VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

EMISE KOTLŮ NA TUHÁ PALIVA

EMISSIONS OF SOLID FUEL BOILERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JAN GARDAVSKÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. OTAKAR ŠTELCL
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Gardavský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Emise kotlů na tuhá paliva

v anglickém jazyce:

Emissions of solid fuel boilers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

-Rešerše- Emise z kotlů na tuhá paliva
-Základní tepelné výpočty a možnosti optimalizace užitných vlastností
-Praktické měření parametrů kotle

Cíle bakalářské práce:

Zjištění vlivu různých druhů paliv na složení emisí u odhořívacího kotle Slokov SL 22D

Seznam odborné literatury:

Rybín,M.:Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích, SNTL Praha 1978
Budaj,F.:Parní kotle, skripta VUT 1995
Norma ČSN EN 13229
www.biom.cz
www.tzb-info.cz

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Otakar Štelcl

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.10.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část se zabývá rozdělením používaných paliv, rozdělením kotlů na tuhá paliva a přiblížením norem pro posuzování emisí. Druhá část se zabývá měřením a vyhodnocením kotle Slokov Variant SL 22D. Nejprve jsou přiblíženy základní výpočty účinnosti. Potom už se práce zabývá postupem a výsledky měření kotlů na tuhá paliva.

Klíčová slova

Kotel na tuhá paliva, emise, ČSN EN 303-5, ČSN EN 13200, účinnost, tepelné ztráty, Slokov variant

Abstract

The thesis is divided into two main parts. The first part deals with the distribution of fuels used, the distribution of solid fuel boilers and zoom standards for the assessment of emissions. The second part deals with the measurement and evaluation of boiler Slokov Variant SL 22D. First, we describe the basic calculations of efficiency. After that, it deals with the procedure and results of boilers for solid fuels.

Keywords

Boiler, heat loss, stoves efficiency, combustion of gasses, ČSN EN 303-5, ČSN EN 13200

Bibliografická citace

GARDAVSKÝ, J. *Emise kotlů na tuhá paliva.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Otakar Štelcl.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze zdroje a podklady uvedené v přiloženém seznamu literatury.

V Brně dne …….. Podpis…….

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu ing. Otakaru Štelclovi za odborné vedení, vstřícnost a čas, který mi věnoval připsaní bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod ... 9
2. Paliva ... 10
2.1 tuhá paliva ... 10
2.1.1 Černé a hnědé uhlí ... 10
2.1.2 Uhelný koks ... 11
2.1.3 Biomasa ... 11
2.2 Kapalná paliva ... 14
2.3 Plynná paliva ... 14
3. Kotle na tuhá paliva ... 15
3.1 kotle na dřevo ... 15
3.2 automatické kotle ... 16
3.3 kotle na uhlí a koks ... 16
4. Normy a předpisy pro provoz kotlů na tuhá paliva ... 17
4.1 Norma EN 303-5 ... 17
4.2 Vyhláška č. 205/2009 Sb. ... 19
5. Měření kotle na tuhá paliva ... 20
5.1 Kotel na tuhá paliva ... 20
5.2 Schéma měřícího úseku ... 21
6. Měřící přístroje ... 22
6.1 Vlhkoměr dřeva WHT 770 ... 22
6.2 MRS analyzátor vlhkosti ... 22
6.3 Teploměr digitální M 305 ... 23
6.4 Tahoměr ... 24
6.5 Digitální váha ECG ... 24
6.6 Analyzátor spalin Infralyt 5000 ... 25
7. Základní výpočty účinnosti ... 26
7.1 Přímá metoda ... 26
7.2 Nepřímá metoda ... 27
7.2.1 Poměrné ztráty komínové ... 27
7.2.2 Poměrné ztráty plynným nedopalem ... 27
7.2.3 Tepelné ztráty sdílením tepla do okolí ... 27
7.2.4 Poměrné ztráty mechanickým nedopalem ... 27
7.2.5 Koncentrace CO ... 27
7.2.6 Pomocné výpočty ... 27
8. Měření parametrů kotle ... 28
8.1 Použité palivo ... 28

8.2 Průběh měření 29
8.3 Měření číslo 1 29
8.4 Měření číslo 2 33
8.5 měření číslo 3 37
9. Závěr 42

1. Úvod

Oheň, hlavně jeho síla je známa už od pravěku. Je jedním z pilířů civilizace. Využíván byl jako zdroj světla, ochrana před predátory, k úpravě pokrmů a hlavně na vytápění obydlí. Stal se každodenním a hlavně potřebným společníkem člověka.

Nejdříve byl oheň udržován v otevřených ohništích v místech, kde ohřál nejvíce osob a kde osvětlil největší plochu. Později kvůli problémům s kouřem v jeskyních si lidé začali stavět umělá obydlí speciálně navržená pro snadnější odvod zplodin. Oheň byl přesunut doprostřed místnosti a kouř vycházel dírou ve stropě. Později pro velké ztráty se rozhodli lidé umístit nad ohniště komíny a tím zamezit odvodu tepla dírou ve stropě. Postupem času se ohniště začínaly uzavírat a přesunuly se ke zdem obydlí. Stavěly se zděné, kachlové nebo železné kamna. V dnešní době, kvůli ušetření prostoru se začínají hojně používat krbové vložky v obývacích pokojích, které jsou zabudovány do stěn domů. Avšak centrální topení je stále hlavně vytápěno kotlem z oddělených části domů, většinou kotelen.

V České republice je nejpoužívanější palivo pro vytápění rodinných domů zemní plyn. Druhé místo patří hnědému a černému uhlí, pak lidé topí dřevem a v neposlední řadě se hojně využívá i elektrická energie na vytápění domácností.

Tato bakalářská práce má přiblížit rozdělení kotlů na tuhá paliva, a vyhodnotit měření na kotli Slokov Variant SL 22D.

2. Paliva

Paliva můžeme rozdělit podle konzistence na několik typů:

- tuhá paliva - Jsou nejčastější a nejrozšířenější druh paliv u nás. Díky cenové dostupnosti je lidé stále využívají, i když jsou hodně neekologické. Zdlouhavá je i příprava paliva před topením. Patří zde uhlí černé i hnědé, koks a biomasa (dřevo, štěpky, pelety)
- kapalná paliva - Jsou nejnáročnější zdroje tepla ze všech paliv. Používají se na odlehlých, špatně přístupných místech. Musí se většinou dovážet na dlouhé vzdálenosti a poté bezpečně skladovat. Mezi kapalná paliva patří topné oleje nebo nafta.
- plynná paliva - V naší republice hojně rozšířený druh. Díky rozvětvené síti plynovodů se palivo lehce dostane do domů bez nutnosti zásahu zvenčí. Jedná se o velmi komfortní způsob vytápění. Palivo je obvykle zemní plyn, svítiplyn a nově hodně diskutovaný břidlicový plyn.

2.1 tuhá paliva

Rozdělují se na fosilní paliva (uhlí, koks) a obnovitelné zdroje (biomasa). Tuhými palivy topí nejvyšší počet domácnosti v České republice. Nejčastěji se používá kusové dřevo a hnědé uhlí, z důvodu lehké dostupnosti a nízké ceny. Obecně topení tuhými palivy je neekologické a špinavé. Nyní se ale snažíme pomocí moderních kotlů, krbů, či kamen snížit vypouštěné emise do ovzduší. Mezi nejekologičtější paliva bych zařadil dřevo, štěpku, pelety nebo slámu.

2.1.1 Černé a hnědé uhlí

Černé i hnědé uhlí vzniklo usazením hornin a ekologických zbytků v průběhu prvohor a druhohor. Po objevení se používalo jako palivo s dobrými vlastnostmi. Průmyslová revoluce jeho těžbu rozvinula a dostala uhlí na samý vrchol používaných paliv. Používalo se v autech, lokomotivách, lodích, domech i elektrárnách. V dnešní době se jeho používání díky ekologické zátěži omezuje pouze na výrobu železa a elektřiny (ČEZ u nás v současné době provozuje 15 uhelných elektráren, které vyrábí 57% veškeré energie). V domácnostech se uhlí používá už jen sporadicky, většinou na vesnici. Po jeho nedokonalém spáleni v kotli dochází k velkému znečištění vzduchu, zejména prachem a sírou. Spalování se dá výrazně zlepšit nákupem drahých, automatických kotlů na uhlí. U nás se černé uhlí těží nejvíce v Ostravsko - Karvinské pánvi a hnědé v Mostecké nebo Sokolovské pánvi. [1]

Obrázek 1: hnědé a černé uhlí [2]

2.1.2 Uhelný koks

Koks vzniká v koksárnách pyrolýzou černého uhlí při vysoké teplotě nad 1000°C bez přístupu vzduchu. Používá se výhradně uhlí s nízkým obsahem síry. Koks z tohoto uhlí je pórovitý, tvrdý a do šeda zbarvený. V ojedinělých případech může koks vzniknout i v přírodě, v místech kde uhelné sloje přišly do styku se žhavým magmatem. Koks má větší výhřevnost než uhlí.[3]

Palivo	Výhřevnost [MJ/kg]	Cena[Kč/100kg]
Hnědé uhlí	11,8 - 17,1	270
Černé uhlí	15,6 - 22,6	575
Koks otopový	27,5 - 29,6	939

Tabulka 1: výhřevnost a cena paliv[4]

2.1.3 Biomasa

Biomasa je podle vyhlášky 252/2000 sb. definována jak Rostlinný materiál, který lze použít jako palivo pro účely využití jeho energetického obsahu, pokud pochází ze zemědělství, lesnictví nebo z potravinářského průmyslu. To řadí biomasu do zdrojů obnovitelné energie, které jsou i velmi ekologické.

Mezi druhy biomasy patří, dřevo + jeho odpad, sláma, čistírenské kaly, a nebo speciálně pěstované, rychlerostoucí plodiny šťovík, konopí, topol. Díky obnovitelnosti a menší zátěži na životní prostředí nahrazuje biomasa klasická fosilní paliva (černé a hnědé uhlí, ropa, lignit). Existuje mnoho způsobu spalování biomasy. Výběr té nejvhodnější záleží na místních kritériích, jako je dostupnost, cena, spolehlivost, čí vliv na životní prostředí. Mezi základní způsoby využití biomasy patří:

- výroba tepla přímým spalováním v topeništích (štípané dřevo, štěpky, sláma atd.)
- přeměna paliva na účinnější druhy (pelety, brikety, bioplyn, bionafta atd.)

Nejčastěji používané druhy biomasy:

Dřevo, tradiční a nejvíce používané palivo ze všech dostupných. Využívá se hlavně ke spalovaní v kotlích a krbech. Nejčastěji je nasekané na menší kusy, které se vejdou do pece. Dřeva existuje velmi hodně typů. Rozděluje se na listnaté nebo jehličnaté. Dřevo z listnatých stromu je tvrdší, má větší výhřevnost i déle vydrží. Naopak dřevo z jehličnanů je většinou měkké, a rychle se spálí. Mezi nejvíce používaná tvrdá dřeva patří buk, dub, bříza, javor nebo jasan. Naproti tomu smrk, borovice čí modřín jsou měkká dřeva.

Obrázek 2: štípané dřevo [5]

Dřevo můžeme pořídit ve více variantách. K dispozici je suché nebo mokré, naštípané, zkrácené nebo neštípané. Nejlevnější je mokré neštípané dřevo, ale to musíme dále zpracovat, než s ním budeme moci topit. Dřevo se musí poštípat, nařezat, poté uložit a nechat minimálně rok vysušit. Pokud nemáme možnosti nebo čas na přípravu dřeva volíme nákup již suchých naštípaných polen, připravených ihned k topení.

