ztráty jsou zanedbatelné.“*

Tato hypotéza je na základě naměřených hodnot potvrzena a je pravdivá. Tedy že ztráty citelným teplem dle vztahu 4.45 jsou nejvyšší z měřených a řádově dosahují desítky %. U měření, kde spalovací proces probíhal přes jmenovitý výkon, se zvýšily podíl tepelné ztráty plynným nedopalem (dle vztahu 4.49), nicméně jejich zvýšení bylo v řádu jednotek %. Ztráty mechanickým nedopalem (dle vztahu 4.51) byly zanedbány, jelikož docházelo k úplnému dohoření paliva ve všech případech a charakter využití paliv nedovolil např. propadu pod spalovací rošt.

Z měření na automatických kamnech vyplynulo, že tepelné ztráty citelným nedopalem lze snížit instalací např. teplovzdušného výměníku. Při této instalaci je nezbytně nutné zaručit, aby teplota spalin za výměníkem nedosáhla kritické teploty (pod 130 °C), při které dochází ke kondenzaci vodní páry ve spalinách, což by mělo za důsledek snížení životnosti spalinové cesty a mohlo by dojít ke snížení provozní teploty spalovacího prostoru a tím nárůstu emisních koncentrací CO. Významné snížení lze mnohdy docílit, zejména u zařízení v provozu, kontrolou těsnosti spalinových cest.

Hypotéza 4: *„Největší vliv na tepelné vlastnosti vzorků tuhých organických odpadů má voda obsažená v palivu, která vedle popelovin nejvíce ovlivňuje tepelné účinnosti spalovacího zařízení.“*

V rámci této hypotézy byl prováděn výzkum se smrkovou štěpkou s rozdílným obsahem vody v palivu, Černý, Malaťák, Bradna (2016). Výsledky jasně potvrzují, že voda v palivu funguje jako inhibitor hoření a s jejím zvyšujícím obsahem v palivu roste doba hoření posuzovaného vzorku. V rámci analýza naměřených hodnot v disertační práci je shoda patrná například u vzorku kůry z komerčních paliv. Vzhledem k její vyššímu obsahu vody dochází k delší době hoření paliva, což má u organických paliv příznivý vliv, tedy zejména u briket, obsah by neměl být však vyšší než 20 %, aby nedošlo k významnému snížení výhřevnosti paliva.

5.4 Diskuze

Využívání organických odpadů jakožto náhrady za fosilní paliva je v současné době aktuální téma. V oboru malých spalovacích zdrojů došlo v současné době ke značnému vývoji jak spalovacích zařízení, tak rostoucí kvality paliv. Legislativa v ČR stupňuje požadavky zejména na malá spalovací zařízení s teplovodním vytápěním. U těchto zdrojů již nelze provozovat od roku 2022 zejména zdroje s roštovým topeništěm. Tudíž dochází k obměně za účinná automatická nebo zplyňovací zařízení. U kamen, tedy teplovzdušných zdrojů a zdrojů do 10 kW paradoxně přísné limity neplatí. Na základě údajů Českého statistického úřadu (ČSÚ) ze sčítání lidu z roku 2011 je zřejmé, že oba typy spalovacích zařízení se významně podílí na vytápění domácností. Proto se snaží zákonodárci prostřednictvím dotačních titulů provést obměnu za nové účinnější zdroje, např. prostřednictvím dotačního titulu „Kotlíková dotace“.

V rámci dotačního titulu „Kotlíkové dotace“ mám zkušenosti přibližně se 120-ti podanými žádostmi v letošním roce. Z toho mohu říci, že cca ze 100 žádostí svůj původní teplovodní kotel na tuhá paliva vymění za nový automatický kotel na uhlí a pelety nebo zplyňovací na kusové dřevo cca 10 % žadatelů, cca 20 % žadatelů jej vymění za plynový kondenzační kotel a zbytek žadatelů nainstaluje tepelné čerpadlo, nejčastěji technologie vzduch/voda. Z těchto 10 % si cca 3 % později zjistí, že nový automatický nebo zplyňovací kotel má v zásobníku elektromotor a odtahový ventilátor a v obavách z „blackoutu“ si raději ponechají jako zálohu svůj starý kotel na tuhá paliva a od žádosti nakonec ustoupí. Toto jsou mé zkušenosti, především ze Středočeského a Zlínského kraje. Je tedy patrné, že zájem o tuhá biopaliva u veřejnosti klesá. Nutno dodat, že přibližně každý pátý žadatel má v obývacím pokoji teplovzdušnou krbovou vložku, kde v případě nutnosti zatopí a pokryje tak tepelné ztráty.

Od roku 2010 mám také zkušenosti s dotačním titulem „Zelená Úsporám“, který je vyhlášen pro fyzické osoby a platí zde obdobný scénář jako u výše uvedeného dotačního titulu. Na druhou stranu je to logický krok, protože při komplexním zateplení průměrného rodinného domu klesají tepelné ztráty na hodnotu okolo 6 – 12 kW v závislosti na obytné ploše s tím, že po zateplení převážnou část tepelných ztrát tvoří především tepelná ztráta větráním, která mnohdy není dodržována, tak je výsledná tepelná ztráta a tím požadavek na výkon zdroje výrazně nižší. Nové moderní automatické a zplyňovací kotle mají výkon od cca 15 kW a výše, tudíž je investor pro optimální využití výkonu nucen instalovat akumulární nádrž, což ještě více prodraží investici a zájem investora o nový ekologický spalovací zdroj na tuhá biopaliva. Výjimkou jsou investoři, kteří staví tzv. pasivní dům a jako zdroj vytápění si zvolí například automatická teplovzdušná kamna, u jejichž výstupu teplého vzduchu se napojí

vstup do teplovzdušného vytápění. Jako například v disertační práci měřená kamna Calor Eva Matilde s výkonem 2,3 -5,6 kW.

Z oblasti podpor, které nejsou určeny pro fyzické osoby, mám zkušenosti například s „Operačním programem životního prostředí“ kde dochází k výměnám starých kotlů za tepelná čerpadla nejčastěji technologie vzduch/voda, kde je plynofikace jsou instalována rovněž tato čerpadla, jen místo elektřiny využívají na výparníku teplo ze spalování zemního plynu, tedy plynová tepelná čerpadla (výrazně nižší topný faktor a drahý provoz).

Svémi podloženými zkušenostmi tedy mohu shrnout zásadní stávající problémy, které se týkají malých spalovacích zdrojů v oblasti tuhých biopaliv do následovných bodů:

- 1) Biopaliva jsou drahá, oproti fosilním palivům.
- 2) Nízká měrná energetická hustota paliva, vlhkost = nároky na skladování.
- 3) Ne příliš velká důvěra v kvalitu.
- 4) Nepřiměřené výkonnostní třídy k pokrytí tepelných ztrát.
- 5) Energetická náročnost na provoz nových zařízení.
- 6) Požadavky legislativy a důsledky finanční podpory zvyšují tržní cenu nových teplovodních zdrojů.

Na základě těchto bodů se domnívám, že je vhodné řešit budoucí vývoj této problematiky.

Oblast paliv

V oblasti paliv jde především o cenu za biopalivo. Proto by se měl hledat dostupný zdroj materiálu na výrobu paliv. V současné době to jsou především katrové odpady, odpady z kůry a výroba pelet nebo briket, nicméně i přesto že jde o poměrně dostupné odpadní materiály, cena těchto paliv tomu mnohdy neodpovídá, pokud se k tomu přidají ještě náklady za balení a za dopravu, jsou ceny za tato paliva vyšší než např. za hnědé uhlí. Cenu pelet samozřejmě zvedá i certifikační proces.

V rámci disertační práce byly spalovány mj. brikety vyrobené z nadsítného odpadu kompostárny. Tento materiál je svou frakcí vhodný zejména pro výrobu briket. Pro pelety bylo třeba další drcení, což by celý proces významně prodražilo. Pokud by se ve vybraném regionu ujal koncept komunitní kompostárny, mohla při představovat cenný zdroj tohoto

materiálu za příznivou cenu, která by zahrnovala jen její úpravy. Při seznámení původců odpadu s jejich výrobou by mělo toto palivo jistě úspěch a brikety by se mohly spalovat alespoň sezónně v krbových kamnech a vložkách.

Nejnovější metodou, která je již laboratorně a v pilotních provozech v zahraničí využívána pro přípravu pelet několik let je torrefakace. Nejnovější poznatky jsou uvedeny literární rešerši. I přes nesporné výhody této technologie, které řeší problematiku zejména skladování, zůstává ovšem velkou otázkou cena.

Oblast spalovacích zařízení

Jak již bylo řečeno, nároky na teplovodní malé spalovací zdroje vzrůstají, vzrůstá také jejich technologická úroveň a tím i pořizovací cena. Investor příliš neřeší to, že má spalovací zařízení 85 nebo 89% účinnost. Takovýto malý rozdíl v účinnosti znamená v přepočtu na palivo pouze malou finanční úsporu. Spíše se zabývá výši provozní nákladů, resp. výdaji za elektřinu, které podle počtu roztápění (Lyčka, 2011) vychází optimálně od výkonu spalovacího zařízení nad 24 kW.

Teplovzdušné zařízení zůstávají kromě certifikace z pohledu ekologické legislativy poměrně stranou, lze však předpokládat že do budoucna dojde i na jejich zpřísnění, nicméně zákaz používání krbové vložky si umí představit málokdo.

Pro rozvoj v této oblasti by bylo vhodné se zabývat vývojem i nižších výkonnostních řad, zejména v okolí výkonů 5 – 15 kW. V současné době tento rozptyl poměrně úspěšně pokrývají zařízení s automatickým hořákem. Nicméně by bylo vhodné se zabývat i těmito výkonům i v oblasti zplyňovacích zdrojů, jelikož jediný zplyňovací zdroj v současné době umožňuje spálení kusového dřeva (teplovodní kotle).

Daleko zajímavější by mohl být rozvoj malých spalovacích interiérových zdrojů, které jsou nyní nazývány krby nebo hořáky na biolih. Toto zařízení v sobě kombinuje velmi nízkou investiční náročnost a poměrně velké teplotní zisky, zejména v zateplených objektech. Jako uplatnění by zde mohli najít tekuté odpadní produkty např. z Fischer–Tropschovi syntézy, nicméně v současné době se tato technologie potýká s velmi vysokým obsahem vody v tekutých produktech a vysokou výrobní cenou (Jevič, Šedivá, 2013). Fakt, že by probíhalo hoření uvnitř obytného prostoru, by měl mít za následek vysoký nárok na kvalitu paliva a prvkový rozbor by nesměl obsahovat žádné látky, které mají negativní vliv na lidský organismus.

Velmi zajímavé jsou i malé kogenerační jednotky uvedené v literární rešerši o výkonu 15 kW, které pracují v kombinaci se zplyňovacím zdrojem. V současné době by mohly mít význam pro odlehlé objekty, po obnovení výkupu elektrické energie z OZE jistě najde uplatnění i ve více centralizovaných oblastech.

Zvyšování účinnosti malých spalovacích zařízení

V rámci zvyšování účinnosti malých spalovacích zařízení v oblasti snižování emisí a tím zkvalitňování spalovacího procesu se domnívám, že by prostor pro další zkoumání měl být věnován především zplyňovacím zdrojům, které mají velmi nízké emise už jen díky dvojitému procesu spalování.

Krbové vložky mají všeobecně vysoký dynamický provozní tlak (při měření 15 – 25 Pa, oproti automatickým kamnům 12 Pa), čímž dochází k velkým ztrátám citelným teplem. Na trhu jsou různé druhy teplovzdušných výměníků, mezi zajímavé patří tzv. turbo elektrický výměník, který je vybaven el. ventilátorem. Instalací tohoto zařízení lze předpokládat že dojde k velkému snížení ztrát citelným teplem a tím k zvýšení výkonu krbové vložky. Také by bylo vhodné změřit vliv automatické komínové klapky na dynamický tlak ve spalinové cestě a následně na vliv emisních koncentrací znečišťujících látek.

Spalinová cesta při využití výměníku poskytuje poměrně velký teplotní rozdíl, lze teoreticky předpokládat, že by zde mohly mít uplatnění termočlánky pro výrobu alespoň malého množství elektrické energie, jejíž zásoba by následně mohla pokrýt výpadek v el. síti.

