VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

AGROPELETY JAKO PALIVO
AGROPELLETS FOR COMBUSTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE **Michal Nejerál**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Michal Nejerál**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	**Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok:	2018/19

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

Agropelety jako palivo

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude stanovit základní palivové charakteristiky paliva z agropelet se a porovnání výsledků s publikovanými výsledky. Dále se věnovat podmínkám spalování agropelet s důrazem na tvorbu plynných emisí a emisí TZL.

Cíle bakalářské práce:

– provést rešerši vlastnotí agropelet jako paliva
– provést rešerši spalování agropelet se zaměřením na tvorbu emisí
– experimentálně stanovit vlastnosti vybraných paliv a ověřit tvorbu emisí na pilotní jednotce

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

JANDAČKA, J. a kol.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Agropelety se řadí mezi alternativní palivo, které se začíná využívat stále častěji. Proto se tato bakalářská práce zabývá využitím agropelet jako paliva. Zaměřuje se na tvorbu emisí při spalování. Jsou zde popsány vlastnosti znečišťujících látek, které se uvolňují při spalování a vlastnosti agropelet samotných. U vybraných paliv je experimentálně zjištěn podíl chemického složení prvků v hořlavině a výpočet jejich výhřevností. Dále je zjištěno základní prvkové složení spalin, které bylo naměřeno při spalování na pilotní jednotce.

Klíčová slova

Agropelety, biomasa, prchavá hořlavina, emise ze spalování

ABSTRACT

Agropellets are one of the alternative fuels which have been used very often nowadays. Therefore, this thesis deals with the use of agropellets as a fuel. It‘s focused on the generation of emissions during combustion. There are described properties of pollutants released during combustion and properties of agropellets. In a sample of selected fuels, the proportion of chemical composition of elements in the combustible and the calculation of their calorific value are experi-mentally determined. Furthermore, we found out the basic elemental composition of the flue gas, which was measured during combustion on the pilot unit.

Key words

Agropellets, biomass, volatile flammable substances, emission of combustion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEJERÁL, Michal. *Agropelety jako palivo* [online]. Brno, 2019, 56 s. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116894. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Agropelety jako palivo** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Michal Nejerál

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Martinovi Lisému, Ph.D. a Ing. Davidu Jechovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD 15
1 Biomasa 16
1.1 Zbytky z dřevařského průmyslu 16
1.2 Zbytky ze zemědělského průmyslu 16
1.2.1 Sláma obilnin a olejnin 16
1.2.2 Sláma řepky olejky 16
1.3 Cíleně pěstované byliny 17
1.3.1 Krmný šťovík 17
1.3.2 Triticale 17
1.3.3 Ozdobnice čínská 17
1.3.4 Lesknice rákosovitá 17
1.3.5 Křídlatka 17
2 Pelety 19
2.1 Druhy pelet 19
2.2 Výroba pelet 19
3 Vlastnosti pelet jako paliva 21
3.1 Voda 21
3.2 Popelovina 21
3.3 Hořlavina 21
3.4 Spalování 23
4 Specifické vlastnosti agropelet 24
4.1 Složení agropelet 24
4.2 Obsah popeloviny 25
4.3 Spékavost popele 25
5 Hořáky 28
5.1 Retorta 28
5.2 Rošt s pohyblivými roštnicemi 28
5.3 Hořák s otočnou komorou 29
6 Emise vznikající při spalování 30
6.1 CO 30
6.2 OGC 31
6.3 TZL 31
6.4 NO_x 31
6.5 Chlor 32
6.6 Síra 32
6.7 POPs 32

7 Vlastnosti měřených paliv 33
7.1 Vlhkost 33
7.2 Prchavá hořlavina 33
7.3 Spalné teplo 33
7.4 Složení hořlaviny 34
7.5 Výhřevnost 35
8 Měření TZL a PZL 37
8.1 Záznam měření prvního typu zapojení hořáku 39
8.2 Záznam měření druhého typu zapojení hořáku 43
9 ZÁVĚR 47
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 49
11 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 53
12 SEZNAM OBRÁZKŮ 55
13 SEZNAM TABULEK 56

ÚVOD

V dnešní době se ustupuje od využívání fosilních paliv, jelikož jejich zásoby nejsou nekonečné a pomalu, ale jistě docházejí. Při jejich spalování se navíc uvolňují jedovaté látky a látky způsobující skleníkový efekt. Tomu se snažíme vyvarovat, a proto se věnujeme hledání alternativních zdrojů paliv. Směřuje se tedy k co největšímu využívání obnovitelných zdrojů energie. Mezi obnovitelné zdroje patří například energie vody, větru, slunce a biomasy. Tyto zdroje nezatěžují životní prostředí a hlavně nezpůsobují skleníkový efekt, tudíž nemají vliv na globální oteplování. Právě zmíněná biomasa tvoří největší podíl na výrobě elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů. Její spalování je stejně efektivní jako spalování uhlí s tím rozdílem, že neprodukuje tolik jedovatých látek. Vyskytuje se zde ovšem problém s větším množstvím drobných tuhých částic, které jsou unášeny spalinami do ovzduší a zvýšenou tvorbou oxidů dusíku.

Pěstováním biomasy také přispíváme k udržení příjemného klimatu v dané oblasti. Zalesněné a zatravněné části půdy pomáhají udržet vodu v krajině a zabraňují erozi půdy. Zpracování biomasy za účelem spalování je lokální záležitostí. V oblasti, kde se pelety vyrábějí, se také spalují. Nedochází k transportu na velké vzdálenosti a díky tomu se vytvářejí další možnosti pro pracovní místa a pomáhá se tím k rozvoji venkova. Tímto způsobem lze zpracovat přebytky nebo jinak již nevyužitelné zbytky z výroby a suroviny, které nejsou vhodné pro potravinářský průmysl.

První část této práce se zaměřuje na popis vybraných druhů rostlin, ze kterých se agropelety vyrábějí a na charakteristiku agropelet samotných. Dále je zde popsán postup jejich výroby a druhy hořáků, ve kterých mohou být spalovány. S tím souvisejí také požadavky, které jsou kladeny na průběh spalování. Jedná se zejména o nežádoucí vlastnosti znečišťujících látek, které působí na průběh spalování.

Druhá část se věnuje experimentálnímu ověření těchto vlastností. U vybraných paliv je zjištěn jejich hrubý rozbor a podíl chemického složení prvků v hořlavině. Dále je zjištěna míra znečišťujících látek, které se vytvářejí při spalování a jsou obsaženy ve spalinách.

1 Biomasa

Biomasa představuje obecné označení pro substance biologického původu. Pro energetické využití nás zajímá především fytomasa, což je rostlinná biomasa. Rostlinný materiál je získáván reakcí oxidu uhličitého, vody a slunečního záření. Pomocí fotosyntézy se tyto prvky přemění na organickou hmotu, která tvoří tělo rostliny. Energie ze slunce se tedy uloží v rostlině a při jejím následném zpracování, například při spálení, se voda a oxid uhličitý opět uvolní. Jelikož se uvolní podobné množství CO_2, které se pohltilo při růstu, tak nedochází k jeho akumulaci v atmosféře. CO_2 je skleníkový plyn, tudíž je tato vlastnost velice ceněná. Z hlediska energetického využití se fytomasa dělí na [1][2]:

- zbytky z dřevařského průmyslu,
- zbytky ze zemědělského a potravinářského průmyslu,
- cíleně pěstované plodiny.

1.1 Zbytky z dřevařského průmyslu

Jedná se převážně o zbytky z dřevařského a nábytkářského průmyslu. Tudíž sem spadají piliny, hobliny, štěpka a kusové odřezky dřeva. [3]

1.2 Zbytky ze zemědělského průmyslu

Zbytky z rostlinné výroby se dříve využívaly jako stelivo či krmivo v živočišné výrobě. Během posledních desetiletí však došlo k restrukturalizaci zemědělství a poklesla živočišná výroba. Přebytečné suroviny lze využít pro energetické účely bez jakéhokoliv dopadu na živočišnou výrobu. [3]

1.2.1 Sláma obilnin a olejnin

Sláma se sklízí po sklizení zrna, při vlhkosti 15 až 20 %. Průměrná výtěžnost je 4 t/ha. Doporučuje se nechat slámu opět zmoknout a znovu vyschnout. Živiny a chlór zůstanou až z 90 % na poli a při spalování vznikne méně popele. Neupravená sláma je nehomogenní. Sypná hmotnost řezanky bez jakékoli úpravy je 50 až 80 kg/m^3. To je nevýhodné, jelikož v takovéto formě zabírá mnoho místa. Proto se sláma pro převoz a skladování lisuje do balíků pomocí balíkovacího stroje. Slámu je vhodné lisovat do velkých hranolových balíků s hustotou 160 až 220 kg/m^3. Oproti kulatým balíkům se lépe uskladňují a dále zpracovávají. Skladování slámy je nenáročné, stačí přirozené provětrávání. Pro energetické účely se sláma upravuje do formy pelet nebo briket, kde sypná hmotnost naroste na 600 až 700 kg/m^3. Obsah popeloviny činí 3 až 7 % hm. [3][4][5]

1.2.2 Sláma řepky olejky

I po desikování, kdy se zrno řepky olejky sklidí s obsahem vody kolem 8 % hm., sláma stále obsahuje kolem 25 % hm. vody. Proto nelze slámu ihned balíkovat. Je nutné ji nechat proschnout, aby nedocházelo k plesnivění. Průměrný výnos řepkové slámy činí 2,7 t/ha. Tuhé stonky slámy se dobře drtí na kladívkovém drtiči. Peleta se dá využít jako náhražka za dřevní pelety, protože se oproti jiným plodinám její popel nespéká. [4]

1.3 Cíleně pěstované byliny

Rostliny pěstované k energetickým účelům se dělí na jednoleté, víceleté a vytrvalé. Dnes se věnuje pozornost hlavně víceletým a vytrvalým bylinám. Díky tomu se snižují náklady na pěstování a odpadá každoroční zakládání nového porostu. Dále působí také jako protierozní ochrana. Hlavním kritériem, podle kterého se energetické byliny vybírají, je výnos nadzemní hmoty. Za efektivní se považují rostliny, které mají výnos deset a více tun suché hmoty z hektaru. Hlavní výhodou oproti dřevinám je levnější osivo a také jistá variabilita, tedy možnost kdykoli zaset odlišnou plodinu. [3][6]

1.3.1 Krmný šťovík

Odrůda vyšlechtěná na Ukrajině byla původně určená jako krmivo. Je nenáročný na půdní podmínky a v našich podmínkách ho lze pěstovat do 700 m. n. m., nicméně je potřeba vlastnit licenci. Bez licence se v České Republice pěstovat nesmí. První rok po zasetí se nesklízí. V dalších letech dorůstá do výšky 2 až 2,5 metru a na poli vydrží 8 až 10 let. Od druhého roku pěstování dosahuje výnos 8 až 10 t/ha. Pro přímé spalování se sklízí po dozrání a vyschnutí na konci července. [6][5]

1.3.2 Triticale

Jednoletá obilnina, která vznikla křížením pšenice a žita. Produkce nadzemní fytomasy je největší z úzkořádkových obilnin. Spalné teplo slámy se pohybuje od 16 do 19 MJ/kg. Popelovina tvoří přibližně 5,5 % hmotnosti. [7]

1.3.3 Ozdobnice čínská

Vytrvalá travina dorůstající až do výšky třech metrů. Plné produkční zralosti dosahuje po 3 až 4 letech. V prvním roce po výsadbě se nesklízí. V dalším roce se výtěžnost sušiny pohybuje do 10 t/ha a později může dojít k výtěžnosti až 20 t/ha. Nejčastěji se sklízí po zimě, protože je rostlina suchá a nemusí se tedy dosušovat. Zde však dochází ke ztrátě až 35 % nadzemní části vlivem opadání listů. Spalné teplo sušiny je 17,97 MJ/kg. [7]

1.3.4 Lesknice rákosovitá

Na našem území přirozeně se vyskytující vytrvalá tráva, která je náročná na vodu a živiny. Dorůstá do výšky přes dva metry. Při jarní sklizni se výnosy sušiny pohybují kolem 7,5 t/ha a při sklizni na konci vegetační sezóny 9 t/ha. Při letní sklizni se vlhkost pohybuje mezi 30 a 80 %, tudíž se musí dosušovat a vzrůstají tak náklady. Po zimě se obsah vlhkosti pohybuje pod 20 %, takže se může ihned peletovat a navíc je v plodině menší podíl dusíku, síry, chlóru a dalších prvků. [7]

1.3.5 Křídlatka

Křídlatka dorůstá do výšky třech metrů. Pochází z mírného pásma Asie, ale pro její nekontrolovatelné šíření je v Evropě považována za invazivní plevelný druh. Roste od nížin až po podhorské oblasti s dostatečnou zásobou vody a živin. Lze dosáhnout výnosu 12 až 27 t/ha. [8]

Tabulka 1 Energetické a růstové parametry různých druhů biomasy [3]

druh rostlinné biomasy	spalné teplo sušiny	výhřevnost (vlhkost 5 %)	průměrné výnosy sušiny	energetická produkce
	[MJ/kg]	[MJ/kg]	[t/ha]	[GJ/ha]
obilniny (sláma)	17,5	15,5	4,2	65,1
řepka olejka (sláma)	17,5	15,3	3,0	45,9
žito ozimé (celé)	17,6	15,3	11,0	168,3
triticale (celé)	17,5	15,5	12,0	186,0
čiroky (průměr)	17,7	15,3	*8,1	123,9
konopí seté	18,1	15,5	*7,9	122,5
psineček velký[1]	17,8	15,6	7,7	120,1
kostřava rákosovitá[1]	17,5	15,6	7,6	118,6
lesknice rákosovitá[1]	17,5	15,5	6,4	99,4
ozdobnice čínská[2]	18,1	16,8	*14,0	235,2
křídlatka česká[2]	17,6	15,3	*10,3	157,6
energetický šťovík[2]	18,0	15,3	9,0	132,2
topoly (obmýtí)	19,0	17,1	7,1	121,4
vrby (obmýtí)	19,7	17,0	6,9	117,3

Pozn. [1]výnosy biomasy ve druhém užitkovém roce; [2]průměr výnosů až devítiletého porostu; *průměrné výnosy při jarní sklizni

2 Pelety

Pelety se vyrábějí především z důvodu ušetření skladovacího místa. Například dřevní pelety se vyrábějí hlavně z pilin. Jedna tuna těchto pelet má v sypném stavu objem přibližně 1,6 m^3, zatímco na výrobu těchto pelet je zapotřebí 7 až 8 m^3 pilin. Další výhodu představuje snadnější manipulace a doprava. Pelety lze dopravovat zabalené na paletách nebo cisternou přímo k zákazníkovi. Nevýhodou je nutnost dodání energie do procesu výroby. Z kalkulace provozu bylo zjištěno, že na výrobu 1 kg pelet o výhřevnosti 4,8 kWh/kg včetně dopravy materiálu, sušení, samotné výroby a dopravy k zákazníkovi je zapotřebí dodat přibližně 0,9 kWh energie [9].