Tvrdé dřevo – dub, buk, habr, javor, jasan, akát	Kč/ prm	Kč/ prms
1 m neštípaná polena	1290,-	
33 cm nebo 50 cm neštípaná polena	1390,-	
štípané 33 cm	1490,-	1050.-
štípané 50 cm	1490,-	1050.-
Měkké dřevo – borovice, smrk, topol, olše	**Kč/ prm**	**Kč/ prms**
1 m neštípaná polena	1090,-	
33 cm nebo 50 cm neštípaná polena	1150,-	
štípané 33 cm	1290,-	850.-
štípané 50 cm	1290,-	850.-
Bříza	**Kč/ prm**	**Kč/ prms**
1 m neštípaná polena	1290,-	
33 cm nebo 50 cm neštípaná polena	1390,-	
štípaná 33 cm	1450,-	1000.-
štípaná 50 cm	1450,-	1000,-

Tabulka 2: srovnání cen dřeva [6]

Štěpka je nově nastupující, levné palivo, které je čistým zdrojem energie. Může jít o odpad z katru, truhlářské výroby, prořezaných větví, kácení stromů nebo také při rekonstrukci střechy či dřevěného plotu. Aby mohl být tento odpad nazýván štěpkou, musí se použít stroj (tzv. štěpkovač). Ten slouží k rozemletí větších kusů dřeviny na malé štěpky. Díky mobilním strojům se dá štěpka vyrobit hned na místě kde je odpad, a proto se nemusí nikam převážet. Jelikož se jedná o odpad, je štěpka velice levná. Pokud drtíme syrové větve nebo nově pokácené stromy, je zapotřebí štěpku řádně vysušit. Máme několik možností jak na to. Můžeme použít jutové pytle, které dáme do dobře větraného prostoru. Při dobrých povětrnostních podmínkách, můžeme se štěpkou topit již měsíc po nadrcení. pokud je však vyrobena ze suchého materiálu, lze se štěpkou topit ihned po zakoupení.

Obrázek 3: dřevěná štěpka, odpadní, odkorněná [7]

V poslední době, díky rostoucí ceně štěpky, se začínají pěstovat speciální stromy jenom pro výrobu štěpky. Nejlepší a u nás nejvíce pěstované jsou rychle rostoucí japonské topoly. Ty se sadí do plantáží a následně se strojově sklízí. Výnosnost štěpky z 1 Ha je cca. 35 tun každé dva roky.

Štěpka	Původ	Cena [Kč/m^3]
Mokrá	Z lesních zbytků	171
Sucha	Ze zpracování dřeva na pile	270
Mokrá, vlhkost 40%	Z tvrdého dřeva	450
Suchá	Z měkkého dřeva + kůra	60 - 138

Tabulka 3: přehled cen štěpky [8]

Pelety jsou granulované palivo určené pro spalování v technicky přizpůsobených kotlích k tomu určeným. Vyrábí se z pilin na peletizačním lisu při velkém tlaku a teplotě. Díky tomu se z pilin uvolňuje pryskyřice a ta je pojí dohromady. Pelety mají délku do 45 mm a průměr 4 nebo 6 mm, a proto se používají v automatických kotlích na pelety. Jejich výhřevnost je vysoká, srovnatelná s hnědým uhlím. Avšak vytápění je velmi ekologické a šetrné k životnímu prostředí.

Obrázek 4: více druhů pelet [9]

2.2 Kapalná paliva

Patří zde topná nafta, lehké topné oleje nebo oleje z řepky. Kapalná paliva se používají v místech, kde je nevýhodné nebo nemožné používat paliva tuhá. Většinou jsou to místa bez inženýrských sítí, mobilní domy, či obydlí daleko od měst a obcí. Hlavní výhoda kapalných paliv je jejich výhřevnost. Ta se pohybuje okolo 42MJ/kg. Další výhodou i nevýhodou je skladování. Skladování je výhodné v tom, že když naplníme zásobní nádrž, vydrží nám u kotle téměř celý rok bez nutnosti obsluhy. Ale problémem těchto nádrží je, že je musíme bezpečně umístit v blízkosti kotlů. Celkově se topení kapalnými palivy považuje za ekologické, i když je zdrojem skleníkových plynů. [10]

2.3 Plynná paliva

Jedná se o fosilní paliva na bázi methanu. Zařazují se zde paliva jako je zemní plyn, svítiplyn, LPG a další technické plyny. Výhřevnost se u plynných paliv pohybuje mezi 16-34 MJ/m^3 Plynná paliva jsou na rozdíl od kapalných výhradně závislá na systému inženýrských. Provoz spalovacího zařízení je velice jednoduchý. Plyn do kotle proudí přes rozvodnou síť a v kotli se spaluje a téměř bez škodlivin se mění na energii. Vytápění je závislé jen na elektrické energii a přívodu plynu. [11]

3. Kotle na tuhá paliva

- kotle na dřevo - jako palivo se používá dřevo stromů zmenšené na špalky, větvičky nebo třísky
- kotle na pelety - palivo do těchto kotlů jsou lisované pelety z pilin nebo hoblin
- kotle na uhlí - v těchto kotlích se spaluje černé i hnědé uhlí ve formě valounů nebo drti
- kotle na koks - určené převážně pro koks, což je uhlí tepelným způsobem zbavené síry a vody, které má vysokou výhřevnost a celkem ekologické spalovaní

Obrázek 5: kotel na tuhá paliva Slokov [15]

3.1 kotle na dřevo

Tyto kotle jsou primárně určeny ke spalování štípaného dřeva, ale lze v nich topit také jinými palivy, jako jsou pelety nebo štěpka. Nabídka kotlů na dřevo je velmi rozsáhlá, proto můžeme rozdělit do více kategorii:

- dle způsobu spalování:

- prohořívací kotle - představují jednoduchý a levný systém kotlů pro domácnosti. U těchto kotlů probíhá spalování v celé délce paliva ve stejnou dobu. Vzduch je nasáván přes rošt a přes celou dávku paliva. Palivo se většinou dávkuje skrz horní dveře a popel je odebírán spodem. Prohořívací způsob je vhodný pro paliva s malým obsahem prchavé hořlaviny.
- odhořívací kotle - jsou rozděleny na více komor, ve kterých probíhá zvlášť zplyňování a konečné spalování. U těchto kotlů jsou plamen a spaliny vedeny dospod nebo do boku. Vzduch je dodáván přes palivo. Spalování v těchto kotlích představuje stabilnější proces, a proto jsou také více účinné než kotle prohořívací.
- zplynovací kotle - nazývané také kotle na bioplyn - V těchto kotlích probíhá vysoce účinné spalovaní na principu generátorového zplynování dřevěných briket, pelet nebo štěpků. Hlavní výhodou těchto kotlů je možnost automatické regulace výkonu pomocí řízeného přivírání nebo otevírání vzduchové klapky. K tomu se používá termostat. Účinnost se pohybuje okolo 81 až 87%.

- dle způsobu obsluhy:

- s ruční obsluhou - Tyto kotle jsou nejjednodušší na konstrukci, avšak mají omezenou možnost regulace. Je nutný neustálý dohled obsluhy. K topení se dají používat vetší kusy méně kvalitního dřeva. V kotlích se většinou nevyužije jejich plný výkon a proto se kotle dusí a zanáší se.

- automatické kotle - Jsou vybaveny zásobníkem paliva s mechanickým podavačem. Automatický regulátor samočinně řídí výkon kotle podle teploty na termostatu. Kotel stačí obsluhovat jednou za pár hodin nebo i za den, to v závislosti na velikosti zásobníku. Značnou nevýhodou je omezené používání paliv, které musí být nejčastěji ve formě pelet, briket nebo štěpků. [12]

3.2 automatické kotle

Jedná se o ekologické topidla určené k spalování pelet, štěpky i jemného uhlí. Jsou to automatické kotle vybavené dávkovačem a zásobníkem paliva. Palivo se nasype do zásobníku, odkud ho podavač podle potřeby dodává do topeniště. Jejich obsluha je velice jednoduchá a nepotřebuje moc obsluhy.

Obrázek 6: kotel na pelety s automatickým podavačem [15]

Pro prvotní zapálení je potřeba vysokoteplotní hořák. Dále už automatika díky jednotlivým senzorům sama reguluje přístup vzduchu, množství paliva, odvod komínových plynů nebo odstraňování popela. Automatika také hlídá nežádoucí jevy jako je zpětné prohoření, vyvedení všech spalin do komína nebo i stav pelet v zásobníku. Díky velké účinnosti kotlů (až 93%) a velké výhřevnosti pelet je jejich spotřeba relativně nízká. [13]

3.3 kotle na uhlí a koks

Kotle na uhlí a koks mají velmi podobné konstrukční parametry. Jsou to jednoduché litinové nebo plechové kotle s tlustou stěnou, protože tyto paliva mají vysokou teplotu hoření. Obecně jsou kotle velmi neekologické, ale lze koupit i automatické kotle s vysokou účinností a nízkou emisivitou.

Tento druh topenišť se v dnešní době používá už jen zřídka ve městech, ale na vesnicích je to pořád rozvinutý typ kotlů. Většinou z důvodu starší vybavenosti kotelen a neekologickému uvažování obyvatel. Tyto kotle také produkují velké množství tuhých zbytků po spalování.

4. Normy a předpisy pro provoz kotlů na tuhá paliva

4.1 Norma EN 303-5

Pro zjištění vlivu různých druhů paliv na složení u kotle Slokov SL 22D, si nejdřív musíme něco říct o emisích a normách, které určují emisní limity. V celé evropské unii se nově vyrobené kotle na tuhá paliva musí před začátkem prodeje certifikovat. Pro zkoušení je v platnosti norma EN 303-5 (kotle do 300 kW). Protože norma byla vydána roku 1999, je už zastarala a emisní limity, které určuje už nestačí dnešním požadavkům na ekologické topení. Proto evropská komise projednala novelizaci normy EN 303-5 a ta by měla být uvedena v platnost od roku 2013.

V České republice platí od roku 1999 norma ČSN EN 303-5, která je totožná s evropskou normou EN 303-5. Ta určuje mezní hodnoty vypouštěných emisí z teplovodních kotlu na tuhá paliva do výkonu 300 kW. Norma popisuje průběh zkoušení kotlů, požadavky na bezpečnost a konstrukční materiály. Dále norma určuje tři třídy přesnosti ve třech zkoumaných oddílech. Hlavní sledovanou škodlivinou je CO, které vzniká nedokonalým spalováním, topením mokrým dřevem nebo dušením kotle (zavření přísunu vzduchu do spalovacího procesu). Dále norma upřesňuje OGC (celkový organický uhlík) a prachové částečky ve spalinách.

Dávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m3N při 10 % O2								
			třída 1	třída 2	třída 3	třída 1	třída 2	třída 3	třída 1	třída 2	třída 3
ruční	biologické	≤ 50	25 000	8 000	5 000	2 000	300	150	200	180	150
		> 50 až 150	12 500	5 000	2 500	1 500	200	100	200	180	150
		> 150 až 300	12 500	2 000	1 200	1 500	200	100	200	180	150
	fosilní	≤ 50	25 000	8 000	5 000	2 000	300	150	180	150	125
		> 50 až 150	12 500	5 000	2 500	1 500	200	100	180	150	125
		> 150 až 300	12 500	2 000	1 200	1 500	200	100	180	150	125
samočinná	biologické	≤ 50	15 000	5 000	3 000	1 750	200	100	200	180	150
		> 50 až 150	12 500	4 500	2 500	1 250	150	80	200	180	150
		> 150 až 300	12 500	2 000	1 200	1 250	150	80	200	180	150
	fosilní	≤ 50	15 000	5 000	3 000	1 750	200	100	180	150	125
		> 50 až 150	12 500	4 500	2 500	1 250	150	80	180	150	125
		> 150 až 300	12 500	2 000	1 200	1 250	150	80	180	150	125

Tabulka 4: mezní emisní hodnoty ČSN EN 303-5 [14]

Z tabulky 4 vyplývá, že hodnoty třídy 1 a 2 nejsou pro ekologické spalování dostačující. Těmto hodnotám odpovídají staré kotle s malou účinností a odhořívacím nebo prohořívacím způsobem spalování. Oproti tomu stojí třída 3, která už má limity nasazeny přísněji a tomu odpovídají automatické kotle nebo zplynovací kotle s ručním plněním paliva. Mimo hodnoty uvedené v tabulce 4 norma určuje taky minimální účinnosti teplovodních kotlů na tuhá paliva. Ta je vztažena v závislosti k jmenovitému výkonu a třídě kotle.

Tyto limity platí v celé evropské unii, ale některé státy (Rakousko, Německo) si limity zpřísnily z důvodu ekologičtějšího spalování a menší zátěže na životní prostředí. Každá země se však zaměřila na rozdílné škodliviny. Zatím co v Německu norma řeší hlavně CO, v Rakousku musí kotle splňovat zpřísněné normy CO a NO_x.