Ekologické hodnocení paliv

Problematika spalování tuhých paliv je poměrně náročná a obsáhlá. Vyhodnocení naměřených hodnot probíhá u jednotlivých typů spalovacích zařízení s odlišným přístupem, pro kotle se přepočítává na referenční obsah kyslíku na 10 % u kamen na 13 %, legislativa vyžaduje vyjádření k suchým spalinám v hmotnostním poměru, technické normy k objemovému množství. A to jde o podmínky v ČR, event. EU. Z enviromentálního hlediska jsou navíc brána organická biopaliva jako paliva s nulovými emisemi CO₂.

Z hlediska spalování tuhých paliv však dochází k emisím nedokonalého spalovacího procesu, kdy vznikají emise CO, NO_x a PM atd. Při hledání alternativního paliva za fosilní paliva se jeho náhrada a následná intepretace naměřených hodnot napříč vědeckou obcí zdá být poměrně krkolomná, výsledkem vědeckých bádání bývá většinou závěr, že spalování dané alternativy splňuje legislativní podmínky v daném typu zařízení. Jsem toho názoru, že by bylo

vhodné najít shodnou metodiku na interpretaci naměřených výsledků. Je jasné, že pro různé typy spalovacích zařízení budou hodnoty rozdílné a to i dle výkonu, ale i přesto díky jednotnému posuzování by byl jasně popsatečný vývoj v tomto oboru.

Jako názorný příklad uvádím hodnoty v tab. 5.14. kde by mohla interpretace naměřených hodnot, přibližně v okolí jmenovitého výkonu, být převedena na měrnou jednotku přebytku spalovacího vzduchu CO_n . Kde by součinitel přebytku spalovacího vzduchu mohl představovat jakousi konstantu spalovacího zařízení a započítávat i dynamické vlivy na spalovací proces viz vztah 2.7. Zkrátka výsledná hodnota CO_n by byla podílem přepočtených hmotnostních koncentrací suchých spalín a součinitele přebytku spalovacího vzduchu. Potom bychom mohli vyvodit závěr, že např. brikety z kůry – Vzorek B4, klesnul pod hodnotu $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, typickou pro roštová topeniště a tím je palivo výrazně ekologické.

Toto uvádím jako příklad, z takto malého počtu měření, nelze vyvodit závěry. Nejdříve by bylo nutné stanovit postupy, kritéria, metody měření a po té sestavit databázi naměřených hodnot a tu analyzovat. Vhodnější vyjádření emisní koncentrace CO by bylo např. na základě hmotnosti paliva.

Tab. 5.14: Ukázka návrhu jednotného environmentálního hodnocení

		Vzorek B2	Vzorek B4	Vzorek K2	HTC2	Pelety P4
CO	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3*}$	672,9	560,8	1 487,8	1 855,9	117,5
n	(-)	3,1	3,8	6,1	9,0	3,4
CO_n	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3*}$	213,9	146,9	243,9	206,2	34,6

**suchý plyn k referenčnímu obsahu kyslíku 13 % a normálním podmínkám*

6 Závěry a využití poznatků pro praxi

Předkládaná disertační práce přispívá k rozšíření znalostí v oblasti spalování organických odpadů v malých spalovacích zařízeních.

Nejdůležitější poznatky zjištěné v disertační práci lze shrnout následovně:

Paliva pro roštové topeniště vyráběná z organických odpadů

Na trhu v ČR je řada paliv vyráběných z organických odpadů, za nejrozšířenější lze považovat brikety. V rámci disertační práce byly spalovány komerční vzorky briket z odpadních dřevních pilin (B1), odpadní fytomasy (B2), vypraných katrových odpadů (B3) a vyprané stromové kůry (B4). Prvkovým složením si vzorky odpovídaly, obsah vody v palivu byl stanoven u vzorků B1 – B3 v intervalu od 7,0 – 8,4 %, vzorek B4 obsahoval 15,2 %. Nejvyšších naměřených koncentrací CO bylo u vzorku B1 s hodnotou $3\,226,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 203,2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, což bylo způsobeno rychlým hořením vzorku. Nejlepšího výsledku emisních koncentrací CO dosáhl vzorek B4 s hodnotou $560,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 98,9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, naopak tento vzorek má nejvyšší hodnotu emisních koncentrací NO_x z posuzovaných komerčních biopaliv s hodnotou $1\,193,6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 141,7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. I co se týče průběhu hoření, bylo by však vhodné se zaměřit na snížení emisních koncentrací NO_x, např. pomocí 4% aditiva rašeliny do paliva dle Pommer et al. (2009) a Fagerström et al. (2010), kteří tento postup aplikovali na paliva z lesních odpadů. Emisní koncentrace NO_x byly nejnižší u vzorku B2 s hodnotou $328,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 27,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jelikož jsou splněny legislativní požadavky, lze tato paliva doporučit k využití na zařízeních s roštovým topeništěm.

Kompost jako materiál pro výrobu paliva pro roštové topeniště

Nevyužitý odpad z kompostáren představuje zajímavý zdroj materiálu pro výrobu tuhých paliv. Jde zejména o zbytky z nadsítného nerozloženého odpadu, který je tvořen dřevními a bylinnými zbytky. V rámci disertační práce byl spalován vzorek briket z kompostu. Při přípravě vzorku byl hlavní problém s obsahem vody, zejména před lisováním, kdy byl obsah vody ve výši až 29,4 %, proto bylo nutné dodatečné vysoušení vzorku. Při spalování byl potom obsah vody v briketě okolo 12 %. Tento materiál je poměrně hodně hygroskopický a s delší dobou skladování by obsah vody v palivu pravděpodobně vzrostl. Při optimálním provozu spalovacího zařízení byly naměřeny emisní koncentrace CO s hodnotou $1\,487,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 418,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a NO_x s hodnotou $330,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 26,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Spalné teplo této brikety je $19,01 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, což je optimální hodnota, kterou bohužel kazí výše

uvedené negativní hygrokopické vlastnosti, což by mohlo tento odpad předurčovat jako vhodný k torrefakaci, viz kapitola 2.4.3. Po vyhoření prchavé hořlaviny, zůstala briketa v celku, nedošlo tak k jejímu úplnému rozpadu, tudíž by bez použití krbového nářadí nedošlo k vyhoření celé brikety. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést tvarovou úpravu brikety, např. s dírou uvnitř, opakovat měření a zhodnotit vliv této změny na emisní koncentrace. Jelikož jsou splněny legislativní požadavky, lze toto palivo doporučit k využití na zařízeních s roštovým topeništěm.

HTC čistírenský kal jako materiál pro výrobu paliva pro roštové topeniště

Dalším vzorkem, který byl spalován v rámci disertační práce, byl vzorek HTC čistírenského kalu. Spalování kalů je ve spalovacích zařízeních legislativou zakázáno. Při úpravě pomocí HTC měl vzorek však velmi nízký obsah vody v palivu, pouze 3,4 %. Jeho technické složení se od běžných paliv z organických materiálů liší, protože obsahuje větší množství popelovin a nižší obsah kyslíku. Jeho proces hoření byl podobný hnědému uhlí, jen měl větší délku plamene. Při spalování na roštovém topeništi byly naměřeny emisních koncentrace CO s hodnotou $1\,493,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 237,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a NO_x s hodnotou $544,8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 20,2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Spalné teplo tohoto vzorku je nízké $12,61 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Čistírenský kal by svým charakterem a obsahem odpadních látek vyhovoval spíše jako alternativní palivo do elektráren nebo tepláren, které jsou vybaveny složitějšími technologiemi pro čištění spalin. Technologie HTC je poměrně již známá technologie využívána od počátku minulého století pro zpracování materiálů s velkým obsahem vody. Reakce po rozběhu procesu je exotermická. Tuto metodu využil například Poerschmann et al. (2014) pro zpracování biokalu z pivovarského mláta, kdy výsledný produkt dosáhl spalného tepla $22,3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Využitím HTC pro zpracování odpadního kalu v palírně se zabýval Heilmann et al. (2011), kteří zpracováním vzorku pomocí HTC zvýšili obsah C ve vzorku až na 54,3 % a spalné teplo $29,7 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. HTC se zdá být zajímavým řešením pro konverzi vlhkých odpadních materiálů.

Pelety vyráběné z organických odpadů

V automatických kamnech byl spalován vzorek odpadních katrových pilin s certifikací ENplus A1. Naměřená hodnota emisních koncentrací CO byla $117,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 14,4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a emisních koncentrací NO_x $110,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 2,9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hodnoty emisních koncentrací CO a NO_x jsou nižší než u kusových paliv. Což potvrzuje výzkum Picchi, Silvestri a Cristoforetti (2013) a Wei et al. (2016) v nejnovější studii upozorňuje, že by využíváním pelet oproti

kusovým palivům ve venkovských oblastech Číny došlo k úspoře až 23,4 mil. tun CO za rok. Ve studii také popisuje vliv obsahu vody v palivu na emisní koncentrace CO, kdy dochází s přibývajícím obsahem vody k zvyšování emisní koncentrace CO ve spalinách.

Krbová kamna s roštem a automatická spalovací zařízení

Automatická kamna jsou novinkou v oblasti vytápění v porovnání s roštovým topeništěm. Nejnižších emisních koncentrací ve spalinách bylo dosaženo při spalování pelet na 4. výkon spalovacího zařízení, CO $117,5 \text{ mg.m}^{-3} \pm 14,4 \text{ mg.m}^{-3}$ a emisních koncentrací NO_x $110,3 \text{ mg.m}^{-3} \pm 2,9 \text{ mg.m}^{-3}$. Účinnost spalovacího zařízení potom byla $80,8 \pm 2,7 \%$. U krbové vložky měl nejnižší hodnoty CO vzorek briket z kůry $560,8 \text{ mg.m}^{-3} \pm 98,9 \text{ mg.m}^{-3}$, pro NO_x byly emisní koncentrace nejnižší u vzorku fytomasy s hodnotou $328,3 \text{ mg.m}^{-3} \pm 27,5 \text{ mg.m}^{-3}$. Nejvyšší účinnost spalovacího zařízení potom byla naměřena při spalování vzorku brikety z odpadní fytomasy s hodnotou $67,4 \pm 3,1 \%$.

Vliv na emise NO_x má převážně obsah N v palivu, tudíž pro hodnocení je vhodnější vycházet z hodnot CO a účinnosti zařízení. Podle výše uvedených hodnot lze říci, že automatická kamna mají cca 5x ekologičtější a o 13 % ekonomičtější provoz. Vzhledem k tomu, že automatická kamna nenahradí spalovací zařízení pro kusové dřevo, bylo by vhodné se věnovat výzkumu v této oblasti zejména zplyňovacím spalovacím zařízením.

Spalovací zařízení a zvyšování účinnosti

Pro zkoumání zvýšení účinnosti bylo v rámci disertační práce využito teplovzdušného výměníku, který zvýšil účinnost spalovacího zařízení cca od 5 – 10 %, díky snížení komínové ztráty. Instalací deflektoru spalin do krbové vložky se zabýval Škaroupka (2008), díky čemuž došlo k zvýšení účinnosti spalovacího zařízení o cca 11 %.

V dalším pokusu bylo využito ohřevu spalovacího vzduchu, kdy došlo k navýšení výkonu spalovacího zařízení o cca 2 %, jako negativní důsledek bylo zvýšení emisních koncentrací CO o cca 3,5 %, což odpovídá i výzkumu Weber, Smart, Kamp (2005), Zhen et al. (2016). Jsem toho názoru, že jakákoliv opatření pro zvýšení účinnosti nesmějí vést k zvýšeným koncentracím CO nebo NO_x a zároveň musí být ekonomická, proto se domnívám, že toto není správný směr pro vývoj automatických a roštových topenišť, nicméně by tato opatření vč. recirkulace spalin mohla zvýšit obsah CO při zplyňování v prvním stupni zplyňovacího zařízení.