2.1 Druhy pelet

Dřevní pelety jsou vyrobeny ze zbytků dřevařského a nábytkářského průmyslu. Skládají se hlavně z hoblin a pilin. Dále je dělíme na [10]:

- bílá – vzniká z odkorněných zbytků, nejkvalitnější,
- hnědá – vzniká z neodkorněných zbytků, méně kvalitní.

Alternativní pelety jsou vyrobeny ze zbytkových materiálů, které by se jinak již nevyužily. Řadí se sem vše kromě dřeva. Dále je dělíme na [10]:

- agropelety – suché, drcené stébelniny a odpady z čističek obilovin,
- ostatní – lisované, obtížně využitelné materiály (drcený papír, uhelný prach).

2.2 Výroba pelet

Pokud je materiál ve formě balíku, tak se musí nejprve rozebrat. To se dělá za pomoci rozdružovadla. Frézovací válce rozeberou balík a materiál se pomocí šnekového dopravníku dopraví do drtiče. [3][5][11]

Nejpoužívanější je kladívkový drtič. Využívá se hlavně pro jeho jednoduchou konstrukci. Na rotační hřídeli jsou pomocí čepu umístěna kladívka a pod kladívky je síto s otvory o velikosti 3,5 mm. Jakmile je materiál rozdrcen na požadovanou velikost, tak sítem propadne. Materiál v drtiči by měl obsahovat 8 až 15 % hm. vody. Pokud je vlhčí, může u některých rostlin docházet ke špatnému drcení stébel a k ucpávání sít pod drtičem.

Následně se doporučuje drť ohřát párou nebo alespoň navlhčit, aby došlo ke změkčení povrchu. Materiál se poté lépe spojí do homogenní pelety a dochází k menšímu opotřebení matrice. Samotná peleta se vytváří za pomocí tepla a tlaku v peletovacím stroji. Používají se dva druhy peletovacích strojů [3][5][11]:

- deskové lisy – používají se především v malých a středních peletárnách. Základ tvoří horizontální kruhová matrice, po které se odvalují rolny a protlačují materiál skrz otvory v matrici,
- prstencové lisy – používají se ve velkých peletránách. Matrice ve tvaru prstence je v lisu uložena vertikálně a uvnitř se nachází rolny. Matrice se otáčí celá a rolny, které se otáčí díky tření, vtlačují materiál do otvorů v matrici. Pod matricí jsou umístěny nože, které odkrajují vzniklé pelety na požadovanou délku.

Během procesu se materiál zahřeje přibližně na 100 °C. Díky tomu se z něj uvolní lignin, který slouží jako přírodní lepidlo a surovinu spojí. V této fázi je ještě peleta křehká. Proto je potřeba ji schladit na teplotu do 40 °C. Tím se také dodatečně zredukuje obsah vody o 2 až 4 % hm. Než se peleta uskladní, prochází přes vibrační síto s oky do 3,5 mm, aby se od pelet oddělil odrol. Ten se vrací zpět na začátek a znovu se peletuje. Vzniklá peleta je váleček o průměru 6 až 20 mm a o délce 10 až 50 mm. Nejčastěji se lisují pelety o průměru 6 nebo 8 mm a délce od 10 do 30 mm. [3][5][11]

Tabulka 2 Požadavky vybraných pelet [12]

Vlastnosti	Jednotky	Pelety z obilné slámy	Pelety z chrastice rákosovité	Pelety z ozdobnice čínské
Průměr D	Mm	06 až 25 ± 1	06 až 25 ± 1	06 až 25 ± 1
Délka L	Mm	3,15 až 50	3,15 až 50	3,15 až 50
Voda	%	≤ 10	≤ 10	≤ 12
Popel	%	< 6	< 4	< 8
výhřevnost	MJ/kg	-	-	≥ 14,5
Sypná hmota	kg/m^3	≥ 600	≥ 580	≥ 550
Dusík	%	≤ 0,7	≤ 0,5	≤ 2,0
Síra	%	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,20
Chlor	%	≤ 0,10	≤ 0,08	≤ 0,10

3 Vlastnosti pelet jako paliva

Pro určení vlastností paliva je zapotřebí udělat jeho hrubý rozbor. Ten nám určí poměr mezi hořlavinou (h), popelovinou (A^r) a vodou (W^r) [13].

$$h + A^r + W^r = 100\ \% \qquad [\%] \qquad (1)$$

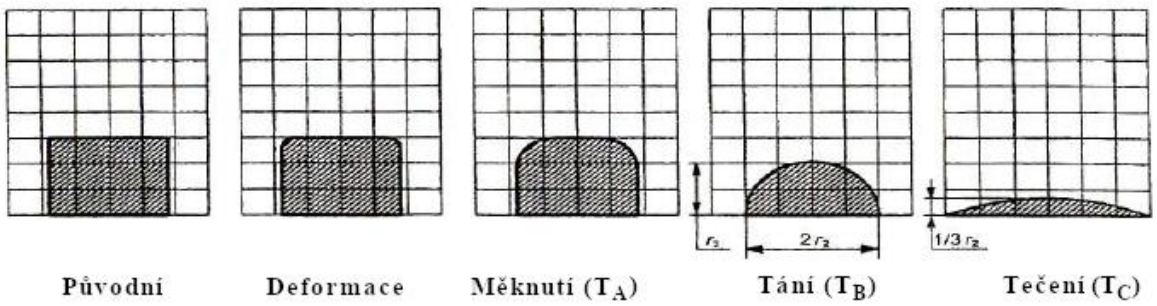
3.1 Voda

Voda se přirozeně v palivu vyskytuje. Naším záměrem je, aby palivo obsahovalo malý podíl vody, jelikož působí potíže. Při spalování se voda odpaří a odchází ve formě vodní páry. Tím se zvyšuje objem spalin. Zároveň pohltí část tepelné energie pro samotné odpaření vody a toto teplo odejde komínem pryč. Pokud se spaliny ochladí pod rosný bod, tak voda zkondenzuje a urychlí korozi kotle. [13]

3.2 Popelovina

Popel je tvořen nespalitelnými částicemi v palivu. Jsou to jak minerály obsažené v palivu (křemičitany, uhličitany), tak nečistoty, které se na palivu zachytí při těžbě (písek, hlína). Drobné částečky tvoří popílek, a ten je unášen spalinami. Při překročení charakteristických teplot dochází k tečení nebo tavení popele. Jednotlivá zrna popele se poté spojují do větších celků (škvára) nebo se roztaví a odtečou (struska). Proto je velmi důležité tyto teploty znát. Charakteristické teploty se liší podle druhu paliva. Zjišťují se pomocí Seegerovy metody (obrázek 1), kdy se do pece vloží váleček nebo jehlan ze slisovaného popele. Dané teploty se následně určují podle deformace tělíska.

Na charakteristických teplotách závisí volba velikosti a typu spalovací komory a způsob odvodu tuhých zbytků. Při dosažení teploty měknutí začne docházet k nalepování popele na teplonosné stěny a tím dojde ke zhoršení přestupu tepla ze spalin do ohřívaného média. Aby k tomu nedocházelo, musí být teplota spalin a popílku za ohništěm menší, než teplota měknutí. [13][14][15]



Obrázek 1 Seegerova metoda [15]

3.3 Hořlavina

Hořlavina je ta část paliva, která se spaluje a vzniká teplo. Dělí se na prchavou hořlavinu a na tuhý zbytek. Prchavá hořlavina, která se začíná uvolňovat již při nižších teplotách, je tvořena převážně uhlíkem, vodíkem, sírou, dusíkem a kyslíkem. Tuhý zbytek je tvořen zejména uhlíkem. [13][14]

Pro výpočty se používají tři základní stavy paliva [14]:

- stav bez vody a popeloviny (pouze hořlavina) – označeno *daf* (dry ashfree),
- suchý stav (hořlavina a popelovina) – označeno *d* (dry),
- původní stav (hořlavina, popelovina a voda) – označeno *r* (real).

Stav *daf* a *d* je vhodný převážně pro laboratorní účely nebo pro obecné stanovení složení paliva. Tyto hodnoty se totiž příliš nemění. Zatímco podíl vody se mění podle skladovacích podmínek. Proto se výpočty určené pro zjištění vlastností spalování pro konkrétní palivo určují podle původního stavu paliva *r*. Pro přepočítání laboratorně zjištěné hořlaviny na původní podmínky je poté nutné použít vzorec (příklad pro přepočet uhlíku) [14]:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) \qquad [-] \qquad (2)$$

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - A^r - W^r) \qquad [-] \qquad (3)$$

„Spalné teplo Q_S (kJ.kg^{-1}) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje tj. je v kapalné fázi“ [13]

Spalné teplo se určuje pomocí kalorimetru. Vzorek o hmotnosti 1 kg se umístí do kalorimetru a spálí se. Podle změny teploty vodní lázně kalorimetru se dopočítá spalné teplo [13]:

$$Q_S = \frac{V \cdot \Delta T}{G} \qquad [\text{kJ/kg}] \qquad (4)$$

Kde: V [kJ/kg] vodní hodnota kalorimetru
G [kg] hmotnost paliva

„Výhřevnost Q_i^r (kJ.kg^{-1}) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi.“ [13]

Výhřevnost se dopočítá podle spalného tepla [13]:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8{,}94 \cdot H_2) \qquad [\text{kJ/kg}] \qquad (5)$$

Kde: W^r [-] obsah vody v palivu
r [kJ/kg] výparné/kondenzační teplo vody; r = 2454 kJ/kg
H_2 [-] obsah vodíku v surovém palivu

Výhřevnost lze také spočítat z empirických vzorců jako funkci hrubého nebo prvkového rozboru. Pro geologicky mladší paliva, kam se řadí hlavně hnědé uhlí a lignin, by se dala teoreticky zařadit také biomasa. Pro tuto skupinu je doporučovaný Vondráčkův vzorec [14]:

$$Q_i^r = (37{,}14 - 2{,}58 \cdot C^{daf}) \cdot C^r + 90{,}88 \cdot H^r - 11{,}26 \cdot O^r + 10{,}47 \cdot S^r - 2{,}45 \cdot W^r \qquad [\text{MJ/kg}] \qquad (6)$$

Kde: C, H, O, S [-] obsah prvku v palivu
W^r [-] obsah vody v palivu

Do skupiny geologicky starších, silně prouhelněných paliv, patří antracit a černé uhlí. Výhřevnost pro tuto skupinu paliv se doporučuje přepočítávat přes Du Longův vzorec [14]:

$$Q_i^r = 33{,}91 \cdot C^r + 121{,}42 \cdot H^r - 15{,}18 \cdot O^r + 11{,}47 \cdot S^r - 2{,}45 \cdot W^r \quad \text{[MJ/kg]} \quad (7)$$

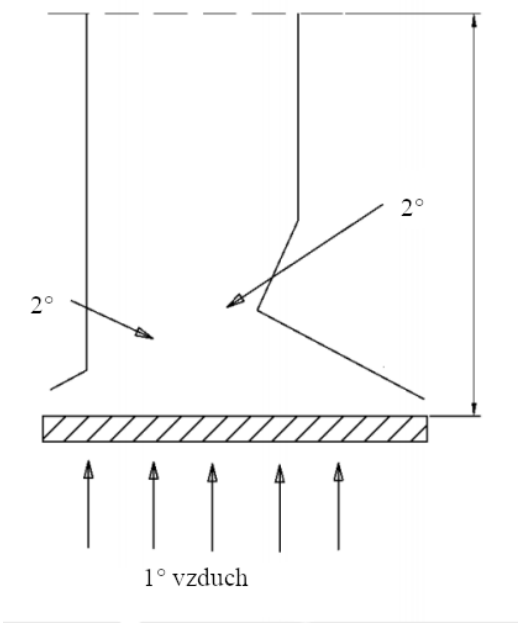
Z rozborů československých paliv byl vypracován statistický vzorec, který lze používat v celém rozmezí tuhých paliv od koksu po dřevo [14]:

$$Q_i^r = 34{,}75 \cdot C^r + 95{,}3 \cdot H^r - (O^r - S^r) - 2{,}5 \cdot W^r \quad \text{[MJ/kg]} \quad (8)$$

3.4 Spalování

Pro správné hoření je zapotřebí docílit správného poměru hořlaviny a okysličovadla. Nutný přívod okysličovadla (nejčastěji vzduchu) lze vypočítat ze stechiometrické rovnice spalování. Tato hodnota je však vypočítána pro ideální spalování. K tomu při spalování tuhých paliv nedochází, a proto je potřeba spalovat s přebytkem vzduchu. Při spalování biomasy v roštových kotlích je nutno přivádět vzduch do více částí kotle. Primární vzduch prochází přes rošt a pomáhá ke spálení tuhého uhlíku. Sekundární vzduch je následně dopravován do spalovací komory, kde se smísí s prchavou hořlavinou. Prchavá hořlavina je tvořena převážně uhlovodíky, které se z paliva začnou uvolňovat při teplotě 200 až 500 °C. Čím více prchavé hořlaviny se z paliva uvolňuje, tím je větší poměr mezi přívodem sekundárního a primárního vzduchu. Někdy se do spalovací komory umisťuje i terciální přívod vzduchu. Důležitá je teplota přiváděného vzduchu. Pokud by byla teplota příliš nízká, tak by ochlazovala plamen a docházelo by k nedokonalému spalování. [16]

Jelikož biomasa obecně obsahuje více prchavé hořlaviny než fosilní paliva, je potřeba přizpůsobit i spalovací komoru (obrázek 2). Ve spodní části se nachází rošt, kde dochází k uvolnění prchavé hořlaviny a dohoření tuhého zbytku pomocí primárního přívodu kyslíku skrz rošt. Poté se komora zužuje. Do zúžení je přiveden sekundární vzduch. Díky zúžení dojde k lepšímu promísení prchavé hořlaviny se vzduchem a následně k lepšímu vyhoření. [16]



Obrázek 2 Roštové ohniště se dvěma ohnisky hoření [16]

4 Specifické vlastnosti agropelet

Vlastnosti a složení dřeva lze vcelku dobře definovat. Jelikož se růst dřeva pohybuje v řádu desítek let, tak je jeho buněčná struktura již vyzrálá. Tím pádem, když porovnáme různé druhy dřevin, budou mít podobné vlastnosti. Pokud ovšem porovnáme různé druhy bylin a obilovin, tak se jejich vlastnosti budou lišit. Je to dáno tím, že se jejich růst pohybuje v řádu měsíců, maximálně roků. Jejich buněčná struktura ještě není vyzrálá, a proto se na prvkovém složení výrazně projevuje lokalita a způsob ošetřování při jejich růstu. Tyto odlišnosti ovlivňují celý proces spalování, a proto se každý druh agropelet chová při spalování trochu jinak. Je tedy zapotřebí upravit podmínky spalování pro konkrétní typ agropelety [9].