Při referenčním O2 = 10 %			Biogenní		Fosilní	
			Ruční	Automatické	Ruční	Automatické
CO	[mg/m^3_N]	EN 303-5	872 – 18182	872 – 10909	872 – 18182	872 – 10909
		ČR	872 – 18182	872 – 10909	872 – 18182	872 – 10909
		Německo	500 – 1000	500 – 1000	1000	1000
		Rakousko	1682	765	1580	717
OGC		EN 303-5	73 – 1455	58 – 1273	73 – 1455	58 – 1273
		ČR	73 – 1455	58 – 1273	73 – 1455	58 – 1273
		Německo	73 – 1455	58 – 1273	73 – 1455	58 – 1273
		Rakousko	122	61	115	57
NO_x		EN 303-5	—	—	—	—
		ČR	—	—	—	—
		Německo	—	—	—	—
		Rakousko	229	229	143	143
prach		EN 303-5	109 – 145	91 – 131	109 – 145	91 – 131
		ČR	109 – 145	91 – 131	109 – 145	91 – 131
		Německo	60 – 100	60 – 100	90	90
		Rakousko	92	92	86	57
účinnost	[%]	EN 303-5	$47 + 6 \cdot \log Q_n$ až $67 + 6 \cdot \log Q_n$			
		ČR	$47 + 6 \cdot \log Q_n$ až $67 + 6 \cdot \log Q_n$			
		Německo	$47 + 6 \cdot \log Q_n$ až $67 + 6 \cdot \log Q_n$			
		Rakousko	73 – 86			

Tabulka 5: srovnání emisních limitů ve vybraných státech [14]

Nové ekologické požadavky a neustále se vyvíjející strojírenství klade nové požadavky na normu EN 303-5. Proto byla norma inovována a bude uvedena v platnost od roku 2013. V nové formě normy byly zcela vynechány třídy 1 a 2. Třída 3 byla určena jako základní a k ní se přidaly přísnější třídy 4 a 5. Dále byla norma upravena pro kotle až do výkonu 500 kW. Rovněž byly aktualizovány i hodnoty minimální účinnosti kotlů. Tyto úpravy by měly zamezit prodeji starých a neekologických kotlů. V České republice se k této normě připravuje ještě zákon o ovzduší, který se plánuje od roku 2014.

Dávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m3N při 10 % O2								
			třída 3	třída 4	třída 5	třída 3	třída 4	třída 5	třída 3	třída 4	třída 5
ruční	biologické	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 až 150	2 500			100			150		
		> 150 až 500	1 200			100			150		
	fosilní	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 až 150	2 500			100			125		
		> 150 až 500	1 200			100			125		
samočinná	biologické	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 až 150	2 500			80			150		
		> 150 až 500	1 200			80			150		
	fosilní	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 až 150	2 500			80			125		
		> 150 až 500	1 200			80			125		

Tabulka 6: nové emisní limity platné od roku 2013 [14]

Další země Evropské unie také postupně schvalují přísnější zákony pro emisní limity. Nejvíce sledované a také nejpřísněji nastavené budou limity v Německu a Rakousku kde by měly být 2krát až 5krát nižší. [14]

4.2 Vyhláška č. 205/2009 Sb.

V České republice se mimo normy ČSN EN 303-5 používá ještě vyhláška č. 205/2009 Sb., která určuje emisní faktory již v průběhu používání kotlů. Vyhláška dále určuje rozsah a způsob měření emisí znečišťujících látek, zjišťování množství znečišťujících látek výpočtem, postup výpočtu a emisní faktory, dále přípustnou tmavost kouře a měření účinnosti spalování v topeništích do 300kW.

Vyhláška také zavádí pojem emisní faktor. Je to veličina, která vyjadřuje průměrné množství škodlivin vztažené na spálené množství paliva nebo na výhřevnost paliva. Emisní faktor se stanovuje z naměřených údajů a závisí na několika parametrech:

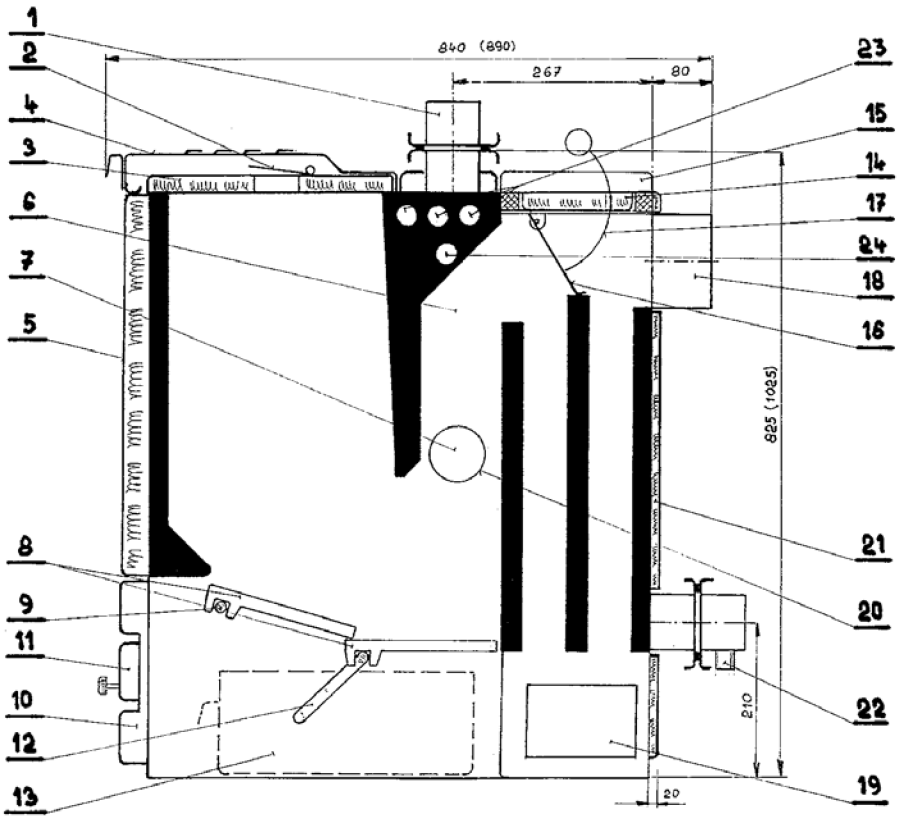
- konstrukci spalovacího zařízení (zplynovací, prohořívací, odhořívací kotle, rozvod vzduchu či velikost spalovací komory)
- způsoby dopravy paliva (automaticky, ručně)
- provozních podmínkách (teplota okolí, kvalifikace obsluhy)
- parametrech paliva (druh, vlhkost, složení)

K zpracování emisních bilancí je v České republice pověřen ČHMU. Ten k posuzování používá emisní faktory hlavních škodlivých látek (CO, NO_x, TZL, SO_2). Dále emisní faktory perzistentních organických populantů (POP), polyaromatických uhlovodíků (PAU) a těžkých kovů (TK). ČHMU měří a vyhodnocuje jednotlivé emise a podle toho nastavuje normy emisních limitů. [16]

5. Měření kotle na tuhá paliva

5.1 Kotel na tuhá paliva

K měření emisí v kotlích na tuhá paliva jsme s vedoucím práce vybrali kotel SLOKOV Variant SL 22D. Tento Ocelový kotel je svařen z trubek a plechů. Kotel je vertikálně rozdělený na tři části: přikládací šachtu, spalovací komoru a teplovodní výměník. Pod spalovací komorou je pohyblivý dvoudílný rošt, který lze ovládat pákou na straně kotle. Dále je na horní straně výměníku je manuální zatápěcí klapka. Kouř je odváděn kouřovodem, který je v ose kotle na zadní straně. Kotel stojí na betonové podlaze v místnosti určené k topení.



Obrázek 7: schéma kotle na tuhá paliva Slokov Variant SL 22D [15]

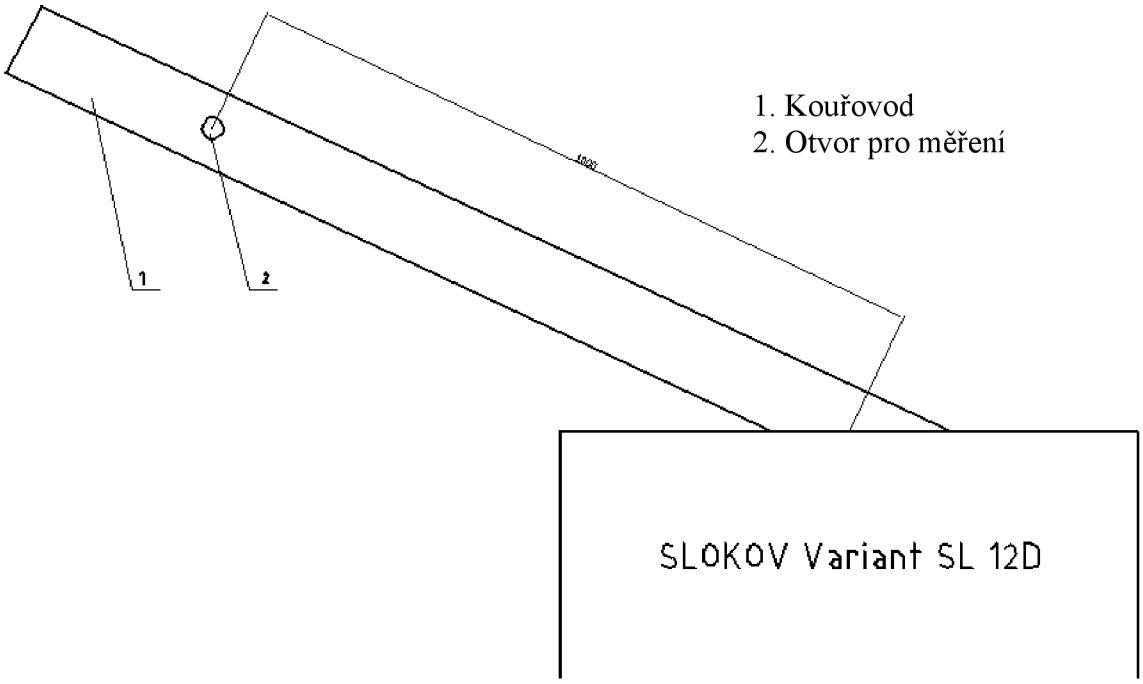
Popis:

1. Příruba
2. Klapka spalovacího vzduchu
3. Přikládací dvířka
4. Kryt přikládacích dvířek
5. Přední kryt
6. Spalovací komora
7. Klapky terciálního vzduchu
8. Litinový rošt
9. Držák roštu
10. Popelníková dvířka
11. Klapka popel. dvířek
12. Roštovní páka
13. Popelník
14. Víko výměníku
15. Kryt výměníku
16. Zatápěcí klapka
17. Táhlo klapky
18. Kouřovod
19. Sazová dvířka
20. Trubka terciálního vzduchu
21. Zadní kryt
22. Napouštěcí kohout
23. Vychlazovací smyčka
24. Tepelný regulátor výkonu

Při spalování se do kotle přivádí vzduch na třech místech. Primární vzduch proudí přes rošt ze spodní části do spalovací komory a je ovládaný ručně. Sekundární přívod je ovládaný automaticky podle teploty pomocí tepelného regulátoru výkonu TRV a je přiváděn do kotle přes dvířka přikládací šachty. Terciální vzduch je přiváděn do kotle z boční strany do míst za spalovací proces. [15]

5.2 Schéma měřícího úseku

Měření probíhalo v kouřovodu. Sondy jsme umístili do otvoru po mechanickém teploměru spalin. Do otvoru jsme najednou našroubovali pomocí závitu trubku analyzátoru spalin a k tomu jsme ještě přidali čidlo teploměru. Po odměření hodnot byla ještě trubka vyměněna za tyčinku tahoměru. Měřící otvor je navrtán cca. metr od kotle. Snímače byly v kouřovodu umístěny do 2/3 jeho průměru.



Obrázek 8: schéma měřícího úseku

6. Měřící přístroje

K měření jsme použili několik speciálních přístrojů určených k měření vlhkosti, tahu komína, teploty, hmotnosti a emisi.

6.1 Vlhkoměr dřeva WHT 770

Je to přenosný hrotový, odporový vlhkoměr. Přístroj slouží k určení vlhkosti dřeva v závislosti na teplotě. Měření probíhá tak, že do čerstvě rozštípnutého dřeva se zabodnou oba konce měřáku. Jelikož je dřevo nesouměrné, provedli jsme více měření a udělali aritmetický průměr.