Využití poznatků pro praxi:

- Pro dosažení nejnižších emisních koncentrací je nutné provozovat spalovací zařízení při jmenovitém výkonu, za optimálního přebytku spalovacího vzduchu a nezanedbat revizi spalinových cest.
- Spalování briket z organických odpadů je vhodné provádět v menším hmotnostním toku, než je předepsáno množství fosilního paliva od výrobce spalovacího zařízení.
- Jako vhodná náhrada, z dostupných paliv na trhu za kusové dřevo, se jeví briketa z kůry, nicméně pro snížení vysokého obsahu NO_x by bylo vhodné provést pokus s využitím 4% aditivem rašeliny.
- Velmi zajímavým zdrojem suroviny pro výrobu briket by mohly být odpadní produkty organického původu z provozu kompostárny. Pro lepší hoření by bylo vhodné optimalizovat tvar brikety, event. snížit její hygroskopické vlastnosti např. pomocí torrefakace.
- Metoda HTC představuje zajímavou konverzi vlhkých materiálů na tuhé materiály. Bylo by vhodné se zaměřit na využití této metody pro zpracování např. pivovarského kalu, pro počáteční studie lze využít katedrový minipivovar.
- Nákladné prvkové analýzy lze pro experimentální vyhodnocení naměřených hodnot nahradit výpočtem dle nových korelačních závislostí viz vztah 2.3 – 2.6. Je však nutné provést technickou analýzu vzorku pro zjištění poměru obsahu vody, prchavé a neprchavé hořlaviny a obsah popelu.
- K dalším oblastem výzkumu lze doporučit zplyňovací technologie se zaměřením na malé výkony, včetně jejich kombinace s kogenerační jednotkou. Dále tekuté odpadní hořlavé materiály pro interiérové spalování. Provést investice ve školní laboratoři do měřicího zařízení pro měření prachových částic, dle kap. 2.6.1.2, případně vybavit měřicí úsek spalinové cesty měřením rychlosti spalin.
- Pokračovat v hledání dostupných lokální organických odpadů jako náhradu za drahé kvalitní suroviny pro výrobu biopaliv a spojit výrobu paliv s projekty v komunitním režimu, díky kterému by stoupl zájem o paliva tohoto charakteru.

7 Seznam použité literatury

Acharya, B., Sule, I., Dutta, A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. In: *Biomass Conversion and Biorefinery*, Volume 2, Issue 4 (2012) published by Elsevier Ltd., pp. 349-369, doi:10.1007/s13399-012-0058-y.

Akční plán pro biomasu v ČR na období 2012 - 2020, ministerstvo zemědělství, č.j. 923/12, ze dne 29.8.2012.

Anca-Couce, A., Obernberger, I. Application of a detailed biomass pyrolysis kinetic scheme to hardwood and softwood torrefaction. In: *Fuel*, Volume 167 (2016) published by Elsevier Ltd., pp. 158-167, ISSN: 0016-2361.

Bäfver, L., Boman, C. Rönnbäck, M. Reduction of particle emissions by using additives. *Proc. Central European Biomass Conference*, 26–29 January 2011, Graz, Austria (2011).

Bauer, R., Gölles, M., Brunner, T., Dourdoumas, N., Obernberger, I. Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes. In: *Biomass and Bioenergy*, Volume 34 (2010) published by Elsevier Ltd., pp. 417-427, ISSN: 0961-9534.

Beckstead, M. W., Puduppakkam, K., Thakre, P., Yang, V. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients. In: *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 33 (2007) Published by Elsevier Ltd., pp. 497-551, ISSN: 0360-1285.

Bertazzi PA, Consonni D., Bachetti S., Rubagotti M., Baccarelli A., Zocchetti C., et al. Health effects of dioxin exposure: a 20-year mortality study. *American Journal of Epidemiology* 2001;153:1031–44.

Boman, C., Boström, D., Öhman, M. Effect of fuel additive sorbents (kaolin and calcite) on aerosol particle emission and characteristics during combustion of pelletized woody biomass. *Proc. 16th European Biomass Conference and Exhibition*, 2–6 June 2008, Valencia, Spain (2008).

Boubel R., Fox W., Turener DL, Stern DB. *Fundamentals of air pollution*. 3rd edition USA: Academic Press; 1994.

Carroll, J.P., Finnan, J.M., Biedermann, F., Brunner, T., Obernberger, I. Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications. In: *Fuel*, Volume 155 (2015) published by Elsevier Ltd., pp. 37-43, ISSN: 0016-2361.

Carroll, J.P., Finnan, J.M., Biedermann, F., Brunner, T., Obernberger, I. Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications. In: *Fuel*, Volume 155 (2015) published by Elsevier Ltd., pp. 37-43, ISSN: 0016-2361.

Carroll, J.P., Finnan, J.M., The use of additives and fuel blending to reduce emissions from the combustion of agricultural fuels in small scale boilers. In: Biosystems Engineering, Volume 129 (2015) published by Elsevier Ltd., pp. 127-133, ISSN: 1537-5110.

Coronado, Ch.R., Yoshioka, J.T., Silveira, J.L. Electricity, hot water and cold water production from biomass. Energetic and economical analysis of the compact system of cogeneration run with woodgas from a small downdraft gasifier. In: Renewable Energy, Volume 36, Issue 6 (2011) published by Elsevier Ltd., pp. 1 861 -1 868, ISSN: 0960-1481.

Černý, D., Malat'ák, J., Bradna, J. Influence of biofuel moisture content on combustion and emission characteristics of stove. In: Agronomy Research, Volume 14, Issue 3 (2016) published by Elsevier Ltd., pp. 725 – 732, ISSN: 1406894X.

ČSN 44 1310: Tuhá paliva - Označování analytických ukazatelů a vzorce přepočtů výsledků na různé stavy paliva (vydána 1.2001).

ČSN EN 12 815: Varné spotřebiče pro domácnost na pevná paliva - Požadavky a zkušební metody (vydána 3.2002).

ČSN EN 13 229: Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva - Požadavky a zkušební metody (vydána 3.2002).

ČSN EN 13 240: Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů - Požadavky a zkušební metody (vydána 3.2002).

ČSN EN 14 918: Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti (vydána 6.2010).

ČSN EN 15 357: Tuhá alternativní paliva - Terminologie, definice a popis (vydána 9.2011).

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 (vydána 1.2013).

ČSN EN ISO 16 948: Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu celkového uhlíku, vodíku a dusíku (vydána 1.2016).

ČSN EN ISO 17 225-1: Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky (vydána 1.2015).

ČSN EN ISO 18 123: Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu prchavé hořlaviny (vydána 6.2016).

ČSN EN ISO 18 134-3: Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 3: Obsah vody v analytickém vzorku pro obecný rozbor (vydána 2.2016).

Dare, P., Gifford, J., Hooper, R.J., Clemens, A.H., Damiano, L.F., Gong, D., Matheson, T.W. Combustion performance of biomass residue and purpose grown species. In: Biomass and Bioenergy, Volume 21 (2001) published by Elsevier Ltd., pp. 277-287, ISSN: 0961-9534.

Fagerström, J., Nyström, I., Boström, D., Öhman, Boman, M.C. Reduction of fine particle- and deposit forming alkali by co-combustion of peat with wheat straw and forest residues Proc. Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment. 29 August–03 September 2010, Saariselkä, Finland (2010).

Flesch-Janys D., Berger J., Gum P., Manz A., Nagel S., Waltsgott H., et al. Exposure to polychlorinated dioxins and furans (PCDD/F) and mortality in a cohort of workers from a herbicide-producing plant in Hamburg. Federal Republic of Germany. American Journal of Epidemiology 1995;142:1165–75.

Gil, M.V., Casacal, D., Pevida, C., Pis, J.J., Rubiera, F. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. In: Bioresource Technology, Volume 101 (2010) published by Elsevier Ltd., pp. 5601-5608, ISSN: 0960-8524.

González, F.O.C., Mahkamov, K., Lora E.E.S., Andrade, R.V., Jaen, R.L. Prediction by mathematical modeling of the behavior of an internal combustion engine to be fed with gas from biomass, in comparison to the same engine fueled with gasoline or methane. In: Renewable Energy, Volume 60, (2013) published by Elsevier Ltd., pp. 427 - 432, ISSN: 0960-1481.

Hájek, D. Spalovací charakteristiky vybraných spalovacích zařízení na tuhé organické vedlejší produkty s ohledem na využití koncových produktů. Praha, 2015. Disertační práce. Česká Zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, katedra technologických zařízení staveb.

Harrison RM, Yin J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? The Science of the Total Environment 2000;249:85–101.

Heilmann, S.M., Jader, L.R., Sadowsky, M.J., Schendel, F.J., von Keitz, M.G., Valentas, K.J. Hydrothermal carbonization of distiller's grains. In: Biomass and Bioenergy, Volume 35, Issue 7 (2011) published by Elsevier Ltd., pp. 2 526 – 2 533, ISSN: 0961-9534.

Horák J., Kubesa P., Dvořák J., Hopan F., Krpec K., Mikulová Z., Kysučan Z., Jak si doma změřit účinnost spalovacího zařízení a lze účinnost nějak zvětšit? In: tzb-info [online] 2012,

[cit. 2013-04-02] Dostupné na www: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9434-jak-si-doma-zmerit-ucinnost-spalovaciho-zarizeni-a-lze-ucinnost-nejak-zvetsit>

Horák, J., Martiník, L., Krpec, K., Kubesa, P., Dvořák, J., Hopan F. Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě. Tzb-info [online]. 2013-03-18 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <<http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>>. ISSN 1801-4399.

Horák, J., Úvod do teorie spalování tuhých paliv, prezentace Výzkumné energetické centrum, Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava.

Chen, WH., Peng, J., Bi, XT. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 44, (2015) published by Elsevier Ltd., pp. 847-866, ISSN: 13640321.

Jevič, P., Šedivá, Z. Analýza možností a návrh strategie pro rozšíření a komerční využití moderních biopaliv s ohledem na emise skleníkových plynů a nepřímé změny vy využívání půdy. 2013, Powerprint, Praha VÚZT, Smluvní výzkumná zpráva č. 513-2013-17253-VÚZT/493/2013.

Jiríček, I., Rudasová, P., Žemlová, T. A thermogravimetric study of the behaviour of biomass blends during combustion. In: Acta Polytechnica, Volume 52 (2012) published by Elsevier Ltd., pp. 39-42, ISSN: 1210-2709.

Johansson, L.S., et al. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. In: Atmospheric Environment 38 (2004) Published by Elsevier Ltd., pp. 4183–4195, ISSN: 1352-2310.

Kába, B., 2005. Statistika. Praha, ČZU, ISBN 80-213-0746-3.

Kába, B., 2007. Statistické metody I. Praha, ČZU, ISBN 978-80-213-1672-0.

Kogevinas M.. Human health effects of dioxins: cancer, reproductive and endocrine system effects. Human Reproduction Update 2001;7:331–9.

Krpec, K., Horák, J., Hopan F. Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. Tzb-info [online]. 2012-01-16 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <<http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>>. ISSN 1801-4399.

Leskens, M., Kessel van L.B.M, Bosgra, O.H. Model predictive control as a tool for improving the process operation of MSW combustion plants. In: Waste Management, Volume 25 (2005) published by Elsevier Ltd., pp. 788-798, ISSN: 0956-053X.

Lyčka, Z. DŘEVNÍ PELETA II spalování v malých zdrojích tepla. 2011, LING, Krnov, pp. 72, ISBN 978-80-904914-1-0.

Malá spalovací zařízení na pevná paliva pro domácnosti, Výsledky statistických zjišťování za léta 2010–2013, MPO 2015.

Malaťák, J., Bradna, J., Kučera, M., Černý, D., Passian, L. Analysis of selected wood biofuels and evaluation of their thermal emission properties. Conference Proceeding - 5th International Conference, TAE 2013: Trends in Agricultural Engineering 2013, 2013, Pages 402-408

Malaťák, J., Jevič, P., Vaculík, P. Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3.

Malaťák, J., Vaculík, P. Biomasa pro výrobu energie. 2008, Powerprint, Praha, pp. 206, ISBN 978-80-213-1810-6.

Manuál Casper 301.

Manuál Madur GA60.

MANUALE-STUFE-A-PELLET 2015-INGLESE. Návod kamna Calor Eva Matilde.

Matoušek, P. Podmínky pro spalování paliv vyrobených z odpadů z pohledu platné legislativy. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

McHenry, M.P. Technical, mitigation, and financial comparisons of 6 kWe grid-connected and stand-alone wood gasifiers, versus mineral diesel and biodiesel generation for rural distributed generation. In: Energy, Volume 40, (2012) published by Elsevier Ltd., pp. 428 - 437, ISSN: 0360-5442.