4.1 Složení agropelet

Jak již bylo výše zmíněno, různé plodiny obsahují odlišné prvkové složení. Tabulka 3 ukazuje prvkové složení vybraných druhů agropelet.

Tabulka 3 Typické hodnoty prvků v hořlavině pro vybrané plodiny [17]

Palivo	A	C	H	O	N	S	Cl
	%	%	%	%	%	%	%
dřevo z jehličnatých stromů	0,3	51	6,3	42	0,1	<0,02	0,01
dřevo z listnatých stromů	0,3	49	6,2	44	0,1	0,02	0,01
sláma z pšenice, žita, ječmene	5,0	47	6,0	41	0,5	0,10	0,40
sláma z řepky olejky	5,0	48	6,0	41	0,8	0,30	0,50
zrno z pšenice, žita, ječmene	2,0	45	6,5	44	2,0	0,16	0,11
zrno z řepky olejky	4,3	60	7,1	23	3,8	0,10	0,07
chrastice rákosovitá	6,5	46	5,7	40	1,3	0,10	0,50
tráva – obecně	7,0	46	5,9	40	1,3	0,20	0,70
ozdobnice čínská	4,0	47	6,1	42	0,7	0,20	0,20

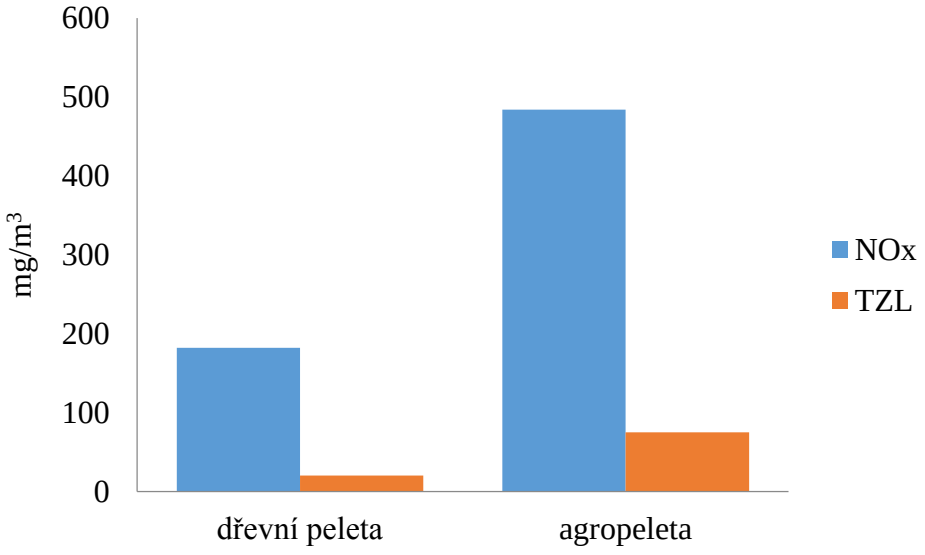
V tabulce 3 lze sledovat, že obsah uhlíku (C), vodíku (H) a kyslíku (O) je u všech biopaliv přibližně stejný. Rozdíl je až v obsahu dusíku (N), síry (S) a chloru (Cl). Alternativní pelety oproti dřevním peletám obsahují několikanásobně více těchto prvků. Při spalování lze tudíž očekávat vyšší koncentrace oxidů dusíku, síry a chlorovodíku ve spalinách. V případném kondenzátu ze spalin se budou vyskytovat korozivní nitráty, sulfáty, chloridy a organické kyseliny. Již při teplotách 400 °C se začíná vyskytovat chlorová koroze, která ničí výhřevné plochy. [9][13]

Koncentrace dusíku se váže na lokalitu, druh rostliny a způsob pěstování (hnojení). V průběhu růstu dochází k úbytku dusíku, tudíž obilniny obsahují více dusíku než dřevo. To je potřeba brát v potaz při navrhování kotle, protože spalováním alternativních pelet bude vznikat více NO_x než ze spalování dřeva. Toto srovnání je názorně zobrazeno na obrázku 3. Převážné množství NO_x vzniká z palivového dusíku, kterého biomasa obsahuje 0,5 až 2 %. Začínají se vytvářet při teplotách 700 až 900 °C. Jedná se především o směs oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO_2. Vznik NO_x a jejich rozdělení je blíže popsán v kapitole 6.4. [18][19][20]

4.2 Obsah popeloviny

Jak již bylo řečeno, popelovina je tvořena anorganickými a minerálními látkami. Velkou část popele tvoří křemičitany a uhličitany. Vybrané prvky jsou vypsány v tabulce 4, ve které můžeme porovnat složení vybraných prvků jednotlivých plodin. Pokud tyto hodnoty agronomických plodin porovnáme s hodnotami dřeva, tak zjistíme, že obsah těchto prvků je ve dřevě menší i o několik řádů. Obsah popele ve dřevních peletách se pohybuje od 0,1 do 2,5 %, zatímco obsah popele v agropeletách se pohybuje od 1 do 9 %. Některé zdroje uvádějí dokonce obsah až do 15 %. Proto se na větší množství popele z agropelet musí myslet již při konstrukci spalovacího zařízení a je zapotřebí správně nadimenzovat prostředky pro odvod popele do popelníku. [10][13][22]

Právě z důvodu vyššího množství minerálních látek, potažmo popeloviny ve stébelninách, je bereme jako technicky obtížnější palivo. Pokud popelovinu rozdělíme podle velikosti zrn, tak zjistíme, že popel ze stébelnin obsahuje oproti popelu ze dřeva větší množství částic drobného polétavého prachu. Drobný popílek je unášen proudem spalin, což způsobuje podstatně větší znečištění vlivem tuhých znečišťujících látek (TZL). Pomocí výzkumu bylo zjištěno, že v jemném popílku, který tvoří 2–10 % hm., je zastoupeno největší množství těžkých kovů [25]. Jelikož se při spalování agropelet na kotlech malých výkonů nepoužívají žádné filtry a odlučovače, tak je zapotřebí správně navrhnout spalovací komoru, aby se co nejvíce zamezilo tomuto úletu. Tím se sníží emise TZL, které jinak způsobují problémy při požadavku na splnění určitých emisních limitů, které jsou zadané státem. Porovnání výsledných emisí TZL z dřevních pelet a agropelet je znázorněno na obrázku 3.



Obrázek 3 Porovnání emisí NO_x a TZL [21]

4.3 Spékavost popele

Jakmile se prvky v popelovině dostanou do kontaktu s kyslíkem, tak zoxidují. Podle typu prvku se vytvářejí kyselé nebo zásadité oxidy. Pokud sečteme hlavní kyselé oxidy (A) a hlavní zásadité oxidy (B) a vzájemně je vydělíme, dostaneme tzv. index spékavosti (9). Ten určuje, jak moc se bude popelovina spékat. Čím více je tedy popelovina zásaditá, tím více

bude docházet ke spékání a struskování. Přijatelná míra spékavosti nastane, když je index spékavosti 1,5 nebo větší. [9]

$$\frac{A}{B} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O} \quad [-] \qquad (9)$$

Podíl hořčíku (Mg), sodíku (Na), fosforu (P) a draslíku (K) negativně ovlivňují vlastnosti popeloviny, jelikož snižují teplotu tavení popele [9]. Pokud budeme znát prvkové složení popeloviny, tak můžeme určit vlastnosti a chování daného popele při spalování. Vybrané prvky jsou znázorněny v tabulce 4.

Tabulka 4 Typické hodnoty prvků v popelovině pro vybrané plodiny [17]

Palivo	A	K	Mg	Na	P	Si
	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
dřevo z jehličnatých stromů	0,3	400	150	20	60	150
dřevo z listnatých stromů	0,3	800	200	50	100	150
sláma z pšenice, žita, ječmene	5,0	10000	700	500	1000	10000
sláma z řepky olejky	5,0	10000	700	500	1000	1000
zrno z pšenice, žita, ječmene	2,0	5000	1400	100	3400	50
zrno z řepky olejky	4,3	8400	2600	100	7300	-
chrastice rákosovitá	6,5	12000	1300	200	1700	12000
tráva – obecně	7,0	15000	1700	3000	15000	-
ozdobnice čínská	4,0	7 000	600	70	500	8000

Některé hodnoty obsahu prvků v popelovině agropelet (tabulka 4) se řádově liší oproti obsahu v dřevních peletách, a proto se liší také teploty měknutí popeloviny. U kritických stébelnin, kam řadíme například slámu obilovin a seno, by neměla teplota popele přesáhnout 800–900 °C [25]. Jakmile se překročí dovolená teplota, tak začne docházet ke spékání popele. Vytvořené aglomeráty poté blokují funkční část roštu a dojde k nerovnoměrnému přívodu spalovacího vzduchu. Tím pádem dojde ke zhoršení kvality spalování, vlivem čehož začne vznikat větší množství emisí [23]. Po překročení teploty tání popele začne docházet ke vzniku skelných a skelně krystalických nápeků, které se musejí mechanicky odstranit. Křemík v reakci s kyslíkem tvoří oxid křemičitý (SiO_2), který patří mezi významné sklotvorné prvky. Oxid draselný (K_2O) snižuje teplotu tavení a zároveň také snižuje viskozitu vzniklé taveniny, kvůli čemuž se nápeky hůře odstraňují. Oxid vápenatý (CaO) také snižuje viskozitu taveniny, ale zároveň zvyšuje teplotu tavitelnosti. Z výzkumu vyplývá, že pokud popelovina obsahuje více jak 40 % hm. SiO_2 a zároveň méně než 30 % hm. CaO, což je většina popelů ze slámy, tak se teplota tavitelnosti pohybuje mezi 720 až 1000 °C. Vzniklá skelná fáze vytváří pevné kusy, které se špatně odstraňují [24]. Aby se vzniku těchto aglomerátů nebo skelnatých napečenin zabránilo, tak je nutné znát přibližnou hodnotu teploty měknutí a tavení popele. Pro konkrétní zjištění těchto teplot je zapotřebí laboratorně ověřit tavitelnost popele podle Segeerovy metody (obrázek 1). Tabulka 5 znázorňuje zjištěné charakteristické teploty popele vybraných druhů plodin a jejich směsí.

Tabulka 5 Teploty tavitelnosti popelovin vybraných pelet z biomasy [18]

Palivo	Teplota měknutí	Teplota tání
	[°C]	[°C]
Dřevo	>1500	>1500
Šťovík	1255	1280
Vojtěška	1500	>1500
Šťovík + vojtěška 1:1	860	905
Obilní zbytky – žito	1120	1135
Odpad z čištění obilí	1080	1140
Šťovík + piliny 1:1	875	920
Seno	1080	1170

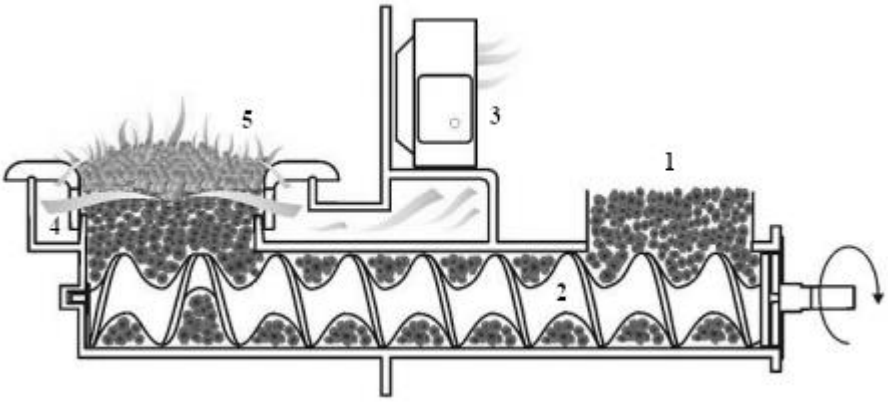
Z tabulky 5 je patrné, že u některých paliv je zapotřebí udržovat kotel na nižších teplotách, aby nedocházelo k měknutí popele a následnému zanášení kotle. Snížení teploty se docílí spalováním s větším přebytkem vzduchu nebo zavedením recirkulace spalin. Spalování s větším přebytkem vzduchu je snadné, ale zvyšuje se tím komínová ztráta. Recirkulace spalin je sice konstrukčně náročnější, ale sníží se tím ztráty a spalování je účinnější. [16]

5 Hořáky

Alternativní pelety lze spalovat pouze v hořácích k tomu určených. Kdybychom agropelety spalovali v hořáku na pelety ze dřeva, tak by již po pár hodinách provozu začalo docházet k zapékání hořáku. Docházelo by k nedokonalému spalování a časem by se mohl zapéct natolik, že by přestal hořet. [10][13]

5.1 Retorta

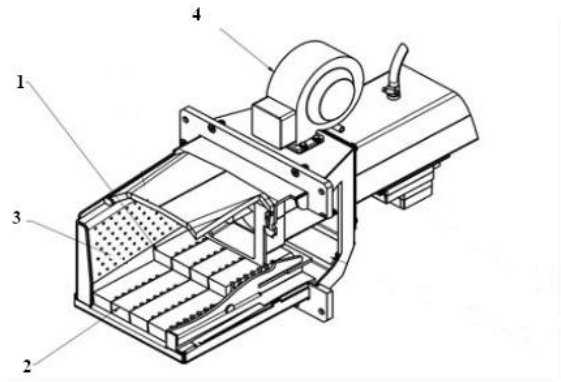
Palivo je z násypky dopravováno horizontálně pomocí šneku k retortě. Zde změní směr na vertikální a začne vytlačovat palivo nad sebou. Vytlačované palivo se zahřívá a začíná uvolňovat prchavou hořlavinu. Vzduch je pomocí ventilátoru po stranách vháněn do horní vrstvy paliva, aby docházelo k odhořívání tuhé části. Zároveň se předehřeje a pomáhá k dohoření prchavé hořlaviny nad roštem. Retortový hořák je vhodný i pro spékavé materiály, protože popel je vytlačen a přepadne na kruhový rošt nebo je odfouknut vzduchem. [26]



Obrázek 4 Schéma retortového hořáku – 1. Přívod paliva, 2. Podávací šnek, 3. Ventilátor, 4. Směšovač vzduchu a paliva, 5. Retortový hořák [27]

5.2 Rošt s pohyblivými roštnicemi

Palivo je přiváděno pomocí šnekového dopravníku do zadní části hořáku. Vzduch je rozdělen na primární a sekundární. Primární vzduch je přiváděn zespodu mezi roštnicemi. Sekundární vzduch je přiváděn pomocí otvorů v bočních stěnách. Tím dojde k promísení vzduchu s hořlavinou. Roštnice se v určitých cyklech pohybují a vynášejí vyhořelé palivo do popelníku. Díky tomu lze v tomto hořáku spalovat spékavá paliva. [28]