Rozsah měření vlhkosti:	Chyba měření vlhkosti:	Rozsah teplotní kompenzace:	Rozsah měření teploty:
5 - 90%	1% do 60% H_2O 3% nad 60% H_2O	0 - 90°C	0 - 110°C

Tabulka 7: parametry vlhkoměru WHT 770

Tabulka 8: vlhkoměr WHT 770

Přístroj udává hodnoty vlhkosti pro smrkové dřevo, proto ostatní druhy dřeva musíme přepočítat podle tabulky, které je součásti vlhkoměru.

Převodní tabulka pro korekci vlhkosti běžných druhů dřevin

Druh dřeva	Vlhkost v %																	
Naměřená hodnota (Smrk)	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0
Skutečná hodnota																		
Dub bílý	7.2	8.0	8.8	9.6	10.5	11.5	12.4	13.5	14.5	15.6	16.5	17.3	18.3	19.3	20.2	21.2	22.1	23.1
Buk	6.7	7.4	8.1	9.0	10.0	11.0	12.2	13.2	14.0	14.7	15.4	16.3	17.1	17.8	18.8	20.3	22.0	23.9
Jedle bílá	8.8	9.7	10.6	11.4	12.3	13.1	14.1	15.1	16.2	17.3	18.1	19.1	20.0	21.1	22.1	23.0	24.0	24.8
Jasan bílý	7.6	8.2	9.0	9.8	10.7	11.5	12.4	13.2	13.9	14.7	15.6	16.4	17.2	17.9	18.7	19.5	20.3	20.9
Lípa	7.5	7.9	8.8	9.5	10.3	11.1	12.0	13.1	14.0	14.9	15.9	16.9	17.8	18.7	19.6	20.6	21.5	22.2
Bříza	8.9	9.8	10.6	11.6	12.5	13.4	14.4	15.4	16.4	17.4	18.4	19.5	20.5	21.6	22.6	23.6	24.6	25.7
Mahagon	8.2	9.2	10.3	11.3	12.3	13.2	14.0	14.8	15.7	16.5	17.2	18.1	18.8	19.5	20.2	20.9	21.7	22.3
Javor	8.8	9.5	10.0	10.8	11.7	12.5	13.4	14.3	15.2	16.1	17.1	18.2	19.2	20.3	21.2	22.4	23.7	24.6
Vlašský ořech	8.5	9.4	10.3	11.2	12.1	13.0	13.9	14.8	15.7	16.5	17.3	18.3	19.2	20.1	20.9	21.8	22.7	23.3
Borovice	8.6	9.6	10.7	11.8	12.8	13.8	14.8	15.8	16.8	17.8	18.7	19.7	20.6	21.5	22.4	23.3	24.1	24.9
Jilm americký	7.6	8.1	8.7	9.1	9.8	10.4	11.0	11.7	12.5	13.4	14.1	14.9	15.6	16.3	17.0	17.7	18.6	19.0
Modřín	8.7	9.7	10.8	11.8	12.7	13.6	14.6	15.6	16.5	17.5	18.4	19.4	20.4	21.3	22.1	23.1	23.9	24.8
Olše	8.9	9.9	10.8	11.8	12.9	13.8	14.8	15.8	16.9	18.0	18.8	19.8	20.9	22.0	22.9	23.8	24.7	25.6
Topol	8.4	9.5	10.6	11.6	12.7	13.8	14.8	15.9	17.0	17.9	18.7	19.7	20.7	21.6	22.6	23.6	24.7	25.9

Obrázek 9: převodní tabulka

6.2 M

Měření probíhá ovolné

množství paliva a to zváží a pak se zahřeje na teplotu 120°C a měří se úbytek váhy. Po vysušení vzorku přístroj okamžitě napíše hodnotu vlhkosti.

Rozsah měření vlhkosti:	Rozsah měření hmotnosti:	Rozsah teplotní kompenzace:
0,01 - 100%	0,001 - 124g	30° - 230°C

Tabulka 9: parametry analyzátoru vlhkosti MRS

Obrázek 10: analyzátor vlhkosti MRS

6.3 Teploměr digitální M 305

Přístroj je přenosný teploměr s digitálním výstupem na obrazovku nebo do počítače. Jedná se o kontaktní odporový teploměr. Lze měřit v stupních Celsia nebo Fahrenheita. Měření jsme prováděli ve stupních celsia. Data lze ukládat do paměti nebo je on-line přenášet do počítače.

Rozsah měření při teplotě okolí 0 - 50°C:	Chyba měření při relativní vlhkosti do 80%:
-50 - 1300°C	0,5%

Tabulka 10: parametry digitálního teploměru

Obrázek 11: digitální teploměr

6.4 Tahoměr

Přístroj měří rozdíl tlaků mezi okolím a měřeným místem. Měřící trubice se umístí přímo do kouřovodu. Na mechanické stupnici se ukazuje tlak tahu.

Rozsah měření:	Chyba měření:
0 - 50Pa	0,5Pa

Tabulka 11: parametry tahoměr

Obrázek 12: tahoměr [18]

6.5 Digitální váha ECG

Tento přístroj ECG KV 114 S slouží k vážení paliva potřebného pro měření. Váha byla postavena na vodorovnou plochu, aby nedocházelo k nepřesnostem v měření. Je vybavena digitálním displejem s možností okamžitého nulování.

Rozsah měření:	Nejmenší dílek:	Chyba měření:
0 - 5000g	1g	0,5g

Tabulka 12: parametry digitální váha ECG

Obrázek 13: digitální váha ECG

6.6 Analyzátor spalin Infralyt 5000

Přístroj slouží k měření složení spalin a hodnoty emisí v kouřovodu. K přístroji se připojuje ještě příslušenství na filtraci kouře. Protože přístroj můžou poškodit vysoké teploty a pevné části spalin, musí být přívod spalin filtrován. To je prováděno sérii filtrů a ventilů. Dále je potřeba spaliny chladit pod teplotu 50°C.

Obrázek 14: celkové zapojení měřící soustavy Infralyt 5000

Po zapnutí se přístroj sám zkalibruje. Asi po 6 minutách je připraven k používání. Na přední straně je umístěno několik displejů pro zobrazování naměřených hodnot. V zadní části je vstup a výstup měřícího média, dvojice filtrů a výstup do počítače pro digitální přenos.

Rozsah měření:				
CO	CO2	HC	O2	Lambda
0 - 10% vol.	0 - 20% vol.	0 - 2500ppm vol.	0 - 25% vol.	0 - 9,9999

Tabulka 13: parametry Infralytu 5000

Obrázek 15: filtrační zařízení

7. Základní výpočty účinnosti

Pro získání účinnosti kotlů z měření známe dvě metody: přímá a nepřímá. Toto rozdělení je popsáno v normě ČSN EN 13240. Norma určuje postup měření i výpočtu a třídy účinnosti kotlů na tuhá paliva.

Třída účinnosti	Minimální hodnoty účinnosti [%]
třída 1	80
třída 2	65
třída 3	55

Tabulka 14: rozdělení tříd účinnosti [17]

7.1 Přímá metoda

Metoda je založena na znalosti přesného množství spáleného paliva, jeho kvalitě a výhřevnosti. Samotná účinnost se vypočítá jednoduchým vztahem.

$$\eta = \frac{P_v}{P_p} \quad (1)$$

P_p - příkon, určuje se z množství paliva a jeho výhřevnosti
P_v - výkon kotle se určí z množství ohřátého média a jeho teploty

Přímá metoda není použitelná u všech spalovacích zařízení z důvodu nepřesnosti určování výkonu paliva. Dále metoda neurčuje jaký mají podíl jednotlivé ztráty na účinnost.

7.2 Nepřímá metoda

Tato metoda oproti přímé metodě využívá algoritmus ztrát, a proto je vhodná pro měření všech spalovacích zařízení. Metoda je založena na faktu, že dokonalé spalování má 100% účinnost, a tak se odečítají poměrné ztráty kotle a výjde účinnost kotle.

$$\eta = 100 - (q_a - q_b - q_c)\ [\%] \quad (2)$$

q_a - poměrná ztráta komínová, měří se rozdíl teploty spalin od teploty okolí v kouřovodu a množství spalin
q_b - poměrná ztráta plynným nedopalem
q_c - tepelná ztráta sdílením tepla do okolí, velikost tepla, které se odvede do okolí přes plášť kotle.
q_d - poměrná ztráta mechanickým nedopalem, potřebujeme znát hmotnost popele po spalovani

7.2.1 Poměrné ztráty komínové

$$Q_a = (t_a - t_r) \times \left[\left[(C_{pmd} \times (C - C_r))/(0{,}536 \times (CO + CO_2))\right] + (C_{pmH20} \times 1{,}224 \times \frac{9H + W}{100})\right] \quad (3)$$

$$q_a = 100 \times \frac{Q_a}{H_u} \quad (4)$$

7.2.2 Poměrné ztráty plynným nedopalem

$$Q_b = 12644 \times CO \times \frac{C - C_r}{[0{,}536 \times (CO_2 + CO) \times 100]} \quad (5)$$

$$q_b = 100 \times \frac{Q_b}{H_u} \quad (6)$$

7.2.3 Tepelné ztráty sdílením tepla do okolí

$$Q_c = \sum_{n}^{i} \alpha \times S_i \times (t_{pi} - t_r) \quad (7)$$

$$q_c = 100 \times \frac{Q_c}{H_u} \quad (8)$$

7.2.4 Poměrné ztráty mechanickým nedopalem

$$Q_d = 335 \times b \times \frac{R}{100} \quad (9)$$

$$q_d = 100 \times \frac{Q_d}{H_u} \quad (10)$$

7.2.5 Koncentrace CO

Průměrná hodnota oxidu uhličitého (CO_{avg}) se musí přepočítat na hodnotu CO při určité koncentraci kyslíku ve spalinách. Tato hodnota ($O_{2standart}$) je určena normou na 10%.

$$CO = CO_{avg} \times \frac{21 - O_{2standart}}{21 - O_{2avg}} \quad (11)$$

7.2.6 Pomocné výpočty

$$C_{pmd} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right)^2 + \left(0{,}085 + 0{,}19 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right) - 0{,}14 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right)^2\right) \times \frac{CO_2}{100} + \left(0{,}03 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right) - 0{,}2 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right)^2\right) \times \frac{CO_2}{100}\right) \quad (12)$$

$$C_{pmH20} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{t_a}{1000}\right)^2\right) \quad (13)$$

$$C_r = R \times \frac{b}{100} \quad (14)$$

[17]

8. Měření parametrů kotle

Pro měření emisí v kotlích na tuhá paliva jsme si s vedoucím práce vybrali dva druhy paliva. Pro ekologičtější měření jsme vynechali fosilní paliva a zaměřili se jen na biomasu. K měření jsme použili štípané dřevo a dřevní štěpku. Jednotlivé měření nám má ukázat složení spalin vypouštěných do ovzduší.

8.1 Použité palivo

Nejdříve jsme spalovali štípané dřevo buk lesní a poté dřevěnou štěpku ve dvou velikostech. Štěpka byla jemné a hrubě drcená.

Buk lesní je listnatý strom vyskytující se po celé Evropě. Jeho dřevo je tvrdé a má dobré vlastnosti pro spalování. Proto je také jedním z nejpoužívanějších paliv dřevního typu. Po pokácení a naštípání dřeva, buk rychle vysychá a je vhodný k topení již po 7-9 měsících. Dřevo pro naše měření bylo uskladněno ve formě štípaných polen přibližně rok v prostorách kotelny a bylo dobře vysušeno. Pomocí vlhkoměru dřeva WHT 770 jsme změřili jeho vlhkost, která byla 15,5%H_2O.

Vlhkost	Vodík	Obsah popela	Uhlík	Výhřevnost	Uhlík ve zbytku spalování
W [%hmot.]	H [%hmot.]	R [%hmot.]	C [%hmot.]	H_u [MJ/kg]	b [%]
15,5	6,29	0,51	48,8	17,7	17,73

Tabulka 15: rozbor buku lesního podle (VEC - VŠB - TU) [19]

Dřevěná štěpka se vyrábí drcením nebo mletím odpadního materiálu při kácení lesa, úpravách ploch nebo z dřevovýroby. Je ve formě malých kusu do velikosti 5cm. Štěpka bývá většinou vyráběna z mokrého materiálu, proto se musí dále sušit. Protože však jsou to malé kusy, vysychá rychleji než normální štípané dřevo. Občas se štěpka drtí už ze suchého dřeva (při truhlářské výrobě), proto nepotřebuje již další sušení a je vhodná k okamžitému spalovaní.