McNamee, P., Darvell, L.I., Jones, J.M., Williams A. The combustion characteristics of high-heating-rate chars from untreated and torrefied biomass fuels. In: Biomass and Bioenergy, Volume 82 (2015) published by Elsevier Ltd., pp. 63-72, ISSN: 0961-9534.

Munir, S., Daood, S.S., Nimmo, W., Cunliffe, A.M., Gibbs, B.M. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. In: *Bioresource Technology*, Volume 100 (2009) published by Elsevier Ltd., pp. 1413-1418, ISSN: 0960-8524.

Národní akční plán České Republiky pro energii z obnovitelných zdrojů, Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015.

Návod kamna Rousek, Krbová vložka.

Nešetřilová, H., 2005. *Matematické metody pro statistiku a operační výzkum*. Praha, ČZU, ISBN 80-213-0757-9.

Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B. Torrefaction of Poplar in a Continuous Two-Stage, Indirectly Heated Rotary Torrefier. In: *Energy and Fuels*, Volume 30, Issue 2 (2016) published by Elsevier Ltd., pp. 1 027-1 038, ISSN: 08870624.

Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. In: *Renew Energy Biofuels*, Volume 2014 (2014) published by Elsevier Ltd., pp. 1-56, Article ID 506376, DOI: 10.5171/2014.506376.

Nhuchhen, D.R., Salam P.A. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. In: *Fuel*, Volume 99 (2012) published by Elsevier Ltd., pp. 55-63, ISSN: 0016-2361.

Nhuchhen, D.R.: Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. In: *Fuel*, Volume 180 (2016) published by Elsevier Ltd., pp. 348-356, ISSN: 0016-2361.

Nussbaumer, T. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. In: *Energy Fuels*, 2003, 17 (6), pp 1510–1521, DOI: 10.1021/ef030031q.

Obroučka, K., 2001. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. VŠB TU Ostrava, Ostrava, 143 s., ISBN: 80-248-0009-8.

Otero, M., Sanchez, M.E., Gómez, X. Co-firing of coal and manure biomass: A TG–MS approach. In: *Bioresource Technology*, Volume 102 (2011) published by Elsevier Ltd., pp. 8304-8309, ISSN: 0960-8524.

Peters A., Wichmann H., Tuch T., Heinrich J., Heyder J. Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 1997;155:1376–83.

Picchi, G., Silvestri, S., Cristoforetti, A.: Vineyard residues as a fuel for domestic boilers in Trento Province (Italy): Comparison to wood chips and means of polluting emissions control. In: Fuel, Volume 113 (2013) published by Elsevier Ltd., pp. 43-49, ISSN: 0016-2361.

Plán odpadového hospodářství ČR (POH ČR) pro období 2015 – 2024. Schváleno 22. 12. 2014 vládou ČR.

Poerschmann, J., Weiner, B. Wedwitschka, H., Baskyr, I., Koehler, R., Kopinke, F.D. Characterization of biocoals and dissolved organic matter phases obtained upon hydrothermal carbonization of brewer's spent grain. In: Bioresource Technology, Volume 164 (2014) published by Elsevier Ltd., pp. 162-169, ISSN: 0960-8524.

Pommer, L., Öhman, M., Boström, D., Burvall, J., Backman, R., Olofsson, I., Nordin, A. Mechanisms behind the positive effects on bed agglomeration and deposit formation combusting forest residue with peat additives in fluidized beds. In: Energy and Fuels, Volume 23, Issue 9 (2009) published by Elsevier Ltd., pp. 4 245 – 4 253, ISSN: 08870624.

Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association 2002;287: 1132–41.

Remy C., Boulestreau M., Warneke J., Jossa P., Kabbe C., Lesjean B. Evaluating new processes and concepts for energy and resource recovery from municipal wastewater with life cycle assessment. In: Energy Conversion and Management, Water science and technology. Published March 2016, 73 (5) 1074-1080; DOI: 10.2166/wst.2015.569.

Samet JM, Dominici F., Curriero FC, Coursac I., Zeger SL. Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987–1994. The New England Journal of Medicine 2000;343:1742–9.

Shin, D., Choi, S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. In: Combustion and Flame, Volume 85 (2000) published by Elsevier Ltd., pp. 167-180, ISSN: 0010-2180.

Skanderová, K., Malat'ák, J., Bradna, J. Energy use of compost pellets for small combustion plants. In: Agronomy Research, Volume 13, Issue 2 (2015) published by Elsevier Ltd., pp. 413 – 419, ISSN: 1406894X.

Sodomka, W. Komínový tah – podstata, význam a měření. Tzb-info [online]. 2015-02-02 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <<http://vytapeni.tzb-info.cz/kominy-a-kourovody/12277-kominovy-tah-podstata-vyznam-a-mereni>>. ISSN 1801-4399.

Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., Ptasinski, K.J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. In: Biomass and Bioenergy, Volume 35, Issue 9 (2011) published by Elsevier Ltd., pp. 3 748-3 762, ISSN: 09619534.

Strzalka, R., Erhart, T.G., Eicker, U. Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion. In: Applied Thermal Engineering, Volume 50 (2013) published by Elsevier Ltd., pp. 1418-1426, ISSN: 1359-4311.

Stupavský, V. Dřevní pelety a jejich postavení na evropském trhu. Tzb-info [online]. 2016-04-28 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/peletky/14120-drevni-pelety-a-jejich-postaveni-na-evropskem-trhu>>. ISSN 1801-4399.

Stupavský, V. Kotel na pelety - peletový kotel pro ústřední vytápění. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kotel-na-pelety-peletovy-kotel-pro-ustredni-vytapeni>>. ISSN: 1801-2655.

Stupavský, V. Výroba „super-pelet“ metodou torrefakce. Tzb-info [online]. 2012-05-30 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/peletky/8655-vyroba-super-pelet-metodou-torrefakce>>. ISSN 1801-4399.

Stupavský, V. Zplynovací kotel na kusové dřevo, polena a dřevěné brikety. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovaci-kotel-na-kusove-drevo-polena-a-drevene-brikety>>. ISSN: 1801-2655.

Škaroupka, P. Krbová vložka pro vytápění. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

Technická směrnice č. 55 - 2010, kterou se stanovují požadavky a environmentální kritéria pro propůjčení ekoznačky " Topné pelety z bylinné fytomasy", Ministerstvo životního prostředí, ze dne 1.10.2010.

Technická směrnice č. 62 - 2011, kterou se stanovují požadavky a environmentální kritéria pro propůjčení ekoznačky " Kotle a interiérová topidla na spalování biomasy", Ministerstvo životního prostředí, ze dne 12.9.2011.

Toman, Z. Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2011-02-07 [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.

Tomášková V., Gadas P., Jak ovlivní nový zákon o ovzduší spalování odpadů? In: odpady-online [online] 2013, [cit. 2016-07-11] Dostupné na www: <http://odpady-online.cz/jak-ovlivni-novy-zakon-o-ovzdusi-spalovani-odpadu/>

Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Hess, J.R., Kenney, K.L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. In: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Volume 5, Issue 6 (2011) published by Elsevier Ltd., pp. 683-707, ISSN: 1932104X.

Van Krevelen, D.W. Graphical-statistical method for the study of structure and reaction process of coal. In: *Fuel*, Volume 29 (1950) published by Elsevier Ltd., pp. 269-284, ISSN: 0016-2361.

Van Loo S., Koppejan J., editors. *The handbook of biomass combustion and cofiring*. UK and USA: Earthscan; 2008.

Weber, R., Smart, J.P., Kamp, W.: On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air. In: *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 30, Issue 2 (2005) published by Elsevier Ltd., pp. 2 623-2 629, ISSN: 1540-7489.

Wei, W., Zhang, W., Hua, D., Oua, L., Tonga, Y., Shena, G., Shena, H., Wanga, X.: Emissions of carbon monoxide and carbon dioxide from uncompressed and pelletized biomass fuel burning in typical household stoves in China. In: *Atmospheric Environment*, Volume 56 (2016) published by Elsevier Ltd., pp. 136-142, ISSN: 1352-2310.

Wirth B., Herklotz L., Lüder U. Hydrothermal carbonization (HTC) of sewage sludge: Challenges and synergies for future wastewater treatment. In: *Conference paper. 2015 ACS Catalysis Lectureship Symposium*.

Zákon č. 185/2001 Sb., Zákon o odpadech. In: *Sbírka zákonů*. 1.1.2003. ISSN 1801-4399.

Zákon č. 201/2012 Sb., Zákon o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 2.5.2012. ISSN 1214-0473.

Zhen, H.S. , Miao, J. , Leung, C.W., Cheung, C.S., Huang, Z.H.: A study on the effects of air preheat on the combustion and heat transfer characteristics of Bunsen flames. In: *Fuel*, Volume 184 (2016) published by Elsevier Ltd., pp. 50-58, ISSN: 0016-2361.

Zhu, S., Lee, S.W. Co-combustion performance of poultry wastes and natural gas in the advanced Swirling Fluidized Bed Combustor (SFBC). In: *Waste Management*, Volume 25 (2005) published by Elsevier Ltd., pp. 511-518, ISSN: 0956-053X.

Příloha A

Tabulka 1: Stechiometrický rozbor pro brikety z kompostu

zkratka	vztah	název veličiny	jednotka	hodnota
objemové spalování				
O_{\min}	4.19	teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	$m^3_N.kg^{-1}$	0,88
L_{\min}	4.20	teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	$m^3_N.kg^{-1}$	4,21
V^s_{spmin}	4.22	teoretické objemové množství suchých spalin	$m^3_N.kg^{-1}$	4,12
CO_{2max}	4.31	teoretická objemová koncentrace CO_2 v suchých spal.		20,31
n		součinitel přebytku spalovacího vzduchu	-	1,00
L_{skut}	4.21	Skutečné množství vzduchu	$m^3_N.kg^{-1}$	4,21
V_{CO_2}	4.25	CO_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,84
V_{SO_2}	4.26	SO_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,00
V_{N_2}	4.28	N_2	$m^3_N.kg^{-1}$	3,28
V_{Ar}	4.30	A_r	$m^3_N.kg^{-1}$	0,04
V_{O_2}	4.29	O_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,00
V^s_{sp}	4.23	Objemové množství suchých spalin	$m^3_N.kg^{-1}$	4,16
V_{H_2O}	4.27	H_2O	$m^3_N.kg^{-1}$	0,74
V^v_{sp}	4.24	Objemové množství vlhkých spalin	$m^3_N.kg^{-1}$	4,90
objemová koncentrace složek plynů ve vlhkých spalinách				
	4.32	CO_2	%	17,12
	4.34	SO_2	%	0,00
	4.35	N_2	%	67,05
		A_r	%	0,79
	4.36	O_2	%	0,00
	4.33	H_2O	%	15,04
		Celkem	%	100,00
Pro naměřený součinitel přebytku spalovacího vzduchu - K1				
objemové spalování				
O_{\min}	4.19	teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	$m^3_N.kg^{-1}$	0,88
L_{\min}	4.20	teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	$m^3_N.kg^{-1}$	4,21
n		součinitel přebytku spalovacího vzduchu - K1	-	9,10
L_{skut}	4.21	Skutečné množství vzduchu	$m^3_N.kg^{-1}$	38,28
V_{CO_2}	4.25	CO_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,85
V_{SO_2}	4.26	SO_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,00
V_{N_2}	4.28	N_2	$m^3_N.kg^{-1}$	29,87
V_{Ar}	4.30	A_r	$m^3_N.kg^{-1}$	0,35
V_{O_2}	4.29	O_2	$m^3_N.kg^{-1}$	7,15
V^s_{sp}	4.23	Objemové množství suchých spalin	$m^3_N.kg^{-1}$	38,23
O_2		množství O_2 v suchých spalinách - porovnat s K1	%	18,72

Pokračování tabulky 1:

zkratka	vztah	název veličiny	jednotka	hodnota
objemové spalování				
CO ₂		množství CO ₂ v suchých spalínách	%	2,22
V _{H2O}	4.27	H ₂ O	m ³ _N .kg ⁻¹	1,13
V ^v _{sp}	4.24	Objemové množství vlhkých spalín	m ³ _N .kg ⁻¹	39,36
objemová koncentrace složek plynů ve vlhkých spalínách				
	4.32	CO ₂	%	2,16
	4.34	SO ₂	%	0,00
	4.35	N ₂	%	75,89
		A _r	%	0,89
	4.36	O ₂	%	18,18
	4.33	H ₂ O	%	2,88
		Celkem	%	100,00