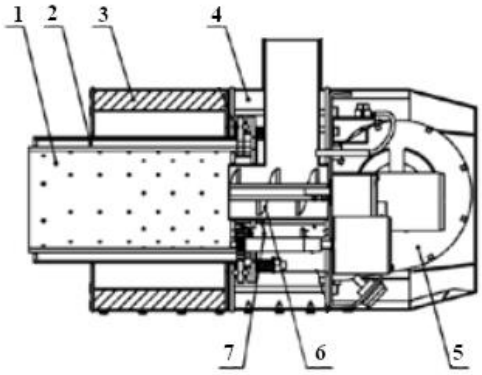


1 - pohyblivá roštnice, 2 - pevná roštnice, 3 - přívod sekundárního vzduchu, 4 - ventilátor

Obrázek 5 Hořák s pohyblivým roštem [29]

5.3 Hořák s otočnou komorou

Pomocí šnekového dopravníku je palivo dopraveno do spalovací komory. Spalovací komora se otáčí a díky tomu nedochází k napékání strusky na stěny spalovací komory. Struska se díky tomu posouvá dopředu a odpadá do popelníku. Otáčením také dochází k neustálému promíchávání paliva. Vzduch je pomocí ventilátoru vháněn do provzdušňovací komory. Odtud je přiváděn do spalovací komory po celé její délce, čímž dochází k dokonalejšímu spalování. [30]



Obrázek 6 Hořák s otočnou komorou – 1. Rotační spalovací komora, 2. Provzdušňovací rotační komora, 3. Tepelná izolace, 4. Provzdušňovací komora, 5. Ventilátor, 6. Podavač paliva, 7. Zapalovací spirála [30]

6 Emise vznikající při spalování

Emise z kotlů přispívají ke znečišťování ovzduší. Proto se kotle malých výkonů, tedy do 500 kW, dělí do pěti emisních tříd. Každá emisní třída má stanovený limit znečišťujících látek, které mohou být při spalování uvolňovány do ovzduší. Při uvedení na trh je kotel testován na tvorbu znečišťujících látek a podle toho mu je přidělena emisní třída. Od 1.1.2014 je zakázáno prodávat kotle s emisní třídou 1 a 2 a od září 2022 bude jejich provoz zcela zakázán. Od 1.1.2018 je zakázáno vyrábět kotle s emisní třídou 3. Tudíž dnes si můžeme koupit pouze kotle ve 4 a 5 emisní třídě. [31]

Tabulka 6 Mezní hodnoty emisí [32]

Kotle na biopaliva se samočinným podáváním paliva s maximálním tepelným výkonem 50 kW			
Emisní třída	Mezní hodnoty		
	CO	OGC	Prach
	mg/m^3 při 10 % O_2		
1	15000	1750	200
2	5000	200	180
3	3000	100	150
4	1000	30	60
5	500	20	40

Suché normální spaliny (0 °C a 1,013 bar)

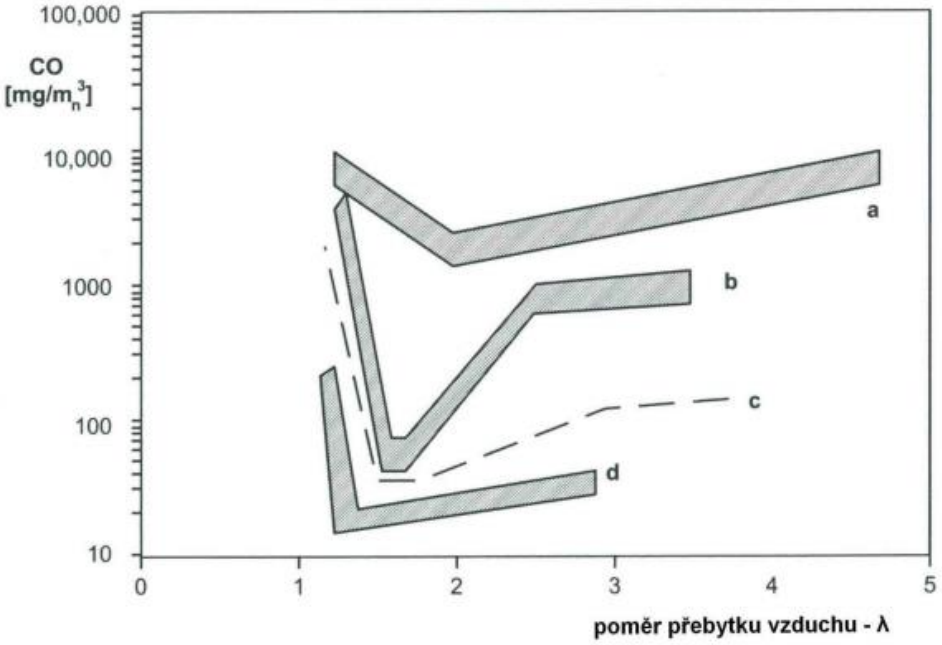
6.1 CO

Oxid uhelnatý je jedovatý plyn, který patří mezi znečišťující látky. Proto je jeho koncentrace sledována a nesmí překročit určité limity. CO je produktem nedokonalého spalování. Ze spalovací rovnice je patrné, že při nedokonalém spalování uhlíku se spotřebuje pouze poloviční objem kyslíku a uvolní se třetina tepla. Zbytek tepla se uvolní až při přeměně CO na CO_2. Pokud následující reakce neproběhne, tak dojde k takzvané ztrátě plynným nedopalem, tedy ztrátě vzniklé neúplným vyhořením spalitelných složek v plynu.

$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + Q \tag{10}$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 + Q \tag{11}$$

Tomu lze zamezit správným množstvím přebytku vzduchu. Pokud ovšem spalujeme s velkým přebytkem vzduchu, tak se ochlazuje spalovací komora a dochází k další tvorbě CO. Vliv přebytku vzduchu na vznik CO je znázorněn na obrázku 7. [13][33]



Obrázek 7 Vliv přebytku vzduchu na CO – a) jednoduchý kotel na dřevo s ručním přikládáním, b) odhořívací kotel na dřevěná polena, c) automatický kotel na dřevo, d) automatický kotel na dřevo s kontrolou spalování [19]

6.2 OGC

Představuje zkratku označení organického plynného uhlíku, tedy souhrnně pro různé sloučeniny uhlovodíků. V různých literaturách se označuje také jako TOC, THC nebo C_xH_y. OGC vznikají při určitých teplotách z uhlíku, který se vlivem nedokonalého spálení přeměnil na CO. Proto lze říci, že čím méně CO zůstane ve spalinách, tím méně tam bude i OGC . [33]

6.3 TZL

TZL je souhrnné označení pro tuhé znečišťující látky. Patří sem jednak popílek, který je proudem spalin unášen pryč a také saze, které vznikají při nedokonalém spalování. Saze jsou tvořeny především nespáleným uhlíkem v důsledku nedostatku kyslíku v plamenu. Ten se v komíně následně vychladí a vytvoří tuhé částice. Jedná se především o malé částečky, které jsou označovány jako PM_{10} a $PM_{2,5}$. To znamená, že částečky mají maximální velikost 10 respektive 2,5 μm. [33][19]

6.4 NO_x

NO_x je souhrnné označení pro oxidy dusíku. Do této skupiny se zařazuje několik sloučenin, ale nejčastěji se tím rozumí oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO_2. Tyto dva oxidy tvoří největší část, ale dále se tam mohou vyskytovat N_2O, N_2O_3 nebo třeba N_2O_5. Proces tvorby při spalování je tvořen oxidací dusíku, kde vzniká především NO. Oxid dusičitý tvoří přes 90 % celkového obsahu NO_x. Po ochlazení se část NO přetvoří na NO_2. Tento proces je však pomalý, takže NO_2 se na celkovém objemu NO_x podílí maximálně v 10 %. Oxidy dusíku dělíme na tři typy, které se liší podle mechanismu jejich vzniku. [34]

Při spalování agropelet tvoří největší část palivové NO_x. Hlavním zdrojem těchto dusíků je dusík, který je obsažený v palivu samotném. V agropalivech se nastřádá během růstu a při spalování dojde k jeho oxidaci. [35]

Termické NO_x vznikají z atmosférického dusíku, který je obsažen v nasávaném vzduchu při spalování. Pro jeho vznik je zapotřebí teplota kolem 1300 °C, čehož se při spalování agro-

pelet většinou nedosahuje. Proto tento druh NO_x vzniká spíše až za plamenem vlivem vyšší koncentrace O_2. [19]

Promptní dusík se tvoří na okraji plamene za přítomnosti uhlovodíků. Přeměna probíhá pomocí radikálových reakcí. Jejich podíl na celkovém obsahu NO_x je však zanedbatelný. [35]

6.5 Chlor

Obiloviny, které jsou hnojeny a ošetřovány pesticidy a herbicidy, obsahují větší množství chlóru. Ten pak při spalování vytváří chlorové sloučeniny. Ve spalinách dochází k reakci chloru s vodíkem a vzniká chlorovodík. Převážně na chlazených částech, kde je teplota spalin pod rosným bodem HCl, dochází k silnému koroznímu napadání prvků z nelegované oceli a tím ke snížení jejich životnosti. Především to jsou teplosměnné plochy u výměníků tepla. Z těchto důvodů je potřeba používat dražší legované materiály nebo ochranné povlaky. Dále při spalování chlorových sloučenin vznikají persistentní organické polutanty (POPs), zejména polychlorované dibenzodioxyny a dibenzofurany (PCDD/F) a polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). [36][20]

6.6 Síra

Síra způsobuje zvýšení rosného bodu spalin. Jakmile se teplota spalin dostane pod rosný bod, tak vlhkost ve spalinách začne kondenzovat a přispívá ke korozi prvků. Vzniklý kondenzát vytváří sloučeniny s uhlíkem a uhlovodany, které dohromady tvoří dehet. Teplosměnné plochy kotle a komín se poté zanášejí a zhoršuje se účinnost kotle. [37]

6.7 POPs

Pokud je nedokonale spalováno nekvalitní palivo, tak za určitých podmínek mohou vznikat chemické sloučeniny, které vytvářejí persistentní organické polutanty (POPs). Zejména se jedná o PCDD a PCDF. Jsou to stabilní látky, které se začínají uvolňovat z chlorovaných látek již od 300 °C. Dioxiny vznikají více způsoby. Hlavní z nich je syntézou de-nuovo, což je katalytická reakce mezi uhlíkem, chlorem a kyslíkem. Tomuto se dá zabránit správným promícháváním vzduchu s hořlavinou a spalování paliva v kotli k tomu určenému. Dále je potřeba, aby se teplota spalin pohybovala alespoň 2 s na hranici 1000 °C. [18][20]

Polycyklické aromatické uhlovodíku (PAH) vznikají při nedokonalém spalování organických látek, především biomasy, uhlí či olejů. Zejména v místech s nedostatkem kyslíku při teplotách 500 až 800 °C. Čím více těkavé látky palivo obsahuje, tím více PAH se uvolní. Do této skupiny patří přes 100 sloučenin, které jsou karcinogenní a mutagenní. [20][38]

Tabulka 7 Emise PCDD/F při spalování různých biopaliv [39]

palivo	Cl	HCl	CO	PAH	PCDD
	mg/kg	mg/m^3_N	mg/m^3_N	mg/m^3_N	ng/m^3_N
Smrková štěpka	120	0,9	625	37	0,063
Topolová štěpka	16	0,13	2880	74	0,003
Pelety z pšeničné slámy	2056	74	733,5	247	1,822
Řezanka z pšeničné slámy	1500	89	165,5	33	0,631
Pelety ze sena	2890	173	325,5	69,5	0,835
Řezanka ze sena	1681	50	534	134	1,909
Pelety z triticale	575	72	81,5	105	0,078
Řezanka z triticale	1390	45	461	26	0,082
Pokrutiny ze semene řepky	194	17	697	115	0,365

7 Vlastnosti měřených paliv

V palivové laboratoři jsme stanovili vlastnosti vybraných paliv pomocí analýzy hrubého rozboru paliva.

7.1 Vlhkost

Nejprve se zvážila samotná miska. Poté se do ní vložil zkoumaný vzorek a znovu se zvážila miska se vzorkem. Navážený vzorek paliva s miskou se vložil do sušárny, kde se nechal vysoušet po dobu dvanácti hodin na 105 °C. Jakmile se vlhkost paliva ustálila na určité hodnotě, tak se vzorek paliva opět zvážil. Rozdíl původní a nynější váhy činil obsah vlhkosti.

7.2 Prchavá hořlavina

Zvážil se prázdný kelímek s víčkem. Následně se do něj vložil vzorek a znovu se vše zvážilo. Poté se kelímek s víčkem a vzorkem vložil do muflové pece. Zde se při teplotě 900 °C nechala odpařit prchavá hořlavina. Po sedmi minutách se kelímek vyndal a nechal se zchladnout. Zchladlý kelímek se znovu zvážil a podle vzorce (12) se vypočítal podíl prchavé hořlaviny. Pro podíl prchavé hořlaviny v suchém vzorku jsme využili již vysušené vzorky. Pro zjištění obsahu prchavé hořlaviny v reálném prvku, který obsahuje vodu, použijeme následující vzorec:

$$h = \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - W^r \qquad [\%] \qquad (12)$$

Kde:	h	[%]	hořlavina
	m_1	[g]	hmotnost prázdného kelímku s víčkem
	m_2	[g]	hmotnost kelímku s víčkem a zkušebním vzorkem před zahříváním
	m_3	[g]	hmotnost kelímku s víčkem a zkušebním vzorkem po zahřívání
	W^r	[-]	hmotnostní zlomek obsahu vody

7.3 Spalné teplo

Spalné teplo se zjišťuje pomocí kalorimetru. Nejprve se připraví vzorek, naváží se a vloží se do kalorimetrického kelímku. Poté se bavlněný provázek přiváže ke žhavícímu drátu a jeho druhý konec se vloží do kalorimetrického kelímku tak, aby byl provázek v kontaktu se vzorkem. Poté se to celé vloží do kalorimetrické bomby, která se natlakuje kyslíkem na 35 bar. Bombu vložíme do kalorimetru. Naplníme kalorimetr vodou a zadáme známé hodnoty. Zjištěné spalné teplo z kalorimetru se pomocí vzorců přepočítá na výhřevnost.

Tabulka 8 zobrazuje výsledky, které jsme pomocí hrubého rozboru zjistili. Na první pohled je patrné, že paliva z agronomického průmyslu obsahují více popeloviny, než paliva z dřevařského průmyslu.