Vlhkost	Vodík	Obsah popela	Uhlík	Výhřevnost	Uhlík ve zbytku spalování
W [%hmot.]	H [%hmot.]	R [%hmot.]	C [%hmot.]	H_u [MJ/kg]	b [%]
13,81	5,6	1,36	44,34	16,70	22,90

Tabulka 16: rozbor jemnější štěpky (VŠB - TU)

Vlhkost	Vodík	Obsah popela	Uhlík	Výhřevnost	Uhlík ve zbytku spalování
W [%hmot.]	H [%hmot.]	R [%hmot.]	C [%hmot.]	H_u [MJ/kg]	b [%]
11,20	5,35	1,31	43,90	16,70	21,30

Tabulka 17: rozbor hrubší štěpky (VŠB - TU)

Jemná i hrubá štěpka, použitá při měření, obsahovala kusy suché trávy, šišky, kůru, jehličí a namleté kusy tvrdšího dřeva.

8.2 Průběh měření

Měření emisí kotlů na tuhá paliva jsme prováděli na kotli Slokov Variant SL 22D. Kotel je nainstalován a napojen na teplovodní zásobník. Dále je na kotli připojený tepelný regulátor výkonu TRV, který ovládá přívod sekundárního vzduchu do kotle. Otevírání a zavírání přívodu závisí na teplotě vody, která vychází z kotle do teplovodního zásobníku.

Obrázek 16: regulační ventil TRV

Pro měření jsme měli k dispozici dva druhy paliva. První bylo použito štípané dřevo a dále jsme měřili dřevní štěpku ve dvou velikostech. Při měření jsme zaznamenávali obsah jednotlivých složek spalin, jejich teplotu a nakonec tah komína. Měřili jsme obsah těchto látek: Oxid uhelnatý (CO), Oxid uhličitý (CO_2), Kyslík (O_2). Pro první měření jsme prováděli po dobu 105 minut a druhé dvakrát po hodině.

Nejdříve jsme si změřili vlhkost paliva. U štípaného dřeva jsme použili měřič vlhkosti WHT 770. Měření jsme provedli dvě a pomocí aritmetického průměru nám vyšla vlhkost dřeva. U štěpky jsme museli použít analyzátor vlhkosti MRS.

Poté už jsme nachystali měřící soustavu v kotelně a začali měřit. V návodu k obsluze jsme vyhledali kolik je potřeba paliva na provoz kotle na 2 hodiny. Potřebnou hmotnost jsme naměřili pomocí digitální váhy. Pak jsme zapálili kotel a chvíli hop nechali rozhořet, aby chytil tah a aby se prohřál komín na provozní teplotu. Když kotel hořel a v zásobníku nebylo žádné dřevo, nasypali jsme námi navážené dřevo do kotle a začali s měřením parametrů.

Obrázek 17: zásobník na palivo

8.3 Měření číslo 1

Měření probíhalo po minutě po dobu 105 minut. Při tomto měření bylo použito jako palivo buk lesní. Palivo bylo do kotle dodáno najednou. Hmotnost použitého paliva byla stanovena podle tabulky dle výrobce. Množství dodaného paliva na zkoušku bylo 12,5kg.

čas	T_{spalin}	CO	CO_2	O_2	čas	T_{spalin}	CO	CO_2	O_2
0:01	284	0,15	5,38	9,85	0:54	240	1,32	5,98	9,79
0:02	260	0,19	5,12	10,65	0:55	250	1,25	5,94	9,74
0:03	249	0,26	4,63	11,6	0:56	260	1,23	6,37	8,89
0:04	237	0,25	4,35	12,14	0:57	257	1,2	6,75	8,32
0:05	235	0,24	4,28	12,15	0:58	251	1,1	6,78	8,28
0:06	253	0,21	4,23	12,35	0:59	240	1,16	6,76	8,38
0:07	263	0,24	4,78	11,07	1:00	231	1,22	6,44	8,9
0:08	261	0,2	5,02	10,6	1:01	229	1,24	6,11	9,44
0:09	259	0,18	5,01	10,73	1:02	224	1,21	5,96	9,6
0:10	255	0,15	4,92	10,85	1:03	212	1,11	5,85	9,74
0:11	256	0,15	4,75	11,17	1:04	207	1	5	11,24
0:12	251	0,17	4,83	11	1:05	202	0,81	4,57	11,8
0:13	250	0,15	4,69	11,3	1:06	202	0,74	4,44	12,03
0:14	248	0,16	4,68	11,29	1:07	199	0,66	4,23	12,31
0:15	250	0,15	4,66	11,36	1:08	195	0,67	4,2	12,37
0:16	257	0,15	4,77	11,1	1:09	206	0,66	4,13	12,53
0:17	255	0,15	4,73	11,15	1:10	224	0,97	5,04	10,86
0:18	259	0,15	4,84	10,93	1:11	225	0,97	5,42	10,11
0:19	255	0,11	5,19	10,15	1:12	219	0,86	5,41	10,09
0:20	248	0,11	4,94	10,7	1:13	214	0,76	5,1	10,62
0:21	245	0,15	4,65	11,28	1:14	217	0,74	4,97	10,9
0:22	239	0,2	4,53	11,51	1:15	206	0,74	4,95	10,92
0:23	260	0,3	4,51	11,7	1:16	197	0,77	4,91	11,08
0:24	257	0,16	5,26	10,07	1:17	208	0,79	4,67	11,49
0:25	256	0,15	5,17	10,19	1:18	207	0,78	4,74	11,22
0:26	311	0,14	5,18	10,07	1:19	206	0,68	4,71	11,29
0:27	291	0,11	6,72	7,07	1:20	204	0,6	4,6	11,48
0:28	276	0,13	5,91	8,69	1:21	204	0,52	4,46	11,68
0:29	269	0,15	5,3	9,76	1:22	202	0,49	4,46	11,71
0:30	265	0,15	5,31	9,8	1:23	200	0,41	4,22	12,09
0:31	254	0,16	5,18	10,24	1:24	200	0,37	4,16	12,16
0:32	245	0,18	5,03	10,51	1:25	195	0,33	4,07	12,35
0:33	251	0,23	4,96	10,71	1:26	190	0,35	4,16	12,09
0:34	245	0,23	5,39	9,98	1:27	185	0,34	4,1	12,35
0:35	246	0,28	5,18	10,4	1:28	182	0,4	3,98	12,63
0:36	240	0,31	5,16	10,47	1:29	177	0,45	3,75	13,05
0:37	240	0,33	4,86	11,12	1:30	176	0,48	3,71	13,17
0:38	245	0,32	4,82	11,08	1:31	207	0,5	3,7	13,15
0:39	243	0,3	5,11	10,58	1:32	201	0,57	4,5	11,34
0:40	257	0,28	5,22	10,3	1:33	192	0,6	4,56	11,41
0:41	272	0,16	5,71	9,33	1:34	185	0,59	4,31	11,94
0:42	269	0,2	6,36	8,18	1:35	180	0,6	4,11	12,39
0:43	265	0,21	6,34	8,27	1:36	165	0,52	3,8	12,99
0:44	263	0,31	6,32	8,4	1:37	163	0,49	3,47	13,67

0:45	265	0,32	6,23	8,61	1:38	156	0,49	3,25	14,03
0:46	270	0,38	6,41	8,4	1:39	152	0,48	3,15	14,24
0:47	260	0,35	6,25	8,73	1:40	146	0,49	2,94	14,59
0:48	254	0,35	6	9,11	1:41	148	0,47	2,88	14,66
0:49	254	0,39	5,82	9,42	1:42	136	0,48	2,96	14,64
0:50	254	0,54	6,09	9,12	1:43	136	0,51	2,69	15,02
0:51	243	0,68	6,1	9,15	1:44	131	0,5	2,65	15,05
0:52	264	1,22	6,67	8,46	1:45	125	0,47	2,52	15,31
0:53	238	1,03	7,01	7,87					

Tabulka 18: hodnoty měření č. 1

$T_{mistnost}$ (t_r)	T_{spalin} (t_a)	CO	CO_2	O_2
20	227,21	0,49	4,93	10,97

Tabulka 19: průměrné hodnoty parametrů z měření č. 1

Ukázkový výpočet účinnosti pro měření č. 1:

$$\eta = 100 - (q_a - q_b - q_c) = 100 - (31{,}39 - 6{,}38 - 5{,}93) = 56{,}3\%$$

Poměrné ztráty komínové:

$$Q_a = (227{,}21 - 20) \times \left[\left[\frac{1{,}532 \times (48{,}8 - 0{,}0904)}{0{,}536 \times (0{,}537 + 4{,}93)}\right] + \left(1{,}529 \times 1{,}224 \times \frac{9 \times 6{,}29 + 15{,}5}{100}\right)\right] = 5556{,}43 kJ/kg$$

$$q_a = 100 \times \frac{5556{,}43}{17700} = 31{,}39\%$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem

$$Q_b = 12644 \times 0{,}537 \times \frac{48{,}8 - 0{,}0904}{[0{,}536 \times (4{,}93 + 0{,}537) \times 100]} = 1128{,}65 kJ/kg$$

$$q_b = 100 \times \frac{1128{,}65}{17700} = 6{,}38\%$$

Tepelné ztráty sdílením tepla do okolí

$$Q_c = 20 \times [(0{,}24 \times 0{,}37) \times (69 - 20) + (0{,}51 \times 0{,}37) \times (34 - 20) + (2 \times 0{,}87 \times 0{,}75) \times (35 - 20) + (2 \times 0{,}87 \times 0{,}42) \times (28 - 20) + (2 \times 0{,}15 \times 0{,}75) \times (97 - 20) + (2 \times 0{,}15 \times 0{,}42) \times (97 - 20) + (0{,}75 \times 0{,}42) \times (55 - 20)] = 1048{,}968 kJ/kg$$

$$q_c = 100 \times \frac{1048{,}968}{17700} = 5{,}93\%$$

Koncentrace CO

$$CO = 0{,}49 \times \frac{21 - 10}{21 - 10{,}97} = 0{,}537\% hmot.$$

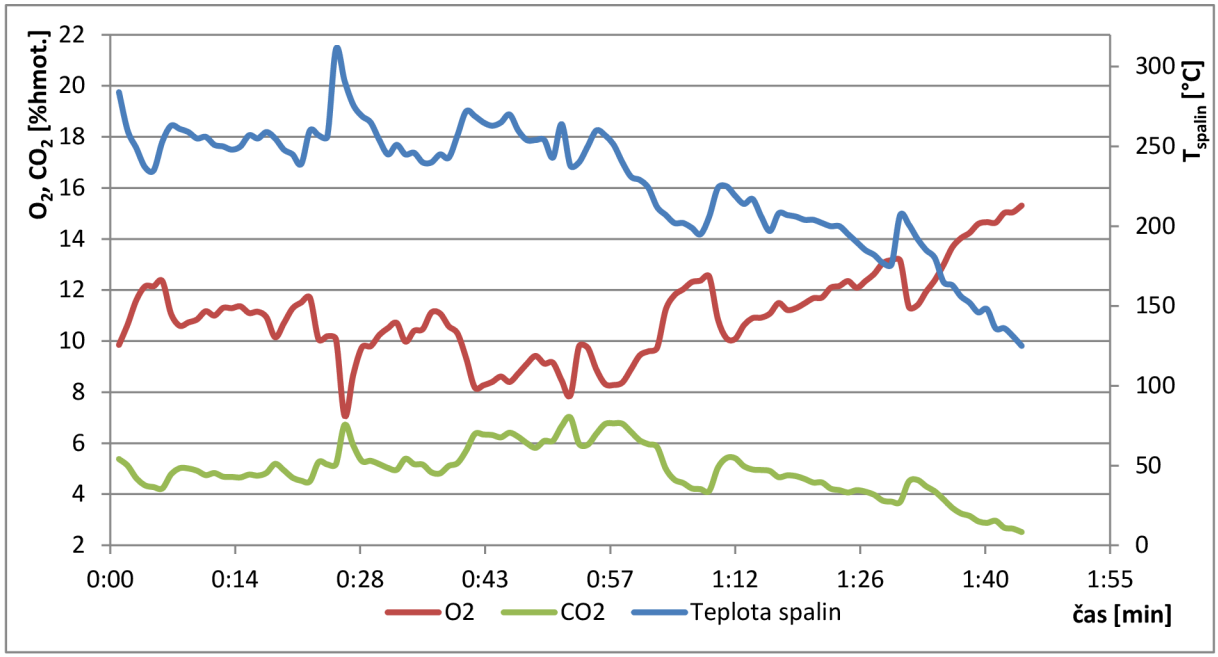
Pomocné výpočty

$$C_{pmd} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right)^2 + \left(0{,}085 + 0{,}19 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right) - 0{,}14 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right)^2\right) \times \frac{4{,}93}{100} + \left(0{,}03 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right) - 0{,}2 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right)^2\right) \times \frac{4{,}93}{100}\right) = 1{,}532$$

$$C_{pmH20} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{227{,}21}{1000}\right)^2\right) = 1{,}529$$