Tabulka 2: Stechiometrický rozbor pro čistírenský kal

zkratka	vztah	název veličiny	jednotka	hodnota
objemové spalování				
O _{min}	4.19	teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	m ³ _N .kg ⁻¹	0,58
L _{min}	4.20	teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	m ³ _N .kg ⁻¹	2,78
v ^s _{spmin}	4.22	teoretické objemové množství suchých spalín	m ³ _N .kg ⁻¹	2,73
CO _{2max}	4.31	teoretická objemová koncentrace CO₂ v suchých spal.		20,58
n		součinitel přebytku spalovacího vzduchu	-	1,00
L _{skut}	4.21	Skutečné množství vzduchu	m ³ _N .kg ⁻¹	2,78
V _{CO2}	4.25	CO ₂	m ³ _N .kg ⁻¹	0,56
V _{SO2}	4.26	SO ₂	m ³ _N .kg ⁻¹	0,00
V _{N2}	4.28	N ₂	m ³ _N .kg ⁻¹	2,17
V _{Ar}	4.30	A _r	m ³ _N .kg ⁻¹	0,03
V _{O2}	4.29	O ₂	m ³ _N .kg ⁻¹	0,00
v ^s _{sp}	4.23	Objemové množství suchých spalín	m ³ _N .kg ⁻¹	2,75
V _{H2O}	4.27	H ₂ O	m ³ _N .kg ⁻¹	0,58
V ^v _{sp}	4.24	Objemové množství vlhkých spalín	m ³ _N .kg ⁻¹	3,34
objemová koncentrace složek plynů ve vlhkých spalínách				
	4.32	CO ₂	%	16,84
	4.34	SO ₂	%	0,00
	4.35	N ₂	%	64,88
		A _r	%	0,76
	4.36	O ₂	%	0,00
	4.33	H ₂ O	%	17,51
		Celkem	%	100,00

Pokračování tabulky 2:

zkratka	vztah	název veličiny	jednotka	hodnota
objemové spalování				
Pro naměřený součinitel přebytku spalovacího vzduchu - HTC1				
objemové spalování				
O_{\min}	4.19	teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	$m^3_N.kg^{-1}$	0,58
L_{\min}	4.20	teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	$m^3_N.kg^{-1}$	2,78
n		součinitel přebytku spalovacího vzduchu - HTC1	-	11,50
L_{skut}	4.21	Skutečné množství vzduchu	$m^3_N.kg^{-1}$	31,92
v_{CO_2}	4.25	CO_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,57
v_{SO_2}	4.26	SO_2	$m^3_N.kg^{-1}$	0,00
v_{N_2}	4.28	N_2	$m^3_N.kg^{-1}$	24,91
v_{Ar}	4.30	A_r	$m^3_N.kg^{-1}$	0,29
v_{O_2}	4.29	O_2	$m^3_N.kg^{-1}$	6,12
v_{sp}^s	4.23	Objemové množství suchých spalin	$m^3_N.kg^{-1}$	31,90
O_2		množství O_2 v suchých spalinách - porovnat s HTC1	%	19,19
CO_2		množství CO_2 v suchých spalinách	%	1,79
v_{H_2O}	4.27	H_2O	$m^3_N.kg^{-1}$	0,93
v_{sp}^v	4.24	Objemové množství vlhkých spalin	$m^3_N.kg^{-1}$	32,82
objemová koncentrace složek plynů ve vlhkých spalinách				
	4.32	CO_2	%	1,74
	4.34	SO_2	%	0,00
	4.35	N_2	%	75,90
		A_r	%	0,89
	4.36	O_2	%	18,65
	4.33	H_2O	%	2,82
		Celkem	%	100,00

Příloha B

Tabulka 1: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek B1

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
<i>Analyzátor spalin</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	317,0	28,0	16,9	1 574,0	32,0	166,0	198,0	3,6	5,2	3 120,5	52,0	2,9	45,1	5,2	3 638,5	751,7
120	315,0	28,0	16,9	1 517,0	32,0	168,0	200,0	3,6	5,2	3 000,0	48,5	2,8	48,8	5,2	3 498,0	757,4
180	313,0	28,0	16,9	1 433,0	32,0	167,0	199,0	3,7	5,2	2 819,9	49,1	2,6	48,3	5,2	3 288,0	749,9
240	312,0	28,0	16,9	1 370,0	31,0	167,0	198,0	3,7	5,2	2 689,3	49,4	2,5	48,1	5,2	3 135,7	744,3
300	311,0	28,0	17,0	1 329,0	31,0	167,0	198,0	3,6	5,2	2 641,4	48,9	2,4	48,6	5,2	3 079,9	753,6
360	310,0	28,0	16,9	1 291,0	30,0	167,0	197,0	3,6	5,2	2 553,1	49,4	2,4	48,3	5,2	2 976,9	746,1
420	307,0	28,0	17,1	1 268,0	29,0	166,0	195,0	3,5	5,4	2 591,4	48,3	2,4	49,3	5,4	3 021,6	763,2
480	305,0	29,0	17,1	1 241,0	28,0	167,0	195,0	3,5	5,4	2 536,2	48,9	2,4	48,8	5,4	2 957,2	763,2
540	302,0	29,0	17,1	1 269,0	27,0	168,0	195,0	3,5	5,5	2 627,2	48,8	2,4	48,8	5,5	3 063,3	773,1
600	300,0	29,0	17,1	1 283,0	27,0	169,0	196,0	3,5	5,5	2 670,1	48,9	2,5	48,6	5,5	3 113,4	781,1
660	298,0	29,0	17,2	1 278,0	26,0	168,0	194,0	3,4	5,6	2 716,6	48,3	2,5	49,2	5,6	3 167,6	789,7
720	296,0	29,0	17,2	1 317,0	26,0	170,0	196,0	3,4	5,6	2 777,2	49,0	2,6	48,4	5,6	3 238,2	791,5
780	292,0	29,0	17,3	1 347,0	25,0	171,0	196,0	3,3	5,8	2 941,9	48,1	2,7	49,2	5,8	3 430,3	819,8
840	291,0	29,0	17,3	1 369,0	24,0	172,0	196,0	3,3	5,8	3 006,5	48,0	2,8	49,2	5,8	3 505,6	824,3
900	277,0	29,0	17,4	1 242,0	20,0	163,0	183,0	3,2	6,0	2 813,1	49,3	2,6	48,1	6,0	3 280,0	793,7
	303,1	28,5	17,1	1 341,9	28,0	167,7	195,7	3,5	5,4	2 767,0	49,0	2,6	48,4	5,4	3 226,3	773,5

Tabulka 2: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek B2

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
<i>Analyzátor spalin</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	340,0	31,0	11,9	960,0	15,0	145,0	160,0	8,2	2,3	844,2	26,2	0,8	73,0	2,3	984,4	269,5
120	317,0	31,0	13,9	631,0	8,0	131,0	139,0	6,4	3,0	711,6	30,4	0,7	68,9	3,0	829,7	300,2
180	310,0	31,0	14,2	548,0	5,0	128,0	133,0	6,1	3,1	648,3	31,0	0,6	68,4	3,1	755,9	301,3
240	305,0	31,0	14,3	535,0	5,0	124,0	129,0	6,0	3,1	638,6	30,7	0,6	68,7	3,1	744,6	294,9
300	284,0	31,0	15,3	432,0	0,0	123,0	123,0	5,1	3,7	605,7	32,9	0,6	66,6	3,7	706,3	330,3
360	275,0	31,0	15,5	347,0	0,0	121,0	121,0	4,9	3,8	504,3	32,8	0,5	66,7	3,8	588,0	336,8
420	269,0	31,0	15,5	355,0	0,0	120,0	120,0	4,9	3,9	521,7	32,3	0,5	67,2	3,9	608,3	337,7
480	263,0	31,0	15,8	385,0	0,0	119,0	119,0	4,7	4,0	590,9	32,8	0,6	66,6	4,0	689,0	349,7
540	267,0	31,0	15,6	394,0	0,0	120,0	120,0	4,8	3,9	589,9	32,6	0,6	66,8	3,9	687,8	344,1
600	268,0	31,0	15,7	380,0	0,0	122,0	122,0	4,7	4,0	578,7	33,3	0,6	66,2	4,0	674,8	355,8

Pokračování tabulky 2:

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
660	367,0	31,0	11,9	544,0	26,0	163,0	189,0	8,2	2,3	477,4	28,4	0,5	71,1	2,3	556,6	317,6
720	409,0	31,0	10,8	701,0	46,0	165,0	211,0	9,2	2,1	547,4	28,8	0,5	70,6	2,1	638,3	315,6
780	418,0	31,0	11,8	511,0	41,0	159,0	200,0	8,2	2,3	445,4	32,6	0,4	67,0	2,3	519,4	333,9
840	417,0	32,0	13,0	443,0	34,0	153,0	187,0	7,2	2,6	440,8	36,5	0,4	63,1	2,6	514,0	356,3
900	411,0	32,0	13,8	459,0	28,0	151,0	179,0	6,5	2,9	511,1	39,8	0,5	59,7	2,9	595,9	381,7
	328,0	31,1	13,9	508,3	13,9	136,3	150,1	6,3	3,1	577,1	32,1	0,5	67,4	3,1	672,9	328,3

Tabulka 3: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek B3

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	374,0	34,0	16,1	232,0	7,0	139,0	146,0	4,4	4,3	381,9	51,3	0,4	48,3	4,3	445,3	460,2
120	373,0	34,0	16,3	250,0	6,0	140,0	146,0	4,2	4,5	424,7	52,7	0,4	46,9	4,5	495,2	474,9
180	372,0	34,0	16,3	261,0	6,0	143,0	149,0	4,2	4,5	446,2	52,9	0,4	46,7	4,5	520,3	487,8
240	369,0	34,0	16,4	253,0	6,0	142,0	148,0	4,1	4,6	445,0	53,8	0,4	45,8	4,6	518,9	498,5
300	365,0	34,0	16,7	291,0	3,0	142,0	145,0	3,8	4,9	543,1	56,2	0,5	43,2	4,9	633,2	518,2
360	358,0	34,0	16,9	347,0	1,0	142,0	143,0	3,7	5,1	677,8	57,5	0,6	41,9	5,1	790,3	534,9
420	350,0	34,0	17,2	432,0	0,0	142,0	142,0	3,4	5,6	918,3	60,8	0,9	38,4	5,6	1070,7	578,0
480	342,0	34,0	17,5	509,0	0,0	144,0	144,0	3,1	6,1	1186,7	64,7	1,1	34,2	6,1	1383,7	642,9
540	335,0	34,0	17,6	558,0	0,0	145,0	145,0	3,0	6,3	1328,2	64,5	1,3	34,2	6,3	1548,7	660,9
600	327,0	34,0	17,8	647,0	0,0	147,0	147,0	2,9	6,6	1622,6	66,0	1,5	32,5	6,6	1892,0	706,0
660	319,0	34,0	18,0	795,0	0,0	149,0	149,0	2,6	7,2	2164,5	69,5	2,0	28,5	7,2	2523,8	776,9
720	311,0	34,0	18,2	942,0	0,0	153,0	153,0	2,5	7,5	2674,6	70,3	2,5	27,2	7,5	3118,6	831,9
780	304,0	34,0	18,2	1060,0	0,0	157,0	157,0	2,5	7,7	3086,8	70,2	2,8	26,9	7,7	3599,2	875,5
840	298,0	34,0	18,3	1154,0	0,0	160,0	160,0	2,4	7,9	3462,0	70,7	3,2	26,1	7,9	4036,7	919,2
900	292,0	34,0	18,4	1204,0	0,0	162,0	162,0	2,3	8,2	3739,0	71,4	3,4	25,2	8,2	4359,7	963,4
	339,3	34,0	17,3	595,7	1,9	147,1	149,1	3,3	6,1	1 540,1	62,2	1,4	36,4	6,1	1 795,7	662,0