Tabulka 8 Hrubý rozbor vybraných paliv

	vlhkost	prchavá hořlavina (r)	prchavá hořlavina (d)	popel (r)	popel (d)	spalné teplo
	%	%	%	%	%	MJ/kg
křídlatka (volná)	9,11	81,62	-	-	3,37	17,35
křídlatka (pelety)	7,13	74,05	-	-	9,30	16,89
digestát (peleta)	8,90	67,25	-	-	13,84	15,45
amarant	6,69	73,58	78,85	7,13	7,70	16,31
quinoa (odpad)	8,32	74,80	81,59	4,78	5,34	17,70
sláma (pelety)	7,16	71,37	76,88	6,16	6,64	17,24
žito (zrní)	7,69	77,02	83,43	12,51	13,67	16,84

7.4 Složení hořlaviny

Pro zjištění vlastností paliv při spalování je zapotřebí znát detailnější složení hořlaviny. Hořlavina je složena z více prvků, ale zjišťuje se především podíl pěti hlavních prvků, ze kterých je hořlavina složená. V následujících třech tabulkách je podíl prvků v původním vzorku (r), ve vysušeném vzorku (d) a ve vzorku bez vody a popele (daf). Podíl těchto prvků je také potřeba znát pro přepočítání spalného tepla na výhřevnost.

Tabulka 9 Hořlavina v původním vzorku (r)

	N	C	H	S	O
	%	%	%	%	%
křídlatka (volná)	0,65	43,29	5,93	0,00	35,88
křídlatka (pelety)	0,65	43,29	5,93	0,00	35,88
digestát (peleta)	2,00	38,25	5,83	4,03	35,57
amarant	0,89	40,16	5,71	0,09	46,03
quinoa (odpad)	2,87	42,99	6,84	0,18	42,34
sláma (pelety)	0,76	43,81	6,09	0,11	43,07
žito (zrní)	2,81	41,74	6,79	0,05	36,10

Tabulka 10 Hořlavina v suchém vzorku (d)

	N	C	H	S	O
	%	%	%	%	%
křídlatka (volná)	0,90	59,89	6,12	0,00	33,09
křídlatka (pelety)	0,90	59,89	6,12	0,00	33,09
digestát (peleta)	2,83	54,21	5,87	5,71	31,39
amarant	1,03	46,60	5,76	0,10	46,52
quinoa (odpad)	3,30	49,47	6,80	0,21	40,22
sláma (pelety)	0,88	50,54	6,10	0,12	42,35
žito (zrní)	3,52	52,30	7,43	0,07	36,68

Tabulka 11 Hořlavina v suchém vzorku bez popele (daf)

	N	C	H	S	O
	%	%	%	%	%
křídlatka (volná)	0,87	57,91	5,92	0,00	31,99
křídlatka (pelety)	0,87	57,91	5,92	0,00	31,99
digestát (peleta)	2,43	46,44	5,03	4,89	26,89
Amarant	0,96	43,27	5,35	0,09	43,20
quinoa (odpad)	3,14	47,11	6,48	0,20	38,29
sláma (pelety)	0,83	47,42	5,73	0,12	39,75
žito (zrní)	3,08	45,76	6,50	0,06	32,09

V tabulce 9 je podílové zastoupení prvků menší, protože se ve vzorku vyskytuje také voda. Po vysušení se podíl prvků zvýší. Lze si však všimnout, že v tabulce 11 jsou menší hodnoty než v tabulce 10. To je dáno tím, že tabulka 11 znázorňuje podíl prvků v prchavé hořlavině, zatímco tabulka 10 zahrnuje také prvky, které jsou obsaženy v tuhém zbytku. Po přepočtení rozdílů těchto hodnot tedy můžeme zjistit také prvkové složení samotného tuhého zbytku.

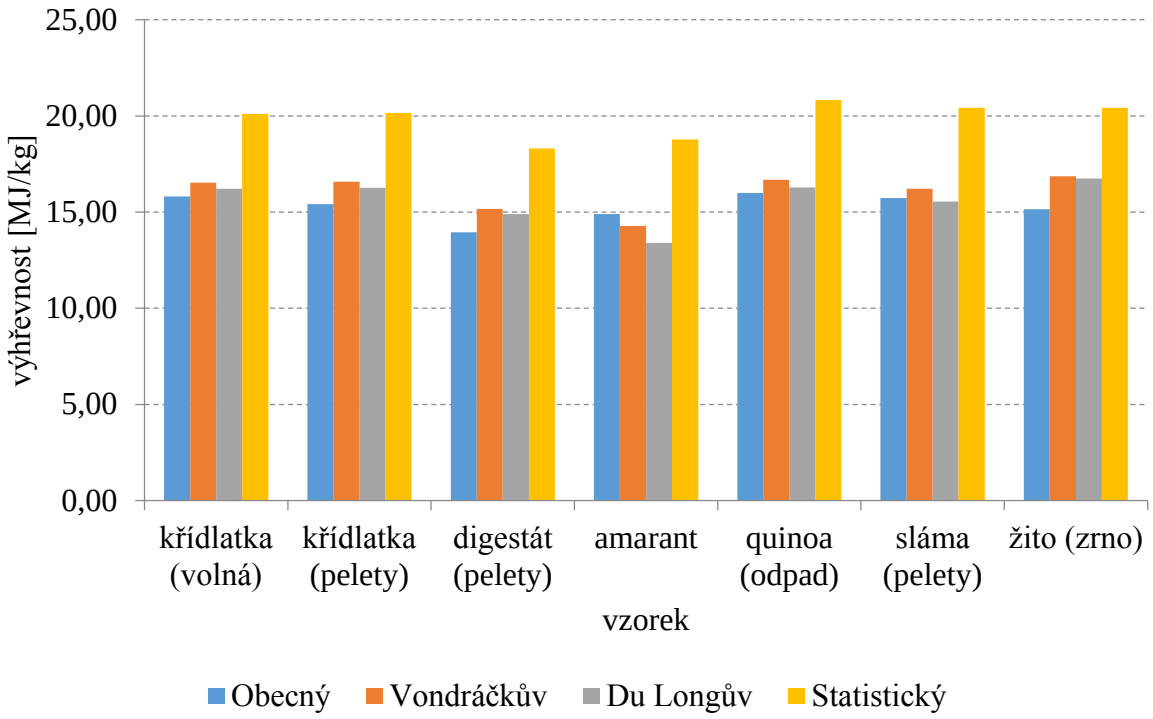
7.5 Výhřevnost

Jelikož se teploty při spalování pohybují nad rosným bodem a teplo ve vodní páře odchází bez využití, tak je potřeba přepočítat spalné teplo na výhřevnost. Pro srovnání jsou v tabulce 12 výsledky výhřevností, které jsou přepočítány podle různých typů vzorců. Pro přepočet se běžně používá první, obecný vzorec (5), kde je potřeba znát pouze obsah vodíku v palivu. Další vzorce již berou v potaz i další prvky, které jsou obsaženy v hořlavině. Du Longův (7) a Vondráčkův (6) vzorec je určen pro starší paliva, která obsahují více uhlíku. Každý vzorec z těchto dvou vzorců přistupuje jinak k množství jednotlivých prvků. Především se jedná o uhlík, vodík a kyslík. Předpokládá se, že čím je palivo starší, tím obsahuje více uhlíku a méně vodíku a kyslíku. Tyto vlastnosti se zohledňují a upravují pomocí koeficientů.

Tabulka 12 Výhřevnost vzorků podle různých vzorců

	obecný	Vondráčkův	Du Longův	statistický
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
křídlatka (volná)	15,82	16,54	16,21	20,11
křídlatka (pelety)	15,41	16,58	16,26	20,16
digestát (pelety)	13,95	15,17	14,89	18,31
amarant	14,89	14,28	13,41	18,77
quinoa (odpad)	15,99	16,69	16,28	20,83
sláma (pelety)	15,73	16,22	15,55	20,42
žito (zrno)	15,16	16,86	16,74	20,42

Pro lepší názornost je srovnání výsledků výhřevnosti podle jednotlivých vzorců vyobrazeno v grafu na obrázku 8.



Obrázek 8 Srovnání výhřevnosti podle různých vzorců

Pokud si určíme hodnotu z obecného vzorce (5) jako referenční, tak z grafu vyplývá, že ve většině případů je to nejmenší hodnota. Po přepočtení výhřevnosti přes ostatní vzorce nám vycházejí vyšší hodnoty. Rozdíly těchto hodnot je v absolutních hodnotách zobrazen v tabulce 13. Je zajímavé, že výsledky získané pomocí Du Longova vzorce (7), podle kterého je doporučováno přepočítávat nejstarší paliva, jsou nejblíže k výsledkům z obecného vzorce. Podle Vondráčkova vzorce (6) jsou odchylky ve výhřevnosti od 0,49 do 1,71 MJ/kg. Ve většině případů se však tyto odchylky z obou vzorců pohybují v rámci desetin MJ/kg. Zato při používání statistického vzorce (8) se tato nepřesnost liší výrazněji. Hodnoty výhřevnosti jsou v tomto případě u všech zkoumaných vzorků vyšší v rámci jednotek MJ/kg. Největší odchylka činí přes 5 MJ/kg.

Tabulka 13 Absolutní rozdíl výhřevností oproti obecnému vzorci

	Vondráčkův [MJ/kg]	Du Longův [MJ/kg]	statistický [MJ/kg]
křídlatka (volná)	0,71	0,39	4,29
křídlatka (pelety)	1,17	0,85	4,75
digestát (pelety)	1,21	0,94	4,36
amarant	0,61	1,48	3,88
quinoa (odpad)	0,69	0,28	4,84
sláma (pelety)	0,49	0,18	4,69
žito (zrno)	1,71	1,58	5,27

8 Měření TZL a PZL

Měření jsme prováděli na kotli EkoScroll ALFA. První měření proběhlo na kotli s hořákem umístěným na čelní straně (obrázek 9) a druhé měření proběhlo na kotli s hořákem na umístěným na straně boční (obrázek 10). U obou měření byl použit hořák s pohyblivými roštnicemi. Jako palivo byly použity agropelety o průměru 6 mm. Ovšem firma, pro kterou bylo měření vytvořeno, si nepřeje, aby byl zveřejněn konkrétní typ agropelety.

Obrázek 1 Kotel s hořákem na čelní straně

Obrázek 2 Kotel s hořákem na boční straně

Pro měření tuhých znečišťujících látek (TZL) jsme si nejprve připravili filtr. Ten se nejprve vysušil a uskladnil do exikátoru, na jehož dně je silikagel. Silikagel v exikátoru udržuje konstantní prostředí a zajistí tak, že filtry zůstanou suché po celou dobu skladování. Před samotným měřením se zvážil čistý filtr. Poté se vložil do misky a zvážil se i s miskou. Při samotném měření TZL se filtr umístil do systému, který se nacházel hned za odběrovou sondou. Spaliny procházely přes filtr do chladičky a poté přes vývěvu do plynoměru. Pomocí vývěvy bylo zapotřebí nastavit správnou rychlost nasávaných spalin, aby stále docházelo k izokinetickému odběru. Požadované nasávané množství plynu se spočítá pomocí vzorce (13). Toho se však v našem případě špatně dosahovalo, protože rychlost spalin v komíně byla příliš nízká. Pro přesný izokinetický odběr by bylo nutné použít jinou metodu měření.

$$V_S = v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 60 \cdot 1000 \qquad [\mathrm{m^3/min}] \quad (13)$$

Kde: D [m] průměr odběrové hubice
v [m/s] rychlost proudění spalin

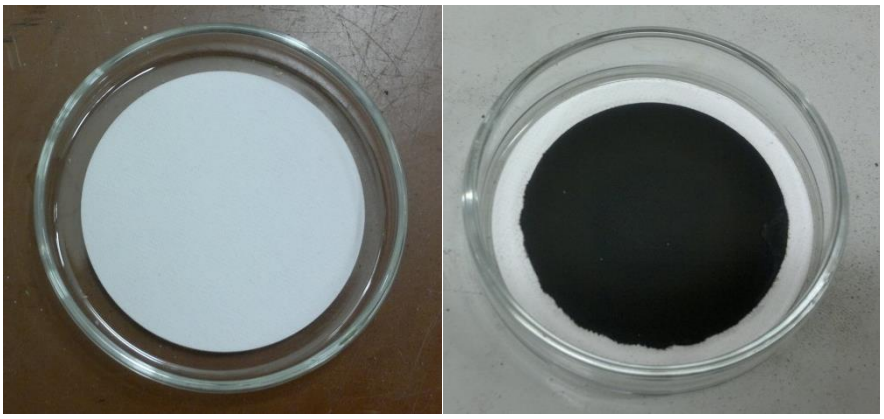
Měření probíhalo po dobu 30 minut. Po skončení měření se filtr umístil do sušárny, abychom se opět zbavili vlhkosti, která se do filtru dostala spolu s TZL. Po vysušení se znovu

zvážil samotný filtr a filtr s miskou. Původní hodnoty se odečetly od nynějších, díky čemuž jsme získali hmotnost TZL. Filtr před měřením a po měření je ukázán na obrázku 11.

Následně bylo zapotřebí zjistit objem nasátých spalin během měření. Počáteční stav plynoměru se odečetl od koncového stavu. Výsledná hodnota nám určuje, jaké množství spalin proteklo v konkrétních podmínkách za určitou dobu. Abychom mohli s výsledkem počítat dále, tak je nutné hodnotu přepočítat na normální podmínky. Tento přepočet se provede pomocí rovnice (14). Poté se vydělí množství TZL proteklým množstvím plynu za normálních podmínek.

$$V_{S,n} = V_S \cdot \frac{(p_{atm} + p_c)}{101325} \cdot \frac{273{,}15}{(273{,}15 + t_c)} \qquad [\mathrm{m}^3_{\mathrm{n}}] \qquad (14)$$

Kde: p_{atm} [Pa] atmosférický tlak
p_c [Pa] tlak plynu v plynoměru
t_c [°C] teplota plynu v plynoměru



Obrázek 11 Vlevo filtr před měřením, vpravo filtr po měření

Současně s měřením TZL jsme měřili také plynné znečišťující látky (PZL). Konkrétně koncentraci oxidu uhelnatého (CO), oxidu dusnatého (NO), oxidu uhličitého (CO_2), organický plynný uhlík (OGC) a koncentraci kyslíku ve spalinách (O_2). Spaliny po nasátí z komína putovaly přes úpravnu spalin, kde se vychladily na 0 °C. Díky tomu získaly vlastnosti normálních podmínek. Koncentrace OGC se zjišťovala pomocí přístroje TESTA FID 2010T (obrázek 12), který pracuje na principu plamenově ionizační detekce. Zbylé koncentrace plynů byly určovány pomocí přístroje SIEMENS ULTRAMAT 23 (obrázek 13), který určuje koncentraci prvků za pomoci spektroskopické metody, která je založena na absorpci nerozptýleného infračerveného záření.

Obrázek 4 SIEMENS ULTRAMAT 23

Obrázek 3 TESTA FID 2010T

Měření jsme na obou typech zapojení prováděli třikrát. Hodnoty se zapisovaly každou sekundu po dobu půl hodiny. Z výsledných naměřených hodnot jsme udělali minutové průměry, se kterými jsme dále pracovali.