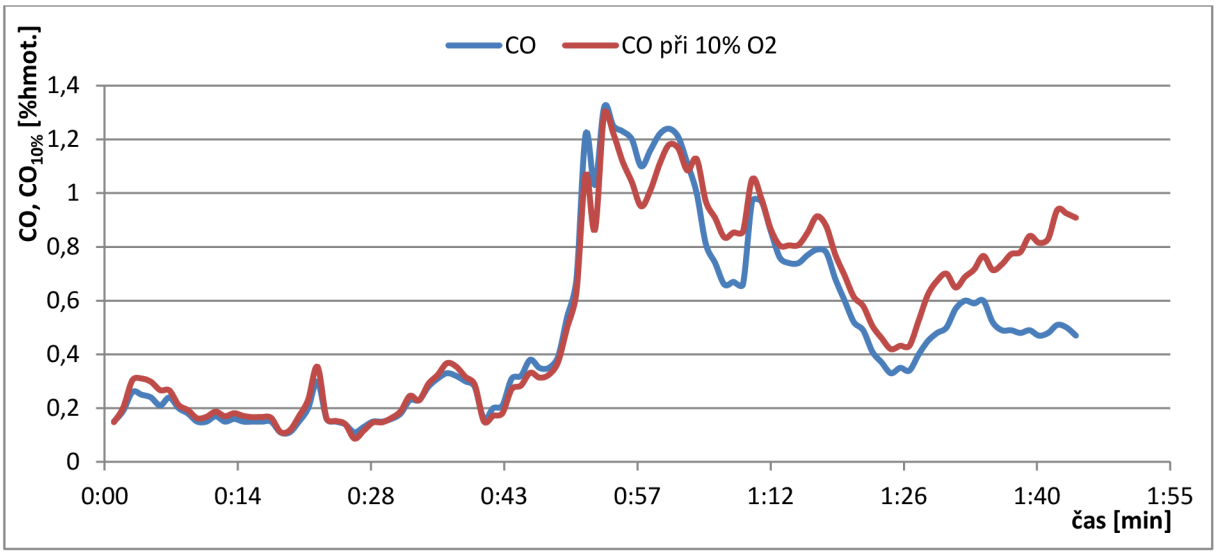
$$C_r = 0{,}51 \times \frac{17{,}73}{100} = 0{,}0904$$

Průběh koncentrace CO_2 a O_2, průběh teploty spalin v kouřovodu



Obrázek 18: Graf - závislost CO2, O2 a teploty spalin na čase pro 1. měření

Porovnání koncentrace CO a CO při 10% obsahu kyslíku



Obrázek 19: Graf - porovnání koncentrace CO a CO při 10% O2 pro 1. měření

Čas	0:00	0:17	0:30	0:35	0:45	0:52	0:54	1:02	1:08	1:10
Otevření 3° vzduchu	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$	1	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$

Tabulka 20: přehled otevření terciálního vzduchu

Závěr měření č. 1:

Při tomto měření spalování buku, jsem vypočítal nepřímou účinnost kotle 56,3%. Během zkoušky jsme experimentovali s přívodem terciálního vzduchu do kotle. Ze začátku jsme nastavili terciální přívod vzduchu na 1/6 jeho velikosti a dále podle aktuálního spalování jsme se pokoušeli pomocí otevírání a zavírání přísunu vzduchu vylepšit spalovací vlastnosti. Jak jde z grafu vidět, dařilo se nám to celkem úspěšné do doby okolo 46 minut od začátku. Pak se začala hodnota CO ve spalinách zvětšovat a my už nedokázali pomocí otevírání přívodu vzduchu tento trend zastavit. Po hodině spalování začala hodnota CO kolísat a my se snažili náhodně otevírat a zavírat terciální vzduch. To však nevedlo k žádnému výsledku, protože toto kolísání zapříčinilo skoro dohořelé palivo v kotli.

Více vlivu na množství CO měl přívod sekundárního vzduchu. Když po 45 minutách se ohřála voda v oběhu kotle na 90°C zavřel automatický ventil TRV přívod sekundárního vzduchu, což zapříčinilo nedokonalé spalování a zvýšení hladiny CO ve spalinách. Při spalování maximální teplota přesáhla hranici 310°C, což jsou také velké ztráty do zplodin. Různé výkyvy v hodnotách CO_2 i O_2 byly v důsledku propadnutí paliva ze zásobníku na rošt kotle.

8.4 Měření číslo 2

Při druhém měření jsme použili dřevěnou štěpku mletou na větší velikost. Pro měření bylo použito 15,6kg štěpky. Měření probíhalo po dobu 60 minut, po 30 sekundách.

Čas	CO	CO_2	O_2	T_{spalin}	Čas	CO	CO_2	O_2	T_{spalin}
0:00:00	0,344	5,05	10,91	330,8	0:30:30	2,414	9,87	3,9	397,7
0:00:30	0,324	5,01	10,96	336,7	0:31:00	2,2	9,74	4,02	395,4
0:01:00	0,322	4,84	11,26	320,8	0:31:30	2,152	9,7	4,03	406,3
0:01:30	0,322	4,68	11,53	318,7	0:32:00	1,996	9,87	3,56	410,7
0:02:00	0,336	4,53	11,84	315,6	0:32:30	1,616	9,8	3,43	408,7
0:02:30	0,352	4,37	12,11	317,3	0:33:00	1,524	9,78	3,4	413
0:03:00	0,372	4,23	12,4	314,7	0:33:30	1,576	9,83	3,35	418,3
0:03:30	0,398	4,18	12,51	311	0:34:00	1,452	9,75	3,37	419,7
0:04:00	0,424	4,11	12,63	314,3	0:34:30	1,212	9,6	3,43	420,7
0:04:30	0,442	4,03	12,76	318,7	0:35:00	0,98	9,44	3,5	423,9
0:05:00	0,458	3,99	12,83	324,5	0:35:30	0,812	9,25	3,63	421,5
0:05:30	0,464	3,94	12,92	328,7	0:36:00	0,684	9,09	3,74	422,4
0:06:00	0,494	3,9	12,96	331,1	0:36:30	0,558	8,93	3,8	424,1
0:06:30	0,482	3,83	12,88	336,7	0:37:00	0,482	8,89	3,76	423,2
0:07:00	0,418	3,23	13,37	334,5	0:37:30	0,346	8,6	4,05	422
0:07:30	0,162	0,88	17,69	359,2	0:38:00	0,266	8,44	4,2	423,4
0:08:00	1,876	7,32	7,57	363,3	0:38:30	0,332	8,58	4,09	425,9
0:08:30	2,072	9,12	4,88	359,3	0:39:00	0,324	8,58	4,07	419,6
0:09:00	2,948	9,59	4,75	362,9	0:39:30	0,28	8,49	4,19	415,8
0:09:30	2,476	9,46	4,83	375,7	0:40:00	0,198	8,22	4,52	416,9

0:10:00	0,888	9,17	4,22	377,9	0:40:30	0,186	8,17	4,53	416,3
0:10:30	1,212	9,18	4,62	375,5	0:41:00	0,188	8,24	4,38	413,4
0:11:00	1,712	9,52	4,36	378,6	0:41:30	0,26	8,41	4,19	409,8
0:11:30	1,554	9,56	4,08	381,9	0:42:00	0,172	8,03	4,83	407
0:12:00	1,55	9,68	4,03	382,8	0:42:30	0,138	7,88	4,94	405,8
0:12:30	1,906	10,02	3,53	386,7	0:43:00	0,13	7,82	5,08	406,9
0:13:00	2,006	10,43	3,01	388,5	0:43:30	0,12	7,79	5,08	410,1
0:13:30	2,152	10,49	3,01	390,7	0:44:00	0,118	7,78	5,07	406,7
0:14:00	1,682	10,19	3,26	394,4	0:44:30	0,12	7,82	5	405,1
0:14:30	1,522	10,03	3,3	398,6	0:45:00	0,118	7,79	5,05	405,9
0:15:00	1,162	9,81	3,41	387,5	0:45:30	0,122	7,86	4,96	402,2
0:15:30	1,882	10,22	3,25	386,1	0:46:00	0,116	7,74	5,21	399
0:16:00	2,01	10,25	3,26	388,9	0:46:30	0,104	7,6	5,42	391,8
0:16:30	1,92	10,17	3,26	387,6	0:47:00	0,098	7,46	5,65	382,8
0:17:00	2,134	10,25	3,25	396,7	0:47:30	0,092	7,18	6,22	377,7
0:17:30	0,994	9,64	3,4	395,9	0:48:00	0,09	6,91	6,67	375
0:18:00	1,82	10,03	3,38	391,7	0:48:30	0,09	6,81	6,83	372,8
0:18:30	0,382	1,84	15,06	377,6	0:49:00	0,088	6,82	6,72	366,4
0:19:00	0,306	1,08	18,86	376,7	0:49:30	0,146	6,69	7,15	366,2
0:19:30	2,344	6,91	9,46	377	0:50:00	0,436	7,25	6,48	365,3
0:20:00	3,59	9,47	4,89	375,4	0:50:30	0,442	7,33	6,43	353
0:20:30	3,898	10,22	3,91	371,7	0:51:00	0,39	7,05	6,92	353,8
0:21:00	4,302	10,65	3,58	369,3	0:51:30	0,396	6,96	7,05	358,8
0:21:30	4,348	10,75	3,53	370,3	0:52:00	0,412	7,13	6,74	360,2
0:22:00	4,336	10,77	3,54	388,3	0:52:30	0,622	7,52	6,37	365
0:22:30	4,19	10,73	3,47	390,2	0:53:00	0,738	7,68	6,3	356,6
0:23:00	3,64	10,61	3,24	392,2	0:53:30	0,898	7,59	6,57	355,5
0:23:30	3,356	10,42	3,36	393,6	0:54:00	0,89	7,44	6,71	350,4
0:24:00	3,122	10,27	3,48	391	0:54:30	0,816	7,25	6,9	345,5
0:24:30	2,944	10,15	3,58	391	0:55:00	0,796	7,06	7,12	325,4
0:25:00	2,788	10,06	3,66	393,3	0:55:30	0,828	6,6	7,93	304,7
0:25:30	2,766	10,04	3,69	393,8	0:56:00	0,938	6,04	8,83	281,5
0:26:00	2,742	10,01	3,76	395,6	0:56:30	0,994	5,57	9,58	262,9
0:26:30	2,702	9,98	3,81	397,4	0:57:00	1,04	5,17	10,24	249,8
0:27:00	2,61	9,95	3,79	398,8	0:57:30	1,134	4,89	10,7	242,1
0:27:30	2,526	9,92	3,79	399,8	0:58:00	1,146	4,75	10,92	236,3
0:28:00	2,416	9,87	3,81	397	0:58:30	1,072	4,72	10,97	231
0:28:30	2,208	9,8	3,8	397,9	0:59:00	1,086	4,68	11,07	231,2
0:29:00	2,508	9,92	3,77	392,6	0:59:30	1,048	4,65	11,09	229,4
0:29:30	2,744	10,01	3,72	399,1	1:00:00	1,044	4,66	11,08	228,8
0:30:00	3,232	10,23	3,64	399,8					

Tabulka 21: naměřené hodnoty z měření č. 2

$T_{místnosti}$ (t_r)	CO	CO_2	O_2	T_{spalin} (t_a)
20	1,28	7,88	6,28	370,5

Tabulka 22: průměrné hodnoty z 2. měření

Ukázkový výpočet účinnosti pro měření č. 2:

$$\eta = 100 - (q_a - q_b - q_c) = 100 - (31{,}59 - 8{,}61 - 6{,}28) = 53{,}52\%$$