Tabulka 4: Přepočtené hodnoty pro vzorek B3

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	374,0	34,0	16,1	232,0	7,0	139,0	146,0	4,4	4,3	381,9	51,3	0,4	48,3	4,3	445,3	460,2
120	373,0	34,0	16,3	250,0	6,0	140,0	146,0	4,2	4,5	424,7	52,7	0,4	46,9	4,5	495,2	474,9
180	372,0	34,0	16,3	261,0	6,0	143,0	149,0	4,2	4,5	446,2	52,9	0,4	46,7	4,5	520,3	487,8
240	369,0	34,0	16,4	253,0	6,0	142,0	148,0	4,1	4,6	445,0	53,8	0,4	45,8	4,6	518,9	498,5
300	365,0	34,0	16,7	291,0	3,0	142,0	145,0	3,8	4,9	543,1	56,2	0,5	43,2	4,9	633,2	518,2
360	358,0	34,0	16,9	347,0	1,0	142,0	143,0	3,7	5,1	677,8	57,5	0,6	41,9	5,1	790,3	534,9
420	350,0	34,0	17,2	432,0	0,0	142,0	142,0	3,4	5,6	918,3	60,8	0,9	38,4	5,6	1070,7	578,0
480	342,0	34,0	17,5	509,0	0,0	144,0	144,0	3,1	6,1	1186,7	64,7	1,1	34,2	6,1	1383,7	642,9
540	335,0	34,0	17,6	558,0	0,0	145,0	145,0	3,0	6,3	1328,2	64,5	1,3	34,2	6,3	1548,7	660,9
600	327,0	34,0	17,8	647,0	0,0	147,0	147,0	2,9	6,6	1622,6	66,0	1,5	32,5	6,6	1892,0	706,0
	356,5	34,0	16,9	378,0	2,9	142,6	145,5	3,7	5,3	797,4	58,0	0,8	41,2	5,3	929,8	556,2

Tabulka 5: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek B4

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	477,0	35,0	11,7	694,0	19,0	556,0	575,0	8,4	2,3	594,5	36,6	0,6	62,8	2,3	693,2	943,3
120	467,0	35,0	12,0	588,0	16,0	558,0	574,0	8,1	2,3	521,1	36,9	0,5	62,6	2,3	607,6	974,2
180	460,0	35,0	12,2	515,0	13,0	554,0	567,0	8,0	2,4	465,3	36,9	0,4	62,6	2,4	542,5	980,9
240	436,0	35,0	12,9	485,0	8,0	538,0	546,0	7,2	2,6	480,8	37,9	0,5	61,7	2,6	560,6	1036,5
300	398,0	35,0	14,9	477,0	0,0	467,0	467,0	5,4	3,5	631,0	44,7	0,6	54,7	3,5	735,7	1183,0
360	376,0	35,0	15,4	432,0	0,0	438,0	438,0	5,0	3,8	623,3	45,5	0,6	53,9	3,8	726,8	1210,2
420	358,0	35,0	15,8	359,0	0,0	422,0	422,0	4,7	4,1	554,2	45,9	0,5	53,6	4,1	646,2	1247,5
480	339,0	35,0	16,1	302,0	0,0	410,0	410,0	4,4	4,3	491,0	45,4	0,5	54,2	4,3	572,5	1276,5
540	324,0	35,0	16,5	260,0	0,0	395,0	395,0	4,1	4,7	459,3	46,6	0,4	52,9	4,7	535,6	1336,4
600	310,0	35,0	16,7	245,0	0,0	383,0	383,0	3,9	4,9	454,0	46,4	0,4	53,1	4,9	529,4	1359,2
660	307,0	35,0	16,5	218,0	0,0	383,0	383,0	4,0	4,8	393,0	44,7	0,4	54,9	4,8	458,2	1322,2
720	297,0	35,0	17,0	204,0	0,0	367,0	367,0	3,6	5,3	406,5	47,4	0,4	52,2	5,3	473,9	1400,3
780	330,0	35,0	15,8	244,0	0,0	395,0	395,0	4,6	4,1	379,6	42,2	0,4	57,4	4,1	442,6	1176,8
840	335,0	35,0	15,8	245,0	0,0	408,0	408,0	4,6	4,1	379,7	42,8	0,4	56,9	4,1	442,7	1210,8
900	333,0	35,0	16,1	232,0	0,0	396,0	396,0	4,4	4,3	381,1	44,9	0,4	54,7	4,3	444,3	1245,6
	369,8	35,0	15,0	366,7	3,7	444,7	448,4	5,4	3,8	481,0	43,0	0,5	56,6	3,8	560,8	1 193,6

Tabulka 6: Naměřené a přepočtené hodnoty pro hnědé uhlí

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	281,0	36,0	17,0	579,0	0,0	415,0	415,0	3,6	5,3	1174,2	45,1	1,1	53,8	5,3	1368,0	1610,9
120	281,0	36,0	17,1	496,0	0,0	415,0	415,0	3,5	5,4	1018,9	45,6	1,0	53,4	5,4	1187,0	1631,7
180	280,0	36,0	17,2	485,0	0,0	409,0	409,0	3,4	5,6	1036,5	47,2	1,0	51,9	5,6	1207,5	1673,0
240	280,0	36,0	17,4	472,0	0,0	403,0	403,0	3,2	5,9	1054,0	49,2	1,0	49,8	5,9	1228,0	1722,5
300	279,0	36,0	17,4	470,0	0,0	403,0	403,0	3,2	6,0	1064,5	49,7	1,0	49,3	6,0	1240,2	1747,1
360	277,0	36,0	17,5	464,0	0,0	404,0	404,0	3,1	6,1	1072,3	50,2	1,0	48,8	6,1	1249,3	1787,0
420	277,0	36,0	17,6	480,0	0,0	398,0	398,0	3,0	6,3	1142,5	51,6	1,1	47,3	6,3	1331,0	1813,2
480	276,0	36,0	17,6	486,0	0,0	398,0	398,0	3,0	6,3	1163,8	51,7	1,1	47,2	6,3	1355,8	1824,1
540	275,0	36,0	17,6	496,0	0,0	401,0	401,0	3,0	6,3	1177,1	51,1	1,1	47,8	6,3	1371,3	1821,4
600	274,0	36,0	17,6	508,0	0,0	401,0	401,0	3,1	6,2	1202,0	50,7	1,1	48,2	6,2	1400,3	1816,0
660	274,0	36,0	17,6	510,0	0,0	402,0	402,0	3,0	6,3	1210,3	50,9	1,1	48,0	6,3	1410,0	1826,0
720	273,0	36,0	17,6	497,0	0,0	403,0	403,0	3,1	6,2	1175,9	50,5	1,1	48,4	6,2	1370,0	1825,1
780	273,0	36,0	17,7	521,0	0,0	402,0	402,0	3,0	6,4	1262,8	51,7	1,2	47,1	6,4	1471,1	1864,9
840	271,0	36,0	17,8	527,0	0,0	395,0	395,0	2,9	6,5	1309,3	52,5	1,2	46,3	6,5	1525,3	1878,3
900	267,0	36,0	17,9	590,0	0,0	388,0	388,0	2,8	6,9	1542,9	54,2	1,4	44,4	6,9	1797,5	1942,1
	275,9	36,0	17,5	505,4	0,0	381	402,5	3,1	6,1	1 173,8	50,1	1,1	48,8	6,1	1 367,5	1 785,5

Příloha C

Tabulka 1: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek K1

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu								
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
<i>Analyzátor spalín</i>							4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43
10	191,8	27,2	18,9	1 210,0	40,0	2,0	2,0	10,1	4 692,4	57,9	4,0	38,1	10,0	6 663,3	253,9
20	192,8	27,2	18,9	1 227,0	38,0	1,9	2,0	10,1	4 758,4	58,2	4,0	37,8	10,0	6 756,9	241,2
30	192,2	27,2	18,9	1 255,0	37,0	1,9	2,0	10,1	4 867,0	57,9	4,1	38,0	10,0	6 911,1	234,8
40	192,0	27,2	18,9	1 208,0	40,0	2,0	2,0	10,1	4 684,7	58,0	4,0	38,1	10,0	6 652,2	253,9
50	190,4	27,2	18,7	1 120,0	46,0	2,3	2,2	9,2	3 957,3	52,7	3,4	43,9	9,1	5 619,4	266,0
60	209,8	27,3	18,6	1 051,0	45,0	2,3	2,3	8,8	3 555,5	56,5	3,1	40,5	8,8	5 048,8	249,1
70	209,2	27,3	18,4	1 022,0	55,0	2,8	2,5	8,2	3 186,2	52,1	2,7	45,2	8,1	4 524,5	280,6
80	211,9	27,3	18,5	1 036,0	48,0	2,4	2,4	8,5	3 361,7	54,9	2,9	42,2	8,4	4 773,6	254,9
90	213,9	27,3	18,6	1 051,0	45,0	2,3	2,3	8,8	3 555,5	57,7	3,1	39,3	8,8	5 048,8	249,1
100	213,7	27,3	18,5	1 029,0	47,0	2,4	2,4	8,5	3 339,0	55,4	2,9	41,7	8,4	4 741,4	249,6
110	215,2	27,3	18,5	1 001,0	48,0	2,4	2,4	8,5	3 248,1	55,9	2,8	41,3	8,4	4 612,4	254,9
120	215,9	27,3	18,6	979,0	46,0	2,3	2,3	8,8	3 311,9	58,5	2,9	38,7	8,8	4 702,9	254,7
130	216,8	27,3	18,6	956,0	46,0	2,3	2,3	8,8	3 234,1	58,8	2,8	38,4	8,8	4 592,5	254,7
140	217,8	27,3	18,5	931,0	48,0	2,4	2,4	8,5	3 021,0	56,8	2,6	40,6	8,4	4 289,8	254,9
150	220,6	27,3	18,6	908,0	50,0	2,5	2,3	8,8	3 071,7	60,0	2,7	37,3	8,8	4 361,9	276,8
160	219,8	27,3	18,5	897,0	50,0	2,5	2,4	8,5	2 910,7	57,4	2,5	40,1	8,4	4 133,2	265,5
170	219,4	27,3	18,5	885,0	49,0	2,5	2,4	8,5	2 871,7	57,3	2,5	40,2	8,4	4 077,9	260,2
180	217,5	27,3	18,6	880,0	47,0	2,4	2,3	8,8	2 977,0	59,2	2,6	38,3	8,8	4 227,4	260,2
190	216,9	27,3	18,7	893,0	45,0	2,3	2,2	9,2	3 155,3	61,5	2,7	35,8	9,1	4 480,5	260,2
200	215,7	27,3	18,7	916,0	44,0	2,2	2,2	9,2	3 236,5	61,1	2,8	36,1	9,1	4 595,9	254,4
210	216,2	27,3	18,8	945,0	43,0	2,2	2,1	9,7	3 494,3	63,9	3,0	33,1	9,6	4 961,9	260,2
220	216,4	27,3	18,8	954,0	43,0	2,2	2,1	9,7	3 527,6	64,0	3,0	33,0	9,6	5 009,2	260,2
230	216,4	27,4	18,8	930,0	45,0	2,3	2,1	9,7	3 438,8	64,0	3,0	33,0	9,6	4 883,1	272,3
240	217,0	27,4	18,8	917,0	46,0	2,3	2,1	9,7	3 390,8	64,2	2,9	32,8	9,6	4 814,9	278,4
250	218,3	27,4	18,7	921,0	45,0	2,3	2,2	9,2	3 254,2	61,8	2,8	35,4	9,1	4 621,0	260,2
260	220,2	27,4	18,7	921,0	48,0	2,4	2,2	9,2	3 254,2	62,4	2,8	34,8	9,1	4 621,0	277,6
270	221,9	27,4	18,6	893,0	51,0	2,6	2,3	8,8	3 021,0	60,4	2,6	37,0	8,8	4 289,8	282,3
280	223,4	27,4	18,6	852,0	56,0	2,8	2,3	8,8	2 882,3	60,9	2,5	36,6	8,8	4 092,9	310,0
	212,3	27,3	18,7	992,4	46,1	2,3	2,2	9,1	3 473,5	58,9	3,0	38,1	9,0	4 932,4	261,8