8.1 Záznam měření prvního typu zapojení hořáku

Tabulka 14 Podmínky měření TZL - 1

Poznámka		1	2	3	
Filtr suchý	m_1	0,1293	0,1304	0,1293	g
Filtr po měření	m_2	0,1522	0,1523	0,1502	g
Filtr suchý s miskou	m_1	33,5738	33,5744	33,3384	g
Filtr po měření s miskou suché	m_{2s}	33,5968	33,5963	33,3591	g
Navážka vzorku	m	23	21,9	20,7	mg
Začátek odběru	T_1	13:10	13:43	14:16	hh:min
Konec odběru	T_2	13:40	14:13	14:46	hh:min
Doba odběru	T	30	30	30	min
Hubice	H	18	18	18	mm
Rychlost proudění v potrubí	v	0,6	0,6	0,6	m/s
Atmosférický tlak	p_a	99300	99300	99300	Pa
Teplota plynu v potrubí	t_s	102	102	102	°C
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_s	-12	-12	-12	Pa
Referenční koncentrace O_2	O_{2Ref}	10	10	10	%
Plynoměr					
Počáteční stav plynoměru	V_1	196,789	197,215	197,636	m^3
Konečný stav plynoměru	V_2	197,215	197,636	198,103	m^3
Objem vzorku	V_{cS}	0,426	0,421	0,467	m^3
Teplota plynu v plynoměru	t_c	22	24	25	°C
Tlak plynu v plynoměru	p_c	0	0	0	Pa

Koncentrace plynných znečišťujících látek se zaznamenávala v sekundových intervalech. Z těchto intervalů jsme následně udělali minutové průměry, které jsme dále analyzovali. Pro zjištění celkového obsahu PZL jsme zprůměrovali minutové hodnoty.

Tabulka 15 Průměr hodnot z jednotlivých měření

měření	CO	NO	CO_2	O_2	OGC
	ppm	ppm	%	%	ppm
I	43,56	256,05	11,42	9,02	1,31
II	43,58	258,53	11,61	8,82	1,21
III	23,73	258,88	11,26	9,20	0,89

Následně bylo zapotřebí přepočítat hodnoty z ppm na mg/m^3. Tento přepočet se provádí pomocí koeficientů, kde $k_{CO} = 1{,}25;\ k_{NO} = 2{,}05;\ k_{OGC} = 1{,}64$. Pro příklad je v rovnici (15) přepočítán oxid uhelnatý, který byl naměřen během prvního měření.

$$(mg/m^3)_{CO} = ppm_{CO} \cdot k_{CO} = 43{,}56 \cdot 1{,}25 = 54{,}45 \qquad [\mathrm{mg/m^3}] \qquad (15)$$

Tabulka 16 Přepočet plynných znečišťujících látek z ppm na mg/m^3

měření	CO	NO	OGC
	mg/m^3_n	mg/m^3_n	mg/m^3_n
I	54,45	524,90	2,15
II	54,48	529,99	1,99
III	29,66	530,71	1,46

Před změřením množství nečistot prošly spaliny chladicím zařízením, díky čemuž je již nemusíme přepočítávat na normální podmínky. V odebíraných spalinách se může měnit obsah kyslíku. Tím pádem, kdybychom nesplňovali emisní limity, tak by stačilo spaliny naředit. Aby se tomuto zabránilo, tak se výsledné hodnoty přepočítávají na referenční kyslík (16). Pro různé druhy paliv jsou stanoveny referenční hodnoty kyslíku pro spalování. Díky tomu zajistíme, že budou srovnávány hodnoty, které jsou měřeny za stejných podmínek.

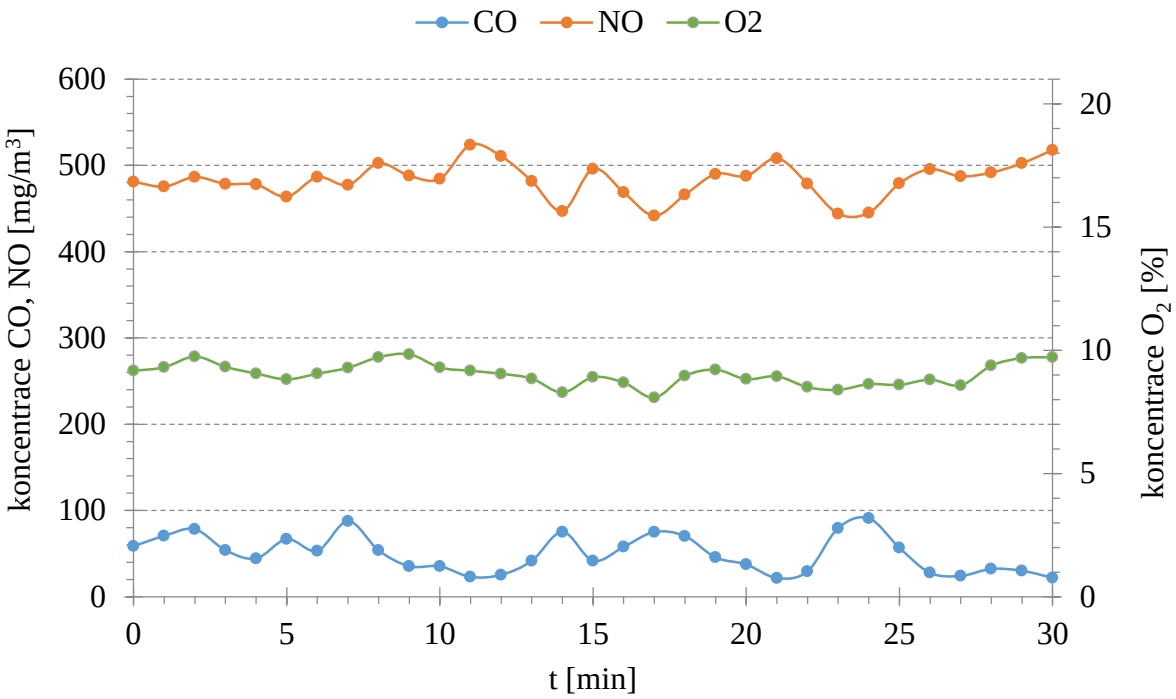
$$C_{N,S}^{R} = C \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} \qquad [-] \qquad (16)$$

kde: C [mg/m^3] koncentrace prvku
O_2^{ref} [%] referenční obsah kyslíku (10 %)
O_2 [%] naměřený obsah kyslíku

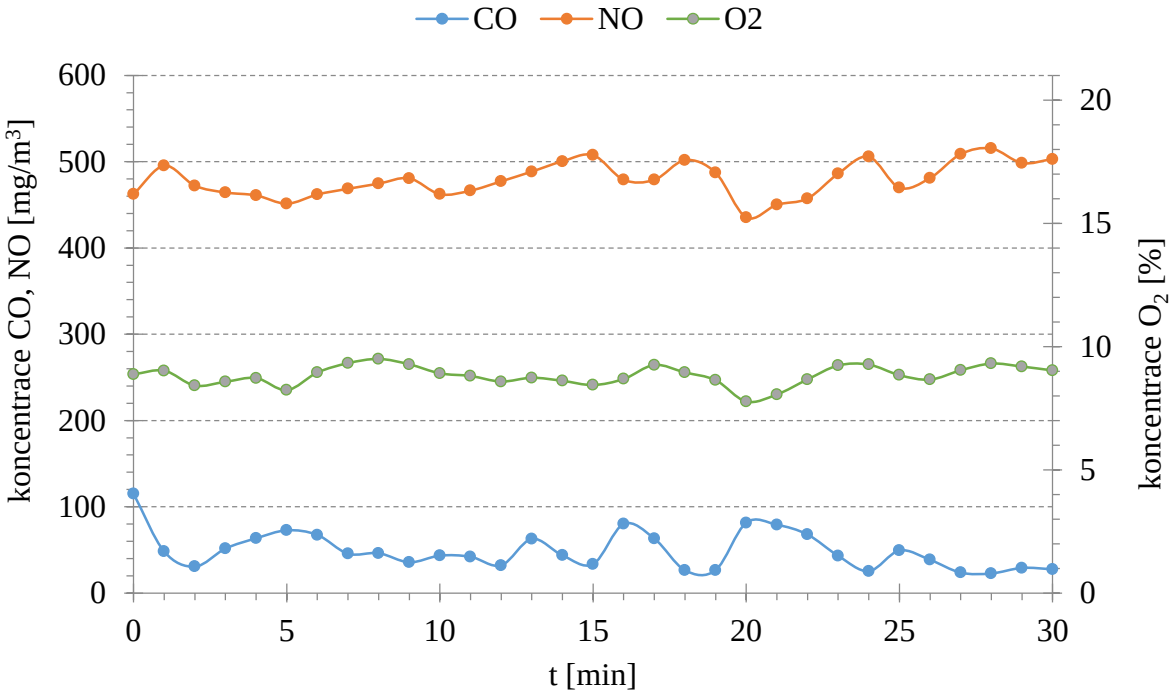
Tabulka 17 Přepočítané hodnoty na referenční kyslík

měření	CO_{ref}	NO_{ref}	TZL_{ref}	O_2	OGC_{ref}
	mg/m^3_N	mg/m^3_N	mg/m^3_N	%	mg/m^3_N
I	49,83	482,70	54,57	9,03	1,97
II	48,94	479,12	52,17	8,82	1,79
III	27,63	495,39	46,26	9,20	1,36

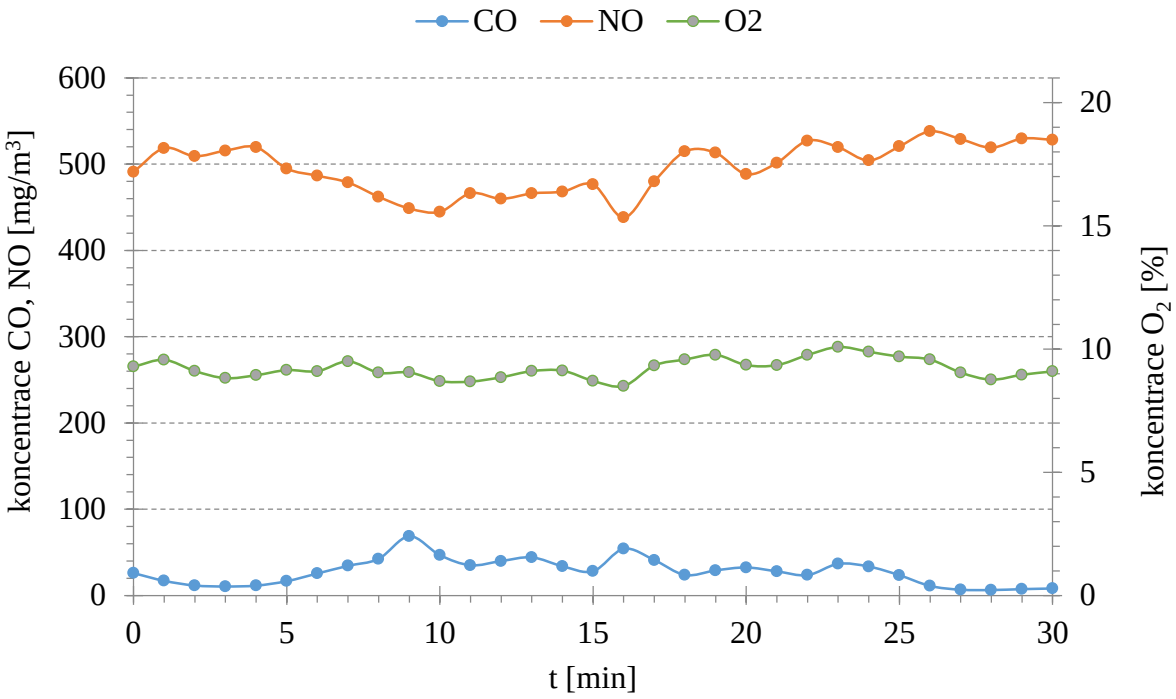
Pro lepší znázornění jsou hodnoty z jednotlivých měření umístěny v grafech níže. Z grafů lze vypozorovat, že změny se dějí v závislosti na množství koncentrace kyslíku. Čím větší je koncentrace kyslíku, tím méně se tvoří CO, ale více NO. Tato změna jde pěkně vidět, pokud si porovnáme pouze křivky CO a NO mezi sebou.



Obrázek 14 Měření koncentrací PZL I



Obrázek 15 Měření koncentrací PZL II



Obrázek 16 Měření koncentrací PZL III

8.2 Záznam měření druhého typu zapojení hořáku

Tabulka 18 Podmínky měření TZL - 2

Poznámka		1	2	3	4	
Filtr suchý	m_1	0,1298	0,1301	1,1313	0,1285	g
Filtr po měření	m_2	0,1613	0,1512	0,1396	0,1498	g
Filtr suchý s miskou	m_1	34,2595	34,4188	34,0808	34,5472	g
Filtr po měření s miskou suché	m_{2s}	24,2910	34,4403	34,0891	34,5689	g
Navážka vzorku	m	31,7	21,5	8,3	21,7	mg
Začátek odběru	T_1	12:40	13:12	14:00	14:30	hh:min
Konec odběru	T_2	13:10	13:42	14:10	15:00	hh:min
Doba odběru	T	30	30	10	30	min
Hubice	H	18	18	18	18	mm
Rychlost proudění v potrubí	v	0,8	0,8	0,8	0,8	m/s
Atmosférický tlak	p_a	97200	97200	97200	97200	Pa
Teplota plynu v potrubí	t_s	104	104	104	104	°C
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_s	-13,5	-13,5	-13,5	-13,5	Pa
Referenční koncentrace O_2	O_{2Ref}	10	10	10	10	%
Plynoměr						
Počáteční stav plynoměru	V_1	198,127	198,528	199,010	199,192	m^3
Konečný stav plynoměru	V_2	198,528	199,010	199,192	199,604	m^3
Objem vzorku	V_{cS}	0,401	0,482	0,182	0,412	m^3
Teplota plynu v plynoměru	t_c	18	19	20	20	°C
Tlak plynu v plynoměru	p_c	0	0	0	0	Pa

Zde jsme při zpracovávání hodnot použili stejný postup jako při prvním měření.

Tabulka 19 Průměrné hodnoty z jednotlivých měření

měření	CO	NO	CO2	O2	OGC
	ppm	ppm	%	%	ppm
I	92,93	278,27	11,88	8,70	-
II	43,18	306,88	11,12	9,48	-
III	337,03	210,55	10,96	9,14	119,88
IV	69,98	289,58	12,11	8,35	2,17

Podle rovnice (15) jsme přepočítali koncentraci hodnot z ppm na mg/m^3.