Poměrné ztráty komínové:

$$Q_a = (370{,}5 - 20) \times \left[\left[\frac{1{,}567 \times (43{,}9 - 0{,}279)}{0{,}536 \times (1{,}28 + 7{,}88)}\right] + \left(1{,}558 \times 1{,}224 \times \frac{9 \times 5{,}35 + 11{,}2}{100}\right)\right] = 5276{,}38 kJ/kg$$

$$q_a = 100 \times \frac{5276{,}38}{16700} = 31{,}59\%$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem

$$Q_b = 12644 \times 1{,}28 \times \frac{43{,}9 - 0{,}279}{[0{,}536 \times (7{,}88 + 1{,}28) \times 100]} = 1437{,}90 kJ/kg$$

$$q_b = 100 \times \frac{1437{,}9}{16700} = 8{,}61\%$$

Tepelné ztráty sdílením tepla do okolí

$$Q_c = 20 \times [(0{,}24 \times 0{,}37) \times (69 - 20) + (0{,}51 \times 0{,}37) \times (34 - 20) + (2 \times 0{,}87 \times 0{,}75) \times (35 - 20) + (2 \times 0{,}87 \times 0{,}42) \times (28 - 20) + (2 \times 0{,}15 \times 0{,}75) \times (97 - 20) + (2 \times 0{,}15 \times 0{,}42) \times (97 - 20) + (0{,}75 \times 0{,}42) \times (55 - 20)] = 1048{,}968 kJ/kg$$

$$q_c = 100 \times \frac{1048{,}968}{16700} = 6{,}28\%$$

Koncentrace CO

$$CO = 1{,}28 \times \frac{21 - 10}{21 - 6{,}28} = 0{,}957\% hmot.$$

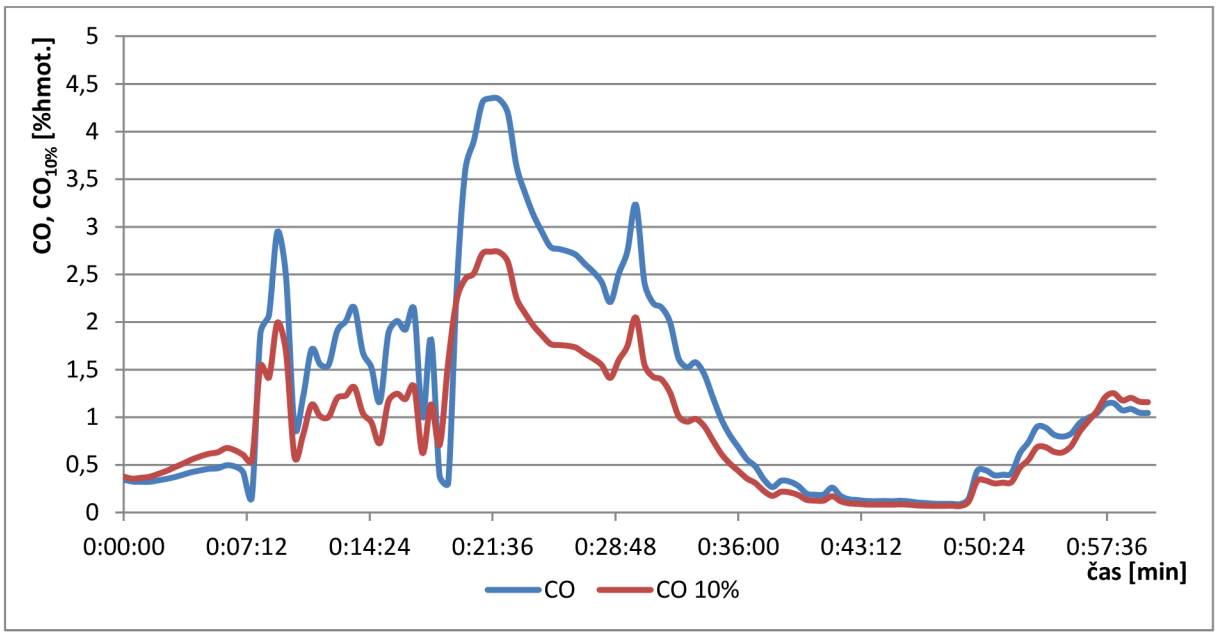
Pomocné výpočty

$$C_{pmd} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right)^2 + \left(0{,}085 + 0{,}19 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right) - 0{,}14 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right)^2\right) \times \frac{7{,}88}{100} + \left(0{,}03 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right) - 0{,}2 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right)^2\right) \times \frac{7{,}88}{100}\right) = 1{,}567$$

$$C_{pmH20} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{370{,}5}{1000}\right)^2\right) = 1{,}558$$

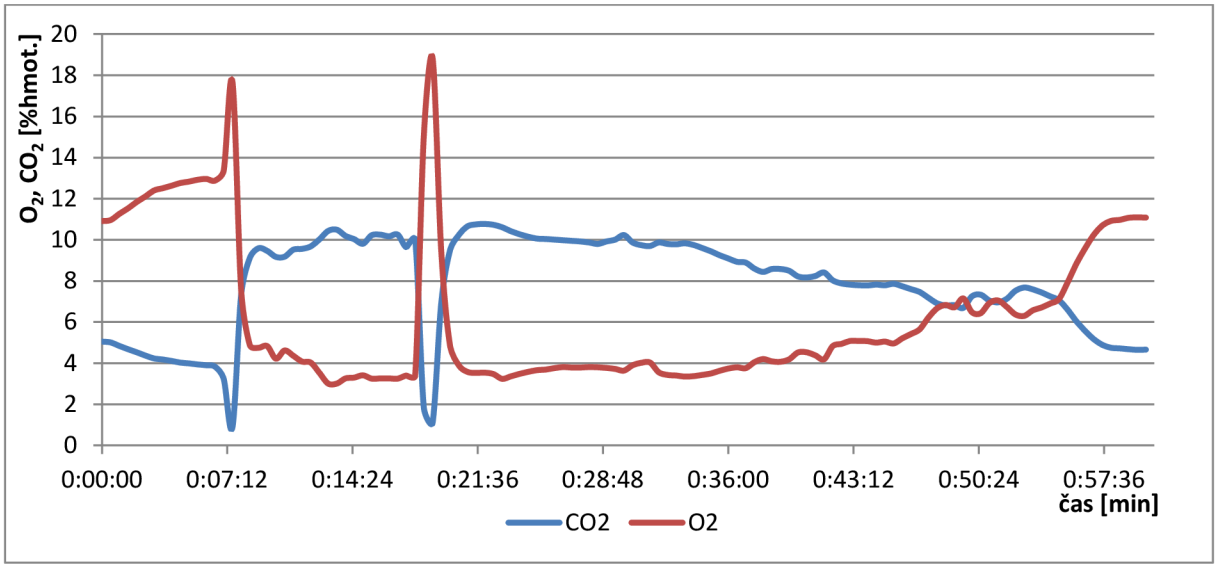
$$C_r = 1{,}31 \times \frac{21{,}3}{100} = 0{,}279$$

Porovnání hodnot CO a CO při 10% obsahu kyslíku

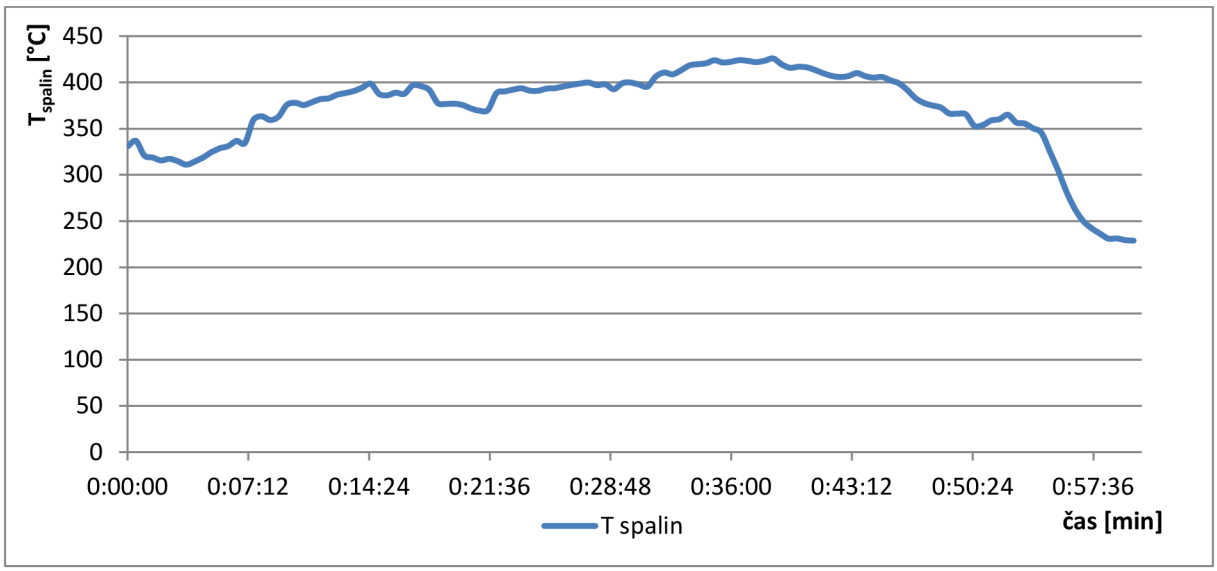


Obrázek 20: Graf - porovnání hodnot CO a CO při 10% O2

Porovnání hodnot O_2 a CO_2



Obrázek 21: Graf - závislost CO2 a O2 na čase pro 2. měření



Obrázek 22: Graf - průběh teploty spalin na čase pro 2. měření

Závěr 2. měření:

Toto měření bylo nejvíce ovlivněno poruchami analyzátoru Infralyt 5000. To se projevilo na výkyvu hodnot v časech 8 a 14 minut od začátku měření. Dále byla nutnost dosypat štěpku v průběhu měření v čase 30 minut a to se projevilo dalším kolísáním hodnoty CO. Poté probíhalo hoření ve stabilizovaném stavu, za produkování minima CO od času 37 až 50 minut měření. V této době bylo produkce CO pod 0,1%hmot. Při spalování byly naměřeny velké tepelné ztráty do kouřovodu. Tyto ztráty zmenšily účinnost téměř o 32%. Nakonec celková účinnost určena nepřímou metodou vyšla 53,52%.

8.5 měření číslo 3

Při 3. měření jsme použili jako palivo štěpku namletou na jemnější kusy. Tato štěpka má stejnou výhřevnost jako štěpka hrubší. Měření taktéž probíhalo po dobu 60 minut i intervalu 30 sekund.