Tabulka 2: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek K2

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu								
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalín</i>						4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43
10	242,2	27,8	18,0	412,0	81,0	4,1	2,9	7,0	1 110,3	53,5	1,0	45,5	7,0	1 576,6	357,2
20	247,4	27,8	17,9	353,0	88,0	4,4	3,0	6,8	920,1	52,9	0,8	46,3	6,7	1 306,6	375,4
30	250,9	27,8	17,8	329,0	92,0	4,6	3,1	6,6	830,3	51,9	0,7	47,3	6,5	1 179,1	380,0
40	253,7	27,8	17,6	320,0	101,0	5,1	3,2	6,2	759,4	49,2	0,7	50,1	6,1	1 078,4	392,2
50	258,0	27,8	17,5	290,0	98,0	4,9	3,3	6,0	668,3	48,6	0,6	50,8	6,0	948,9	369,6
60	259,6	27,8	17,5	282,0	98,0	4,9	3,3	6,0	649,8	48,9	0,6	50,6	6,0	922,8	369,6
70	261,3	27,8	17,5	302,0	94,0	4,7	3,3	6,0	695,9	49,1	0,6	50,2	6,0	988,2	354,5
80	260,5	27,8	17,5	332,0	89,0	4,5	3,3	6,0	765,0	49,0	0,7	50,4	6,0	1 086,4	335,6
90	261,9	27,8	17,6	373,0	84,0	4,2	3,2	6,2	885,2	50,7	0,8	48,5	6,1	1 257,0	326,2
100	262,2	27,8	17,6	396,0	82,0	4,1	3,2	6,2	939,8	50,7	0,8	48,5	6,1	1 334,5	318,5
110	265,9	27,8	17,6	406,0	84,0	4,2	3,2	6,2	963,5	51,4	0,9	47,8	6,1	1 368,2	326,2
120	268,0	27,8	17,5	423,0	83,0	4,2	3,3	6,0	974,7	50,1	0,9	49,0	6,0	1 384,1	313,0
130	269,3	27,8	17,4	412,0	89,0	4,5	3,4	5,9	922,6	48,9	0,8	50,3	5,8	1 310,2	326,2
140	271,4	27,8	17,3	396,0	93,0	4,7	3,5	5,7	862,5	47,8	0,8	51,4	5,6	1 224,8	331,5
150	271,9	27,8	17,3	393,0	93,0	4,7	3,5	5,7	856,0	47,9	0,8	51,4	5,6	1 215,5	331,5
160	274,3	27,8	17,3	404,0	90,0	4,5	3,5	5,7	879,9	48,2	0,8	51,0	5,6	1 249,5	320,8
170	275,4	27,8	17,3	414,0	90,0	4,5	3,5	5,7	901,7	48,4	0,8	50,8	5,6	1 280,5	320,8
180	274,1	27,8	17,3	443,0	90,0	4,5	3,5	5,7	964,9	48,2	0,9	51,0	5,6	1 370,1	320,8
190	273,7	27,8	17,3	513,0	82,0	4,1	3,5	5,7	1 117,4	48,0	1,0	51,0	5,6	1 586,6	292,3
200	273,2	27,8	17,4	539,0	80,0	4,0	3,4	5,9	1 207,1	49,3	1,1	49,6	5,8	1 714,0	293,2
210	274,3	27,8	17,4	561,0	82,0	4,1	3,4	5,9	1 256,3	49,5	1,1	49,4	5,8	1 784,0	300,5
220	276,2	27,8	17,4	550,0	88,0	4,4	3,4	5,9	1 231,7	49,8	1,1	49,1	5,8	1 749,0	322,5
230	274,7	27,8	17,4	545,0	89,0	4,5	3,4	5,9	1 220,5	49,6	1,1	49,3	5,8	1 733,1	326,2
240	272,7	27,8	17,4	572,0	86,0	4,3	3,4	5,9	1 281,0	49,2	1,1	49,7	5,8	1 819,0	315,2
250	270,5	27,9	17,6	599,0	83,0	4,2	3,2	6,2	1 421,5	51,9	1,3	46,9	6,1	2 018,5	322,3
260	268,7	27,9	17,7	628,0	77,0	3,9	3,2	6,4	1 536,2	53,2	1,4	45,5	6,3	2 181,4	308,2
270	266,7	27,9	17,9	653,0	72,0	3,6	3,0	6,8	1 702,1	56,4	1,5	42,1	6,7	2 417,0	307,1
280	263,7	27,9	18,0	673,0	69,0	3,5	2,9	7,0	1 813,7	57,7	1,6	40,7	7,0	2 575,4	304,3
	265,8	27,8	17,5	446,9	86,7	4,3	3,3	6,1	1 047,8	50,4	0,9	48,7	6,1	1 487,8	330,8

Tabulka 3: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek K3

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³	
	<i>Analyzátor spalín</i>						4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43	
10	231,8	28,7	18,5	917,0	55,0	2,8	2,4	8,5	2 975,6	60,3	2,6	37,1	8,4	4 225,3	292,1	
20	236,2	28,7	18,2	906,0	58,0	2,9	2,7	7,6	2 619,2	54,8	2,3	42,9	7,5	3 719,2	274,4	
30	240,6	28,7	18,0	909,0	59,0	3,0	2,9	7,0	2 449,7	52,1	2,1	45,8	7,0	3 478,5	260,2	
40	246,2	28,7	17,7	911,0	64,0	3,2	3,2	6,4	2 228,4	48,3	1,9	49,8	6,3	3 164,4	256,2	
50	256,3	28,7	17,2	780,0	85,0	4,3	3,6	5,5	1 653,6	43,5	1,5	55,1	5,5	2 348,1	294,9	
60	260,9	28,7	16,9	703,0	95,0	4,8	3,9	5,1	1 380,0	40,8	1,2	58,0	5,1	1 959,5	305,2	
70	270,5	28,7	16,6	654,0	105,0	5,3	4,2	4,8	1 195,2	39,1	1,1	59,9	4,7	1 697,2	314,0	
80	272,4	28,7	16,5	663,0	108,0	5,4	4,3	4,7	1 184,5	38,3	1,0	60,6	4,6	1 681,9	315,8	
90	274,5	28,7	16,5	669,0	108,0	5,4	4,3	4,7	1 195,2	38,6	1,1	60,4	4,6	1 697,2	315,8	
100	278,9	28,8	16,6	675,0	109,0	5,5	4,2	4,8	1 233,6	40,0	1,1	58,9	4,7	1 751,7	326,0	
110	279,9	28,8	16,5	751,0	108,0	5,4	4,3	4,7	1 341,7	39,1	1,2	59,7	4,6	1 905,2	315,8	
120	270,1	28,8	16,3	841,0	115,0	5,8	4,5	4,5	1 437,8	36,1	1,3	62,6	4,4	2 041,7	321,8	
130	280,1	28,8	16,3	901,0	114,0	5,7	4,5	4,5	1 540,4	37,2	1,4	61,5	4,4	2 187,4	319,0	
140	278,1	28,8	16,4	956,0	110,0	5,5	4,4	4,6	1 670,4	37,8	1,5	60,7	4,5	2 371,9	314,5	
150	281,7	28,8	16,8	1 030,0	98,0	4,9	4,0	5,0	1 973,1	42,2	1,7	56,1	5,0	2 801,8	307,2	
160	285,1	28,8	17,1	1 063,0	88,0	4,4	3,7	5,4	2 195,0	46,2	1,9	51,9	5,4	3 116,9	297,4	
170	286,8	28,8	17,0	1 043,0	95,0	4,8	3,8	5,3	2 099,2	45,1	1,8	53,0	5,2	2 980,9	312,9	
180	288,3	28,8	17,0	986,0	100,0	5,0	3,8	5,3	1 984,5	45,4	1,7	52,9	5,2	2 818,0	329,4	
190	289,5	28,8	17,0	961,0	100,0	5,0	3,8	5,3	1 934,2	45,6	1,7	52,7	5,2	2 746,5	329,4	
200	292,4	28,8	17,0	945,0	102,0	5,1	3,8	5,3	1 902,0	46,0	1,7	52,3	5,2	2 700,8	336,0	
210	295,4	28,8	16,9	904,0	107,0	5,4	3,9	5,1	1 774,5	45,2	1,6	53,3	5,1	2 519,8	343,7	
220	296,0	28,9	16,8	845,0	112,0	5,6	4,0	5,0	1 618,7	44,1	1,4	54,5	5,0	2 298,6	351,1	
230	297,1	28,9	16,7	820,0	116,0	5,8	4,1	4,9	1 533,9	43,1	1,4	55,6	4,8	2 178,1	355,1	
240	294,4	28,9	16,7	818,0	116,0	5,8	4,1	4,9	1 530,1	42,8	1,3	55,9	4,8	2 172,8	355,1	
250	292,2	28,9	16,9	844,0	108,0	5,4	3,9	5,1	1 656,7	44,8	1,5	53,7	5,1	2 352,6	346,9	
260	291,1	28,9	17,1	884,0	99,0	5,0	3,7	5,4	1 825,4	47,2	1,6	51,2	5,4	2 592,1	334,5	
270	289,8	28,9	17,3	923,0	93,0	4,7	3,5	5,7	2 010,4	49,7	1,8	48,5	5,6	2 854,7	331,5	
280	287,9	28,9	17,4	948,0	92,0	4,6	3,4	5,9	2 123,0	50,9	1,9	47,2	5,8	3 014,6	337,2	
	276,6	28,8	17,0	866,1	97,1	4,9	3,8	5,4	1 795,2	44,4	1,6	54,0	5,3	2 549,2	317,6	

Příloha D

Tabulka 1: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek HTC1

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu								
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x
<i>Analyzátor spalín</i>							4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43
10	207,3	29,5	18,2	375,0	106,0	5,3	2,7	7,6	1 084,1	44,8	0,9	54,3	7,5	1 561,1	508,1
20	209,0	29,6	18,3	389,0	100,0	5,0	2,6	7,9	1 167,0	46,8	0,9	52,2	7,8	1 680,5	497,4
30	209,5	29,6	18,4	416,0	94,0	4,7	2,5	8,2	1 296,9	48,7	1,1	50,2	8,1	1 867,6	485,9
40	209,4	29,6	18,5	439,0	89,0	4,5	2,4	8,6	1 424,5	50,6	1,2	48,2	8,4	2 051,3	478,8
50	208,4	29,6	18,7	459,0	82,0	4,1	2,2	9,3	1 621,8	54,7	1,3	43,9	9,2	2 335,4	480,4
60	207,9	29,7	18,8	489,0	77,0	3,9	2,1	9,7	1 808,2	57,0	1,5	41,6	9,6	2 603,8	472,1
70	207,0	29,7	18,9	496,0	72,0	3,6	2,0	10,2	1 923,5	59,4	1,5	39,0	10,1	2 769,9	462,9
80	205,1	29,7	19,0	506,0	68,0	3,4	1,9	10,7	2 062,9	61,7	1,7	36,6	10,6	2 970,6	459,6
90	203,1	29,7	19,1	531,0	63,0	3,2	1,8	11,3	2 281,9	64,2	1,8	34,0	11,1	3 285,9	448,9
100	201,2	29,7	19,2	573,0	56,0	2,8	1,7	12,0	2 603,1	66,9	2,1	31,1	11,8	3 748,4	421,8
110	196,6	29,8	19,4	632,0	45,0	2,3	1,5	13,5	3 241,5	72,9	2,6	24,5	13,3	4 667,8	382,7
120	194,2	29,8	19,5	671,0	41,0	2,1	1,4	14,4	3 678,9	76,4	2,9	20,7	14,2	5 297,7	372,7
130	192,4	29,8	19,5	714,0	39,0	2,0	1,4	14,4	3 914,7	75,4	3,1	21,6	14,2	5 637,2	354,5
140	190,9	29,8	19,5	769,0	38,0	1,9	1,4	14,4	4 216,2	74,4	3,3	22,3	14,2	6 071,4	345,4
150	189,7	29,8	19,6	809,0	30,0	1,5	1,3	15,5	4 764,1	78,8	3,7	17,5	15,3	6 860,3	292,9
160	188,2	29,8	19,7	847,0	28,0	1,4	1,2	16,8	5 386,9	83,7	4,2	12,2	16,5	7 757,2	295,3
	201,2	29,7	19,0	569,7	64,3	3,2	1,9	11,5	2 654,8	63,5	2,1	34,4	11,4	3 822,9	422,5