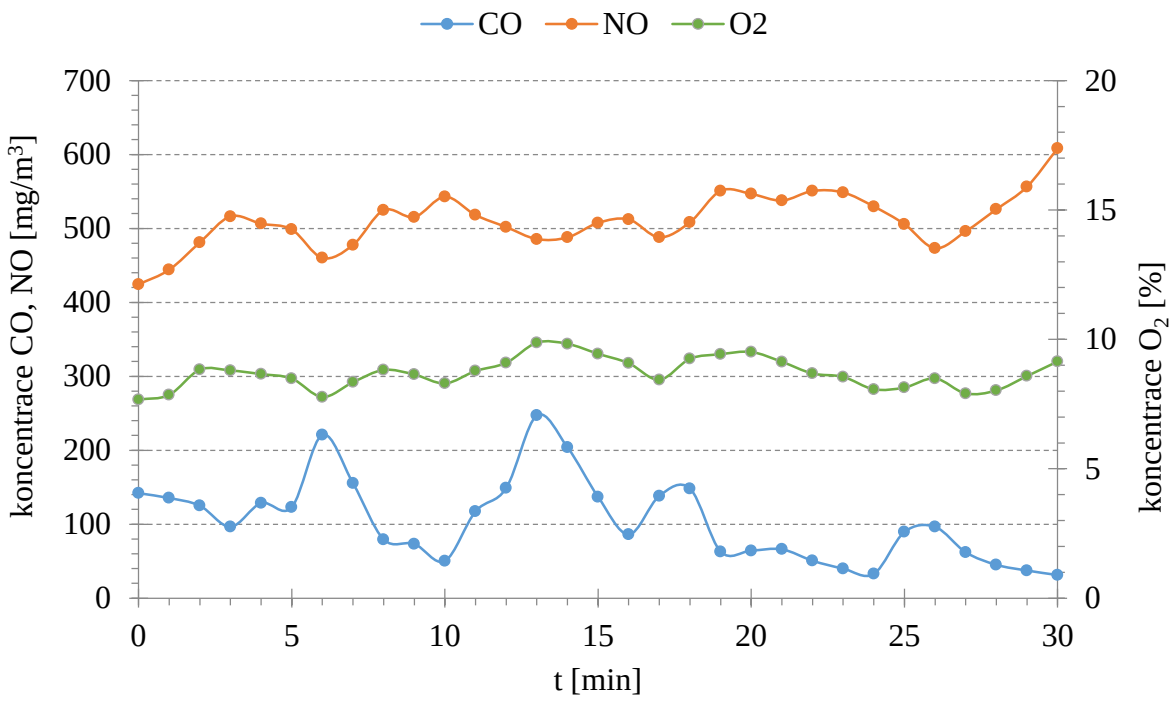
Tabulka 20 Přepočet plynných znečišťujících látek z ppm na mg/m^3

měření	CO	NO	OGC
	mg/m^3_n	mg/m^3_n	mg/m^3_n
I	116,1606	570,4555	-
II	53,97849	629,0954	-
III	421,2822	431,6368	196,60
IV	87,47715	593,637	3,56

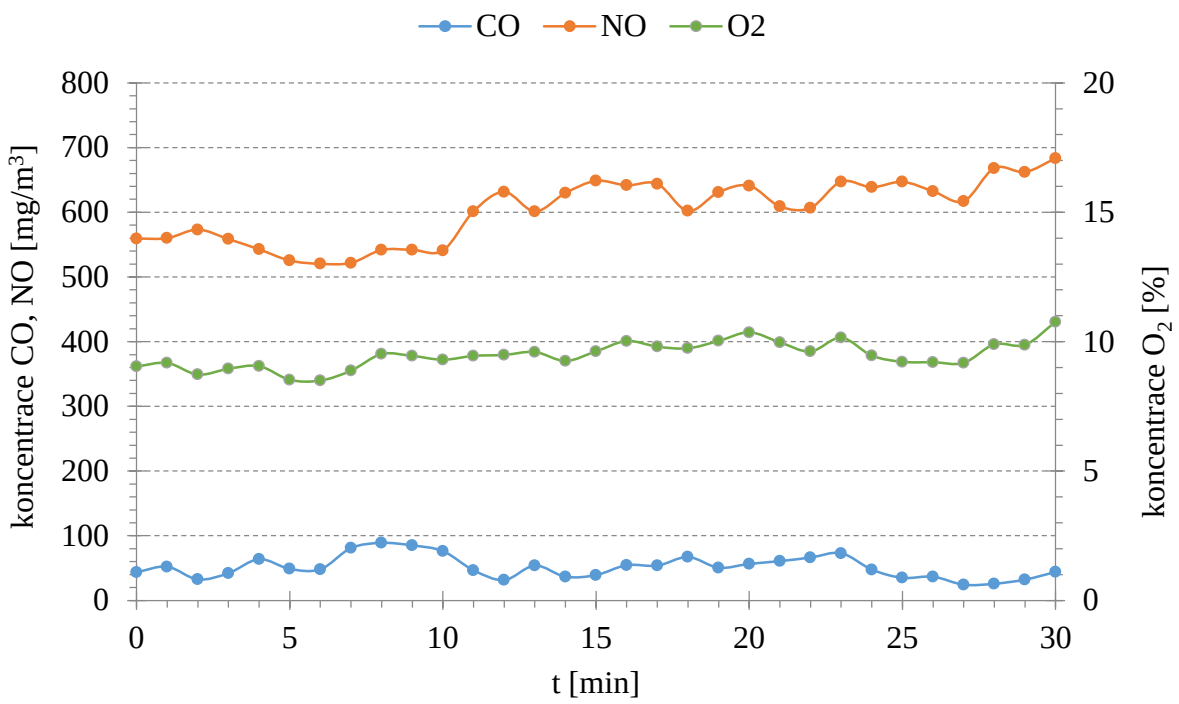
Poté jsme podle rovnice (16) přepočítali hodnoty na referenční kyslík, abychom mohli výsledky porovnat.

Tabulka 21 Přepočet hodnot na referenční kyslík

Měření	CO	NO	TZL	O_2	OGC
	mg/m^3_N	mg/m^3_N	mg/m^3_N	%	mg/m^3_N
I	104,36	510,67	78,29	8,70	-
II	51,61	602,25	47,04	9,48	-
III	320,91	408,95	47,32	9,14	136,08
IV	79,02	516,73	50,75	8,35	3,09

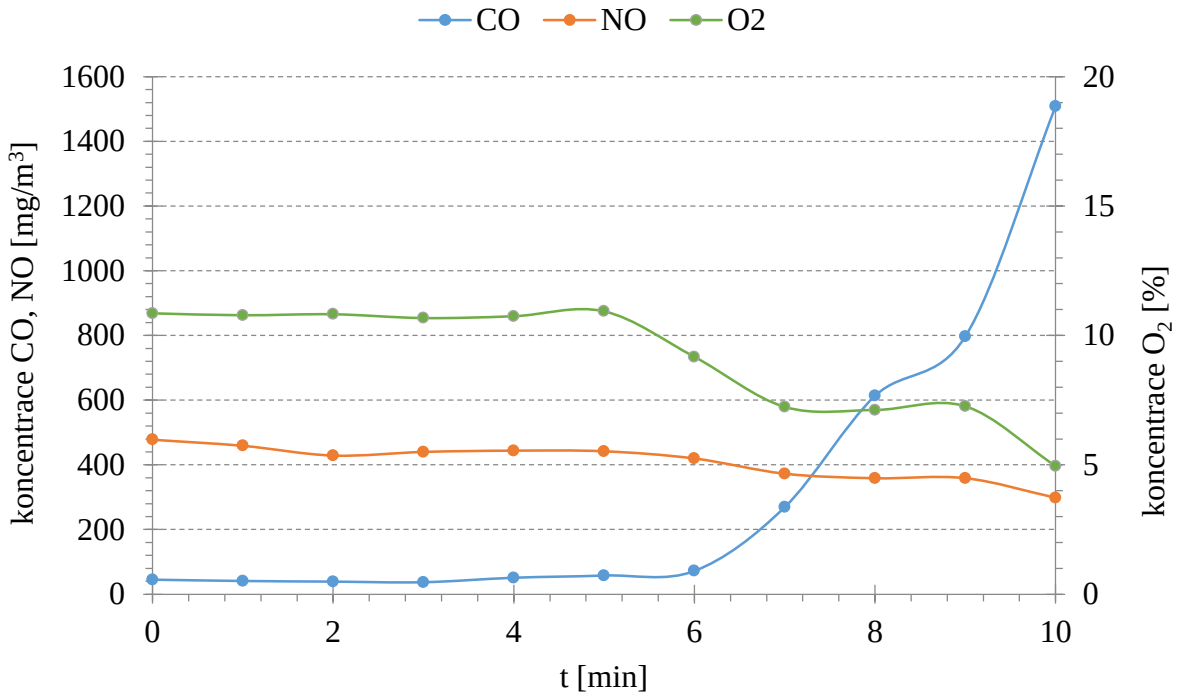


Obrázek 17 Měření koncentrací PZL I



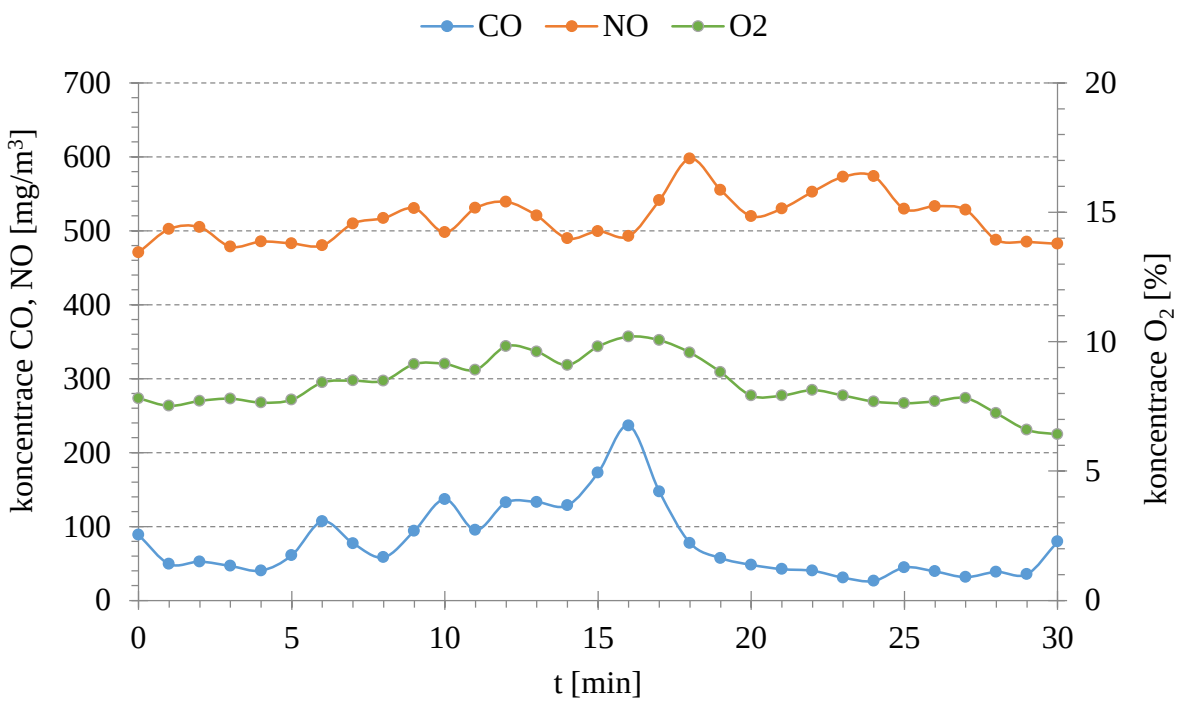
Obrázek 18 Měření koncentrací PZL II

Třetí měření (obrázek 19) bylo po deseti minutách ukončeno, protože hodnoty CO byly příliš vysoké. Toto bylo zapříčiněno špatným odvodem popeloviny z hořáku. Spečený popel zamezil přístupu kyslíku a docházelo k nedokonalému spalování.



Obrázek 19 Měření koncentrací PZL III

Po odstranění spečeného popele se hodnoty látek vrátili zpět na původní úroveň.



Obrázek 20 Měření koncentrací PZL IV

9 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo popsat vlastnosti agropelet jako paliva a emise, které vznikají při spalování. Tyto teoretické výsledky jsme poté experimentálně ověřili.

Agropelety obsahují větší podíl popeloviny než dřevní pelety. Navíc jsou náchylné na spékání, protože obsahují daleko větší množství prvků, které ovlivňují spékavost popeloviny. Jedná se především o draslík, fosfor a sodík. Tyto prvky snižují teplotu tavitelnosti popeloviny a proto je zapotřebí provozovat proces spalování při nižších teplotách. Potřebné teploty se zjišťují experimentálně pomocí Segeerovy metody a je zapotřebí, aby tyto teploty nebyly překročeny. Po překročení dochází k zanášení teplonosných ploch a roštu. Tím se zhoršuje celková účinnost procesu spalování a zvětšuje se také obsah škodlivých emisí ve spalinách.

Při spalování agropelet vzniká více škodlivin než při spalování dřevních pelet. Je to zapříčiněno především vyšším obsahem chloru, dusíku a síry v plodinách. Obsah těchto prvků v plodinách je také ovlivněn samotným přístupem při pěstování. Čím více se plodiny přihnojují dusíkatými hnojivy, tím více dusíku se v nich nashromáždí a poté vzniká větší množství oxidů dusíku při spalování. To je problém, který je spojen hlavně se spalováním agropelet, protože v dřevních peletách se vyskytuje pouze zlomek tohoto obsahu. Dalším problémem je zvýšené množství chloru. Ten poté tvoří chlorové sloučeniny a z nich se vytvářejí persistentní látky, které jsou karcinogenní a mutagenní. Tyto vzniklé emise se dají snížit dodržením jistého postupu spalování.

V experimentální části jsme se zaměřili na zjištění prvkového složení hořlaviny. Po změření prvkového složení hořlaviny jsme přepočítali spalné teplo na výhřevnost. Využili jsme k tomu čtyři různé vzorce. Běžně používaný vzorec jsme použili pro zjištění referenční hodnoty, se kterou jsme porovnali zbytek. Vondráčkův vzorec, který je určen pro geologicky mladší paliva se lišil převážně v rámci desetin MJ/kg, avšak u třech paliv se rozdíl vyšplhal přes jeden MJ/kg. Du Longův vzorec se využívá pro geologicky starší paliva. Zde překvapivě došlo k nejmenší odchylce oproti referenčnímu přepočtu v porovnání s ostatními přepočty. Rozdíl hodnot se pohyboval v desetinách MJ/kg. Pouze dvě hodnoty přesáhly jeden MJ/kg. Statistický vzorec je určen pro celou škálu paliv. Zde byla největší odchylka, která se pohybovala v rámci jednotek MJ/kg. Největší odchylka činila 5,27 MJ/kg, což je značný rozdíl od běžně používaného vzorce.