Tabulka 2: Přepočtené hodnoty pro vzorek HTC1

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu								
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x
<i>Analyzátor spalín</i>							4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43
10	207,3	29,5	18,2	375,0	106,0	5,3	2,7	7,6	1 084,1	44,8	0,9	54,3	7,5	1 561,1	508,1
20	209,0	29,6	18,3	389,0	100,0	5,0	2,6	7,9	1 167,0	46,8	0,9	52,2	7,8	1 680,5	497,4
30	209,5	29,6	18,4	416,0	94,0	4,7	2,5	8,2	1 296,9	48,7	1,1	50,2	8,1	1 867,6	485,9
40	209,4	29,6	18,5	439,0	89,0	4,5	2,4	8,6	1 424,5	50,6	1,2	48,2	8,4	2 051,3	478,8
50	208,4	29,6	18,7	459,0	82,0	4,1	2,2	9,3	1 621,8	54,7	1,3	43,9	9,2	2 335,4	480,4
60	207,9	29,7	18,8	489,0	77,0	3,9	2,1	9,7	1 808,2	57,0	1,5	41,6	9,6	2 603,8	472,1

Tabulka 3: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek HTC2

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu								
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43
10	228,8	29,9	17,9	311,0	132,0	6,6	3,0	6,9	810,6	44,9	0,7	54,5	6,8	1 167,3	570,5
20	231,9	30,0	17,9	323,0	131,0	6,6	3,0	6,9	841,9	45,4	0,7	53,9	6,8	1 212,4	566,1
30	233,3	30,0	18,0	337,0	128,0	6,4	2,9	7,1	908,2	47,3	0,7	52,0	7,0	1 307,8	571,9
40	232,0	30,0	18,0	349,0	124,0	6,2	2,9	7,1	940,5	47,0	0,8	52,2	7,0	1 354,4	554,1
50	229,5	30,0	18,1	361,0	118,0	5,9	2,8	7,4	1 007,0	48,1	0,8	51,1	7,2	1 450,1	545,7
60	226,8	30,0	18,2	347,0	111,0	5,6	2,7	7,6	1 003,1	49,3	0,8	49,9	7,5	1 444,5	532,0
70	224,9	30,0	18,5	342,0	101,0	5,1	2,4	8,6	1 109,8	54,8	0,9	44,3	8,4	1 598,0	543,4
80	223,3	30,0	18,6	342,0	93,0	4,7	2,3	8,9	1 157,0	56,7	0,9	42,3	8,8	1 666,0	521,6
90	221,7	30,0	18,8	347,0	87,0	4,4	2,1	9,7	1 283,1	61,5	1,0	37,5	9,6	1 847,7	533,4
100	220,0	30,0	18,8	354,0	83,0	4,2	2,1	9,7	1 309,0	61,0	1,1	38,0	9,6	1 884,9	508,9
110	218,2	30,0	18,9	363,0	80,0	4,0	2,0	10,2	1 407,7	63,3	1,1	35,5	10,1	2 027,1	514,4
120	216,7	30,0	19,0	372,0	78,0	3,9	1,9	10,7	1 516,6	66,0	1,2	32,8	10,6	2 183,9	527,2
130	215,4	30,0	19,1	379,0	74,0	3,7	1,8	11,3	1 628,7	69,0	1,3	29,6	11,1	2 345,3	527,2
140	215,7	30,0	19,1	391,0	70,0	3,5	1,8	11,3	1 680,2	69,1	1,4	29,5	11,1	2 419,6	498,7
150	216,7	30,0	19,1	450,0	67,0	3,4	1,8	11,3	1 933,8	69,2	1,6	29,2	11,1	2 784,6	477,4
160	216,9	30,0	19,1	485,0	69,0	3,5	1,8	11,3	2 084,2	69,2	1,7	29,1	11,1	3 001,2	491,6
	223,2	30,0	18,6	365,8	96,6	4,8	2,3	9,1	1 288,8	57,6	1,0	41,3	9,0	1 855,9	530,3

Tabulka 4: Přepočtené hodnoty pro vzorek HTC2

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu								
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.1	4.5	4.4	4.45	4.49	4.44	4.37	4.43	4.43
10	228,8	29,9	17,9	311,0	132,0	6,6	3,0	6,9	810,6	44,9	0,7	54,5	6,8	1 167,3	570,5
20	231,9	30,0	17,9	323,0	131,0	6,6	3,0	6,9	841,9	45,4	0,7	53,9	6,8	1 212,4	566,1
30	233,3	30,0	18,0	337,0	128,0	6,4	2,9	7,1	908,2	47,3	0,7	52,0	7,0	1 307,8	571,9
40	232,0	30,0	18,0	349,0	124,0	6,2	2,9	7,1	940,5	47,0	0,8	52,2	7,0	1 354,4	554,1
50	229,5	30,0	18,1	361,0	118,0	5,9	2,8	7,4	1 007,0	48,1	0,8	51,1	7,2	1 450,1	545,7
60	226,8	30,0	18,2	347,0	111,0	5,6	2,7	7,6	1 003,1	49,3	0,8	49,9	7,5	1 444,5	532,0
70	224,9	30,0	18,5	342,0	101,0	5,1	2,4	8,6	1 109,8	54,8	0,9	44,3	8,4	1 598,0	543,4
80	223,3	30,0	18,6	342,0	93,0	4,7	2,3	8,9	1 157,0	56,7	0,9	42,3	8,8	1 666,0	521,6
90	221,7	30,0	18,8	347,0	87,0	4,4	2,1	9,7	1 283,1	61,5	1,0	37,5	9,6	1 847,7	533,4
100	220,0	30,0	18,8	354,0	83,0	4,2	2,1	9,7	1 309,0	61,0	1,1	38,0	9,6	1 884,9	508,9

Příloha E

Tabulka 1: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P1

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalin</i>						4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	116,0	25,4	14,7	300,0	22,0	1,1	23,1	5,7	3,4	381,6	10,4	0,4	89,3	3,4	464,0	54,8
120	140,3	25,1	13,8	313,0	38,0	1,9	39,9	6,5	2,9	348,0	11,6	0,3	88,1	2,9	405,8	82,7
180	137,8	25,1	16,5	191,0	24,0	1,2	25,2	4,0	4,7	341,2	17,8	0,3	81,9	4,7	397,9	83,9
	131,4	25,2	15,0	268,0	28,0	1,4	29,4	5,4	3,7	356,9	13,2	0,3	86,4	3,7	422,6	73,8

Tabulka 2: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P2

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalin</i>						4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	188,0	21,3	15,0	272,0	41,0	2,1	43,1	5,4	3,5	363,4	20,0	0,3	79,7	3,5	441,9	107,2
120	191,3	21,4	13,3	259,0	59,0	3,0	62,0	6,9	2,7	269,2	16,1	0,3	83,7	2,7	327,3	120,0
180	193,2	21,5	15,4	238,0	45,0	2,3	47,3	5,0	3,8	340,9	21,9	0,3	77,7	3,8	414,6	126,2
	190,8	21,4	14,6	256,3	48,3	2,4	50,8	5,8	3,3	324,5	19,3	0,3	80,4	3,3	394,6	117,8

Tabulka 3: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P3

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalin</i>						4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	205,5	23,6	12,5	162,0	62,0	3,1	65,1	7,7	2,5	152,4	15,7	0,1	84,1	2,5	185,3	114,2
120	204,4	23,7	13,3	162,0	53,0	2,7	55,7	6,9	2,7	168,4	17,1	0,2	82,7	2,7	204,7	107,8
180	202,6	23,7	15,2	130,0	39,0	2,0	41,0	5,2	3,6	179,7	22,1	0,2	77,7	3,6	218,6	105,5
	204,2	23,7	13,7	151,3	51,3	2,6	53,9	6,6	3,0	166,8	18,3	0,2	81,5	3,0	202,9	109,2

Tabulka 4: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P4

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalin</i>						4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	178,8	23,4	15,9	72,0	37,0	1,9	38,9	4,6	4,1	113,3	21,7	0,1	78,2	4,1	137,8	114,0
120	189,4	23,4	13,1	86,0	54,0	2,7	56,7	7,1	2,7	87,1	15,3	0,1	84,6	2,7	105,9	107,0
180	191,8	23,5	15,0	67,0	42,0	2,1	44,1	5,4	3,5	89,5	20,1	0,1	79,8	3,5	108,9	109,8
	186,7	23,4	14,7	75,0	44,3	2,2	46,6	5,7	3,4	96,7	19,1	0,1	80,8	3,4	117,5	110,3

Tabulka 5: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P5

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalin</i>						4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	212,6	22,6	14,7	204,0	48,0	2,4	50,4	5,7	3,4	259,5	21,7	0,2	78,0	3,4	315,5	119,5
120	208,5	22,7	14,4	169,0	52,0	2,6	54,6	5,9	3,2	205,1	20,3	0,2	79,5	3,2	249,4	123,5
180	210,1	22,8	14,5	187,0	48,0	2,4	50,4	5,9	3,2	230,5	20,8	0,2	79,0	3,2	280,3	115,8
	210,4	22,7	14,5	186,7	49,3	381	51,8	5,8	3,3	231,7	20,9	0,2	78,8	3,3	281,7	119,6

Tabulka 6: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P1v1

čas s	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s °C	T _o °C	O ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %	λ -	CO ppm	q _A %	q _B %	η %	n -	CO mg.m ⁻³	NO _x mg.m ⁻³
	<i>Analyzátor spalin</i>						4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	70,8	25,6	15,1	137,0	34,0	1,7	35,7	5,3	3,6	186,2	5,5	0,2	94,3	3,6	226,4	90,4
120	72,0	25,7	13,5	235,0	46,0	2,3	48,3	6,8	2,8	250,8	4,5	0,2	95,3	2,8	304,9	96,1
180	72,1	25,7	14,1	248,0	40,0	2,0	42,0	6,2	3,1	287,8	4,9	0,3	94,9	3,1	350,0	90,9
	71,6	25,7	14,2	206,7	40,0	2,0	42,0	6,1	3,2	241,6	5,0	0,2	94,8	3,2	293,8	92,5

Tabulka 7: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P1v2

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	54,1	26,7	13,4	384,0	46,0	2,3	48,3	6,9	2,8	404,3	2,6	0,4	97,0	2,8	491,7	94,8
120	54,2	26,8	14,5	198,0	40,0	2,0	42,0	5,9	3,2	244,0	3,0	0,2	96,7	3,2	296,8	96,5
180	53,0	26,8	15,5	227,0	33,0	1,7	34,7	4,9	3,8	331,1	3,4	0,3	96,3	3,8	402,7	94,2
	53,8	26,8	14,5	269,7	39,7	2,0	41,7	5,9	3,3	326,5	3,0	0,3	96,7	3,3	397,0	95,2

Tabulka 8: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P3o

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	217,2	24,7	13,5	166,0	50,0	2,5	52,5	6,8	2,8	177,1	18,7	0,2	81,2	2,8	215,4	104,4
120	221,6	24,8	12,2	259,0	61,0	3,1	64,1	7,9	2,4	235,3	16,5	0,2	83,3	2,4	286,1	108,5
180	224,8	24,8	11,1	317,0	68,0	3,4	71,4	8,9	2,1	255,9	15,0	0,2	84,7	2,1	311,1	107,4
	221,2	24,8	12,3	247,3	59,7	3,0	62,7	7,9	2,4	222,8	16,7	0,2	83,1	2,4	270,9	106,8

Tabulka 9: Naměřené a přepočtené hodnoty pro vzorek P3ch

čas	Naměřené						Vypočtené dle vztahu									
	T _s	T _o	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	λ	CO	q _A	q _B	η	n	CO	NO _x
s	°C	°C	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	-	ppm	%	%	%	-	mg.m ⁻³	
<i>Analyzátor spalín</i>							4.2	4.1	4.5	4.4	4.6	4.8	4.9	4.10	4.3	4.3
60	217,9	23,5	16,5	345,0	29,0	1,5	30,5	4,0	4,7	616,3	30,6	0,6	68,8	4,7	749,5	101,4
120	219,2	23,6	13,9	217,0	56,0	2,8	58,8	6,4	3,0	244,7	20,0	0,2	79,8	3,0	297,6	123,6
180	219,8	23,6	13,5	149,0	56,0	2,8	58,8	6,8	2,8	159,0	19,0	0,2	80,8	2,8	193,3	117,0
	219,0	23,6	14,6	237,0	47,0	2,4	49,4	5,7	3,5	340,0	23,2	0,3	76,5	3,5	413,5	114,0