Měření obsahu spalin se provádělo při dvou různých zapojeních hořáku ke kotli. Na prvním typu zapojení proběhlo měření třikrát a na druhém čtyřikrát. Jedno měření na druhém zapojení však trvalo pouze deset minut, jelikož došlo k ucpání hořáku. Toto měření nesplňuje podmínku půlhodinového testu a nemůžeme ho tedy zařadit do porovnávání. Naměřené a přepočtené výsledky jsme porovnali s dovolenými hodnotami danými normou ČSN EN 303-5. Emise CO a OGC při spalování na prvním typu zapojení hořáku splňují emisní třídu 5. Hodnoty TZL se však do této tolerance nevešly, tudíž kotel s tímto zapojením hořáku se zařazuje do emisní třídy 4. Při měření kotle s druhým typem zapojení hořáku se množství CO opět vejde do tolerance 5. emisní třídy. Hodnoty OGC jsme změřili pouze dvakrát a z toho jedno měření nelze použít.

Pokud bychom však předpokládali, že ostatní hodnoty se pohybují přibližně stejně jako námi naměřená hodnota, tak i zde splňuje kotel 5. emisní třídu. U TZL vzniká jistá nejistota. Dvě hodnoty spadají do čtvrté emisní třídy, avšak jedna hodnota tento limit nesplňuje a spadá do třetí emisní třídy. Zde je otázkou, jestli došlo k ojedinělému problému nebo se takto bude kotel chovat častěji a tím pádem by musel zůstat zařazen ve třetí emisní třídě.

Z námi provedeného vyhodnocení vyplývá, že největší problémy při spalování agropelet jsou spojeny s emisemi TZL. Je důležité správně navrhnout kotle, aby nedocházelo k zapečení hořáku, a následně je nutné omezit úlet tuhých částic. Jelikož se agropelety oproti dřevním peletám drolí a vzniká z nich více popeloviny, jedná se tak o nelehký avšak důležitý úkol.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] CHLUBNÝ, Jaroslav, Jaroslav LEDNICKÝ, Radek SEDLAČÍK a Lenka SLEZÁČKOVÁ. *Obnovitelné zdroje energie* [online]. , 38-41 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/obnovitelne_zdroje_energie_energeticka_agentura_zlinskeho_kraje.pdf

[2] MCKENDRY, Peter. Energy production from biomas (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* [online]. Colchester (UK), 2001, **83** [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://faculty.washington.edu/stevehar/Biomass-Overview.pdf

[3] BENDA, Vítězslav, Helena DOLEŽALOVÁ, Peter DUŠIČKA, et al. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Profi Press, 2012, 208 stran : ilustrace (převážně barevné), mapy. ISBN 978-80-86726-48-9.

[4] KŘEPELKA, Jiří. Zpracování slámy na topné pelety. *Zemědělec* [online]. ProficPress, 8. 6. 2012 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: https://zemedelec.cz/zpracovani-slamy-na-topne-pelety-2/

[5] KOLONIČNÝ, Jan a Veronika HASE. *Využití rostlinné biomasy v energetice*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2541-0.

[6] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Biomasa z energetických rostlin. *Biom.cz* [online]. 19.4.2006 [cit. 2019-05-02]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-z-energetickych-rostlin

[7] HAVLÍČKOVÁ, Kamila. *Rostlinná biomasa jako zdroj energie*. Průhonice: Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví s Novou tiskárnou Pelhřimov, 2008. ISBN 978-80-7415-004-3.

[8] SOUČKOVÁ, Helena a Jan MOUDRÝ. *Nepotravinářské využití fytomasy*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zemědělská fakulta, 2006. ISBN 80-704-0857-X.

[9] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta, aneb, Peleta mýtů zbavená*. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 978-80-904914-0-3.

[10] VERNER, Vladimír. Alternativní pelety. *Biom.cz* [online]. 31.12.2007 [cit. 2019-05-02]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety

[11] Výroba dřevních pelet. *Česká peleta* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.ceska-peleta.cz/pelety-a-brikety/vyroba-drevnich-pelet/

[12] *ČSN EN ISO 17225-6 (838202) A Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv*. Část 6, Tříděné nedřevní pelety = Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Part 6, Graded non-woody pellets. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015

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

[14] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

[15] MOSKALÍK, Jiří, Marek BALÁŠ, Martin LISÝ a Jan BOGDÁLEK. Tavení popele z biomasy. In: BOGDÁLEK, Jan a Jiří MOSKALÍK, ed. *Energie z biomasy IX: sborník příspěvků ze semináře* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2008, 93 -

97 [cit. 2019-05-02]. ISBN 978-80-214-3803-3. Dostupné z: http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/145_1_1/

[16] *Termochemická konverze biomasy* [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/211/17219.pdf

[17] *ČSN EN ISO 17225-1 (838202) A Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv*. Část 1, Obecné požadavky = Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Part 1, General requirements. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015

[18] HRDLIČKA, Jan. Vlastnosti alternativních pelet a problematika emisí persistentních látek při jejich spalování = Alternative Pellet Characteristics and Problems with Persistent Substances Emission during their Combustion. *Vytápění větrání instalace* [online]. **17**(5), 235-239 [cit. 2019-05-03]. ISSN 1210-1389. Dostupné z: http://www.stpcr.cz/?download=articles/vvi-2008-05_s235.pdf.

[19] KOLONIČNÝ, Jan, Jiří HORÁK a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. *Kotle malých výkonů na pevná paliva* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2019-05-02]. ISBN 978-80-248-2542-7. Dostupné z: http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf

[20] Negativní vlivy energetického využití biomasy - emise. In: LISÝ, Martin a Marek BALÁŠ. *Energie z biomasy V: sborník příspěvků ze semináře* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2006, 21 - 26 [cit. 2019-05-03]. ISBN 80-214-3310-8. Dostupné z: http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetickeho-inzenyrstvi/energie-z-biomasy-v-rok-2006

[21] *Zkušenosti fy PONAST se spalováním alternativních paliv: Technologické trendy při spalování pevných paliv* [online]. Blansko, 2010 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://www.iczt.cz/cs/doc/sem29.pdf

[22] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. *"Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy": studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy"* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2019-05-16]. ISBN 978-80-248-1426-1. Dostupné z: http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/tech.pdf

[23] SKOPEC, Pavel, Jan HRDLIČKA, František HRDLIČKA, Tomáš DLOUHÝ a Matěj VODIČKA. Prototyp roštového kotle pro spalování rostlinných pelet. In: VENCÚRIK PITUKOVÁ, Veronika a Martin LISÝ, ed. *Energie z biomasy XVIII: Sborník příspěvků z konference* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2017, 112 - 118 [cit. 2019-05-19]. ISBN 978-80-214-5584-9. Dostupné z: www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetickeho-inzenyrstvi/energie-z-biomasy-xviii-rok-2017

[24] MÍKA, Martin, Pavlína VOLÁKOVÁ, Břetislav KLÁPŠTĚ, Ondřej JANKOVSKÝ a Vladimír VERNER. Jak potlačit spékání biomasového popela?. *Biom.cz* [online]. 28.11.2011 [cit. 2019-05-20]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela

[25] JEVIČ, Petr a Zdeňka ŠEDIVÁ. *Biopaliva z rostlinné biomasy jako zdroj energie* [online]. Praha: VÚZT [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://svt.pi.gin.cz/vuzt/poraden/doporuc/energet/jevic/jevic.pdf

[26] *Ralsko pelet* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: http://ralskopelet.cz/comoznanevite.html

[27] Servisní příručka automatického kotle. *Dakon* [online]. Krnov: Bosch Termotechnika [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.dakon.cz/wp-content/uploads/2018/05/Servisni-prirucka_FB2-Automat.pdf

[28] POLÁK, Martin a Jan HRDLIČKA. Výsledky spalování ovsa v kotli verner A25. In: LISÝ, Martin, Marek BALÁŠ a Jan BOGDÁLEK, ed. *Energie z biomasy VII: sborník příspěvků ze semináře* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2007, 169 - 174 [cit. 2019-05-03]. ISBN 978-80-214-3542-1. Dostupné z: http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetickeho-inzenyrstvi/energie-z-biomasy-vii-rok-2007

[29] Devices for burning biomass. In: *SlideServe* [online]. 26 Jul 2014 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.slideserve.com/salali/devices-for-burning-biomass

[30] EkoScroll beta s otočnou komorou hořáku: návod na použití a záruční list. *EcoScroll* [online]. Žďár nad Sázavou: Ekogalva [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://ekoscroll.cz/wp-content/uploads/2017/09/N%C3%A1vod-Beta-EcoMax.pdf

[31] HORÁK, Jiří, Lubomír MARTINÍK, Kamil KRPEC, Petr KUBESA, Jiří DVOŘÁK, František HOPAN, Zuzana JANKOVSKÁ a Vendula DRASTICHOVÁ. *Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě* [online]. 18.3.2013 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope

[32] *ČSN EN 303-5 (075303) A 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 = Heating boilers. Part 5, Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[33] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II: spalování v malých zdrojích tepla* [online]. Krnov: LING Vydavatelství, 2011 [cit. 2019-05-02]. ISBN 978-80-904914-1-0. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/1-text-ii.pdf

[34] *Ochrana ovzduší* [online]. Ostrava [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~lih90/_soubory/oo/10-01.pdf

[35] Oxidy dusíku (NOx/NO2). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf

[36] BRENNER, Otakar a Josef CIZNER. Korozní problémy při spalování biomasy a komunálního odpadu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 07.05.2013, **2013**(5), 88

[cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/korozni-problemy-pri-spalovani-biomasy-a-komunalniho-odpadu.html

[37] SODOMKA, Waltr a Veronika BUKOVÁ. *Dehtování komínů při provozu nízkoemisních kotlů na tuhá paliva* [online]. 19.5.2017 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/kominy-a-kourovody/15782-dehtovani-kominu-pri-provozu-nizkoemisnich-kotlu-na-tuha-paliva

[38] KARTÁK, Jan. *Vznik polycyklických aromatických uhlovodíků* [online]. 3.2.2004 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/1808-vznik-polycyklickych-aromatickych-uhlovodiku

[39] VÁŇA, Jaroslav. Spalování biomasy a tvorba PCDD/F. *Biom.cz* [online]. 21.2.2002 [cit. 2019-05-02]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://biom.cz/index.shtml?x=71291

11 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A	Popelovina	-
C	obsah uhlíku	-
D	Průměr	mm
G	hmotnost paliva	kg
h	Hořlavina	%
H	obsah vodíku	-
L	Délka	mm
m	Hmotnost	g
O	obsah kyslíku	-
p_{atm}	atmosférický tlak	Pa
p_c	tlak plynu v plynoměru	Pa
Q^i_r	Výhřevnost	MJ/kg
Q_s	spalné teplo	kJ/kg
r	výparné/kondenzační teplo vody	kJ/kg
S	obsah síry	-
t_c	teplota plynu v plynoměru	°C
V	vodní hodnota kalorimetru	kJ/kg
v	rychlost proudění spalin	m/s
V_s	objem nasávaných spalin	m^3/min
$V_{s,n}$	objem suchých spalin za normálních podmínek	m^3
W	Voda	-

	Horní indexy
d	suchý vzorek
daf	suchý vzorek bez popele
r	původní vzorek
ref	referenční hodnota

	Zkratky
Al_2O_3	oxid hlinitý
C	Uhlík
CaO	oxid vápenatý
CaO	oxid vápenatý

CO	oxid uhelnatý
Fe_2O_3	oxid železitý
H	vodík
K	draslík
K_2O	oxid draselný
Mg	hořčík
MgO	oxid manganatý
N	dusík
N_2O	oxid dusný
N_2O_3	oxid dusitý
N_2O_5	oxid dusičitý
Na	sodík
Na_2O	oxid sodný
NO	oxid dusnatý
NO_2	oxid dusičitý
NO_x	oxidy dusíku
O	kyslík
OGC	organický plynný uhlík
P	fosfor
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCDD	polychlorované dibenzodioxiny
PCDF	polychlorované dibenzofurany
PM_{10}	částečky o aerodynamickém průměru do 10 μm
$PM_{2,5}$	částečky o aerodynamickém průměru do 2,5 μm
POP_s	persistentní aromatické polutanty
PZL	plynné znečišťující látky
S	síra
Si	křemík
SiO_2	oxid křemičitý
TiO_2	oxid titaničitý
TZL	tuhé znečišťující látky

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Seegerova metoda [15] ... 21
Obrázek 2 Roštové ohniště se dvěma ohnisky hoření [16] ... 23
Obrázek 3 Porovnání emisí NO_x a TZL [21] ... 25
Obrázek 4 Schéma retortového hořáku [27] ... 28
Obrázek 5 Hořák s pohyblivým roštem [29] ... 29
Obrázek 6 Hořák s otočnou komorou [30] ... 29
Obrázek 7 Vliv přebytku vzduchu na CO [19] ... 31
Obrázek 8 Srovnání výhřevnosti podle různých vzorců ... 36
Obrázek 9 Kotel s hořákem na čelní straně ... 37
Obrázek 10 Kotel s hořákem na boční straně ... 37
Obrázek 11 Vlevo filtr před měřením, vpravo filtr po měření ... 38
Obrázek 12 TESTA FID 2010T ... 39
Obrázek 13 SIEMENS ULTRAMAT 23 ... 39
Obrázek 14 Měření koncentrací PZL I ... 41
Obrázek 15 Měření koncentrací PZL II ... 41
Obrázek 16 Měření koncentrací PZL III ... 42
Obrázek 17 Měření koncentrací PZL I ... 44
Obrázek 18 Měření koncentrací PZL II ... 45
Obrázek 19 Měření koncentrací PZL III ... 45
Obrázek 20 Měření koncentrací PZL IV ... 46

13 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Energetické a růstové parametry různých druhů biomasy [3] 18
Tabulka 2 Požadavky vybraných pelet [12] 20
Tabulka 3 Typické hodnoty prvků v hořlavině pro vybrané plodiny [17] 24
Tabulka 4 Typické hodnoty prvků v popelovině pro vybrané plodiny [17] 26
Tabulka 5 Teploty tavitelnosti popelovin vybraných pelet z biomasy [18] 27
Tabulka 6 Mezní hodnoty emisí [32] 30
Tabulka 7 Emise PCDD/F při spalování různých biopaliv [39] 32
Tabulka 8 Hrubý rozbor vybraných paliv 34
Tabulka 9 Hořlavina v původním vzorku (r) 34
Tabulka 10 Hořlavina v suchém vzorku (d) 34
Tabulka 11 Hořlavina v suchém vzorku bez popele (daf) 35
Tabulka 12 Výhřevnost vzorků podle různých vzorců 35
Tabulka 13 Absolutní rozdíl výhřevností oproti obecnému vzorci 36
Tabulka 14 Podmínky měření TZL - 1 39
Tabulka 15 Průměr hodnot z jednotlivých měření 40
Tabulka 16 Přepočet plynných znečišťujících látek z ppm na mg/m^3 40
Tabulka 17 Přepočítané hodnoty na referenční kyslík 40
Tabulka 18 Podmínky měření TZL - 2 43
Tabulka 19 Průměrné hodnoty z jednotlivých měření 43
Tabulka 20 Přepočet plynných znečišťujících látek z ppm na mg/m^3 43
Tabulka 21 Přepočet hodnot na referenční kyslík 44