Čas	CO	CO_2	O_2	T_{spalin}	Čas	CO	CO_2	O_2	T_{spalin}
0:00:00	0,628	6,15	8,9	298,9	0:30:30	0,072	7,18	6,03	296,3
0:00:30	0,632	6,15	8,82	301,5	0:31:00	0,098	7,23	6,04	300
0:01:00	0,624	6,16	8,79	300,7	0:31:30	0,126	7,35	5,88	298,5
0:01:30	0,576	6,2	8,64	300,2	0:32:00	0,126	7,28	6,05	296,8
0:02:00	0,602	6,24	8,59	306,3	0:32:30	0,116	7,19	6,21	296,6
0:02:30	0,586	6,29	8,47	305,9	0:33:00	0,098	7,13	6,26	297,1
0:03:00	0,556	6,29	8,42	306,8	0:33:30	0,084	7,07	6,36	297,1
0:03:30	0,424	6,35	8,18	306,5	0:34:00	0,076	7,02	6,41	298,2
0:04:00	0,402	6,36	8,2	307,4	0:34:30	0,084	6,99	6,48	298,5
0:04:30	0,416	6,34	8,25	291,5	0:35:00	0,09	6,9	6,69	296,8
0:05:00	0,518	5,79	9,36	273,8	0:35:30	0,098	6,82	6,86	293,5
0:05:30	0,648	5,12	10,75	261,6	0:36:00	0,098	6,83	6,72	298,6
0:06:00	0,804	4,84	11,23	247,1	0:36:30	0,078	7,06	6,26	299,2

0:06:30	0,988	4,58	11,73	239,1	0:37:00	0,068	7	6,39	299,1
0:07:00	1,042	4,44	11,85	240,9	0:37:30	0,07	7,05	6,26	300,6
0:07:30	2,746	6,56	8,76	290,4	0:38:00	0,094	7,17	6,02	300,8
0:08:00	0,828	7,15	6,84	288,4	0:38:30	0,11	7,27	5,9	300,2
0:08:30	0,288	6,79	7,12	290	0:39:00	0,146	7,38	5,75	303,5
0:09:00	0,324	7,24	6,43	303,7	0:39:30	0,178	7,66	5,31	307,7
0:09:30	0,188	7,13	6,5	292,3	0:40:00	0,15	7,65	5,34	305,7
0:10:00	0,162	6,51	7,59	288,8	0:40:30	0,13	7,41	5,76	302,5
0:10:30	0,162	6,49	7,52	290,1	0:41:00	0,158	7,26	6,11	301,6
0:11:00	0,158	6,56	7,36	290,2	0:41:30	0,192	7,12	6,52	297,2
0:11:30	0,144	6,62	7,24	290,7	0:42:00	0,21	6,88	7	296,3
0:12:00	0,152	6,53	7,49	286,8	0:42:30	0,23	6,78	7,22	297,1
0:12:30	0,176	6,44	7,69	288	0:43:00	0,308	6,69	7,48	293,7
0:13:00	0,196	6,39	7,82	281,2	0:43:30	0,334	6,67	7,51	294,2
0:13:30	0,166	6,31	7,89	283,9	0:44:00	0,592	6,87	7,43	314,2
0:14:00	0,132	6,37	7,7	287	0:44:30	0,536	7,1	6,89	302,2
0:14:30	0,12	6,43	7,57	287,1	0:45:00	0,446	6,96	7,14	296,6
0:15:00	0,112	6,48	7,47	290,4	0:45:30	0,372	6,89	7,14	295,1
0:15:30	0,102	6,57	7,28	294,9	0:46:00	0,312	6,85	7,13	295,5
0:16:00	0,086	6,68	7,05	293,1	0:46:30	0,294	6,72	7,39	292
0:16:30	0,082	6,73	7,01	298	0:47:00	0,322	6,47	7,9	290,7
0:17:00	0,102	6,81	6,85	299,3	0:47:30	0,386	6,42	8,03	289,7
0:17:30	0,114	7,27	5,91	304,7	0:48:00	0,416	6,19	8,52	285,2
0:18:00	0,122	7,47	5,62	306,9	0:48:30	0,43	5,73	9,39	282,3
0:18:30	0,138	7,67	5,26	313,3	0:49:00	0,436	5,35	10,02	278,6
0:19:00	0,162	7,86	5,01	317,8	0:49:30	0,43	5,27	10,14	298,6
0:19:30	0,174	8,01	4,68	320,2	0:50:00	0,404	5,13	10,36	351,8
0:20:00	0,148	8,11	4,49	317,9	0:50:30	0,474	4,17	13,45	314,6
0:20:30	0,21	8,21	4,54	321,3	0:51:00	0,372	6,09	8,36	312,8
0:21:00	0,162	8,11	4,62	320,4	0:51:30	0,532	7,67	5,48	314,5
0:21:30	0,128	7,44	5,59	301,9	0:52:00	0,37	7,78	5,38	316,8
0:22:00	0,09	6,9	6,96	295,8	0:52:30	0,324	7,82	5,23	320,6
0:22:30	0,1	6,6	7,46	291,7	0:53:00	0,168	7,31	6,03	315,1
0:23:00	0,09	6,69	7,2	291,4	0:53:30	0,132	7,05	6,42	311,5
0:23:30	0,194	6,95	6,89	298,1	0:54:00	0,118	6,72	7,06	304,5
0:24:00	0,156	6,61	7,49	293,8	0:54:30	0,126	6,28	7,94	297,1
0:24:30	0,134	6,58	7,5	287,4	0:55:00	0,258	6,3	8,05	287,9
0:25:00	0,122	6,56	7,59	282,4	0:55:30	0,316	7,46	6,1	306,2
0:25:30	0,134	6,5	7,7ůůůůůů	280,3	0:56:00	0,31	7,58	5,81	309,2
0:26:00	0,144	6,44	7,81	278,3	0:56:30	0,182	7,07	6,57	305,9
0:26:30	0,14	6,4	7,85	277	0:57:00	0,228	6,94	6,87	302,3
0:27:00	0,13	6,34	7,91	281,5	0:57:30	0,192	6,85	6,93	302,7
0:27:30	0,108	6,41	7,67	283,2	0:58:00	0,174	6,61	7,34	296,7

0:28:00	0,088	6,55	7,37	284,4	0:58:30	0,148	6,5	7,55	295,7
0:28:30	0,086	6,56	7,38	285	0:59:00	0,132	6,2	8,01	287,1
0:29:00	0,088	6,55	7,35	285,6	0:59:30	0,156	6,17	8,07	287,6
0:29:30	0,088	6,69	7,02	289,5	1:00:00	0,16	6,14	8,24	287
0:30:00	0,076	6,98	6,34	296					

Tabulka 23: naměřené hodnoty pro 3. měření

$T_{místnosti}$ (t_r)	CO	CO_2	O_2	T_{spalin} (t_a)
20	0,27	6,70	7,29	296,07

Tabulka 24: průměrné hodnoty ze 3. měření

Ukázkový výpočet účinnosti pro měření č. 3:

$$\eta = 100 - (q_a - q_b - q_c) = 100 - (29{,}85 - 2{,}39 - 6{,}28) = 61{,}48\%$$

Poměrné ztráty komínové:

$$Q_a = (296{,}07 - 20) \times \left[\left[\frac{2{,}188 \times (43{,}9 - 0{,}311)}{0{,}536 \times (0{,}27 + 6{,}70)}\right] + \left(1{,}542 \times 1{,}224 \times \frac{9 \times 5{,}6 + 13{,}81}{100}\right)\right] = 4986{,}56 kJ/kg$$

$$q_a = 100 \times \frac{4986{,}56}{16700} = 29{,}85\%$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem

$$Q_b = 12644 \times 0{,}27 \times \frac{43{,}9 - 0{,}311}{[0{,}536 \times (6{,}7 + 0{,}27) \times 100]} = 398{,}32 kJ/kg$$

$$q_b = 100 \times \frac{398{,}32}{16700} = 2{,}39\%$$

Tepelné ztráty sdílením tepla do okolí

$$Q_c = 20 \times [(0{,}24 \times 0{,}37) \times (69 - 20) + (0{,}51 \times 0{,}37) \times (34 - 20) + (2 \times 0{,}87 \times 0{,}75) \times (35 - 20) + (2 \times 0{,}87 \times 0{,}42) \times (28 - 20) + (2 \times 0{,}15 \times 0{,}75) \times (97 - 20) + (2 \times 0{,}15 \times 0{,}42) \times (97 - 20) + (0{,}75 \times 0{,}42) \times (55 - 20)] = 1048{,}968 kJ/kg$$

$$q_c = 100 \times \frac{1048{,}968}{16700} = 6{,}28\%$$

Koncentrace CO

$$CO = 0{,}27 \times \frac{21 - 10}{21 - 7{,}29} = 0{,}217\% hmot.$$

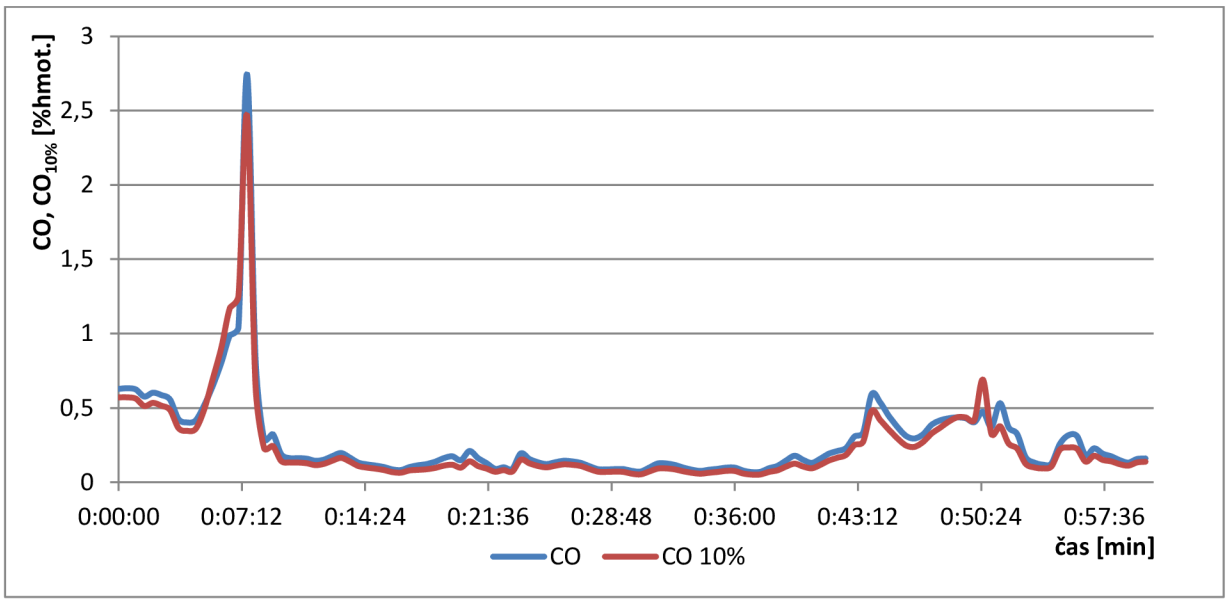
Pomocné výpočty

$$C_{pmd} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right)^2 + \left(0{,}085 + 0{,}19 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right) - 0{,}14 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right)^2\right) \times \frac{6{,}07}{100} + \left(0{,}03 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right) - 0{,}2 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right)^2\right) \times \frac{6{,}07}{100}\right) = 2{,}188$$

$$C_{pmH20} = 3{,}6 \times \left(0{,}414 + 0{,}038 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right) + 0{,}034 \times \left(\frac{296{,}07}{1000}\right)^2\right) = 1{,}542$$

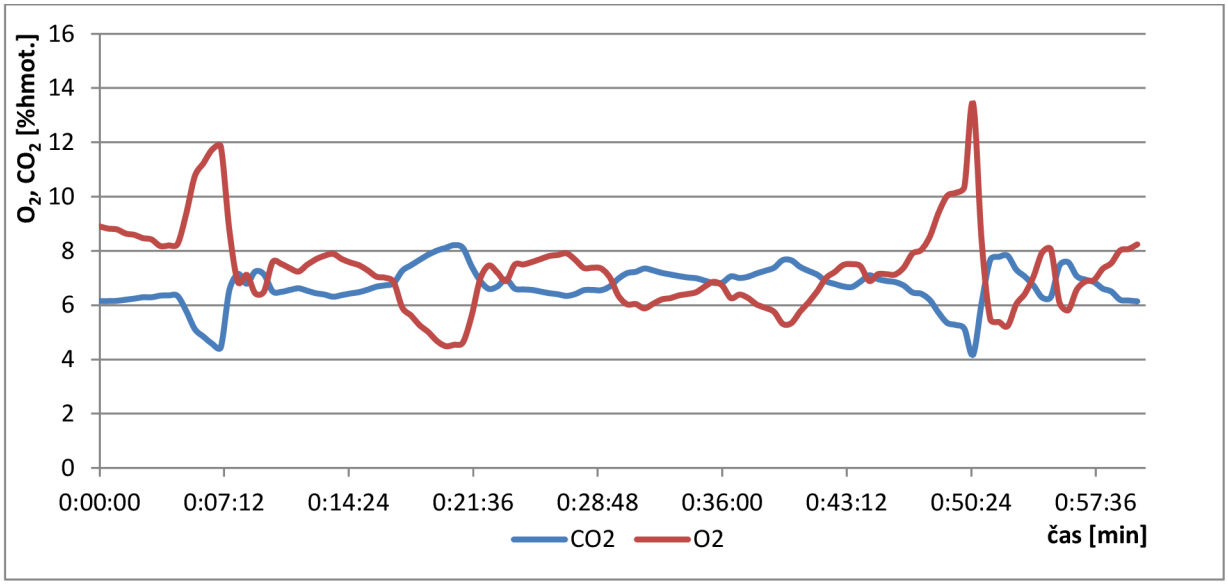
$$C_r = 1{,}36 \times \frac{22{,}9}{100} = 0{,}311$$

Porovnání hodnot CO a CO při 10% obsahu kyslíku

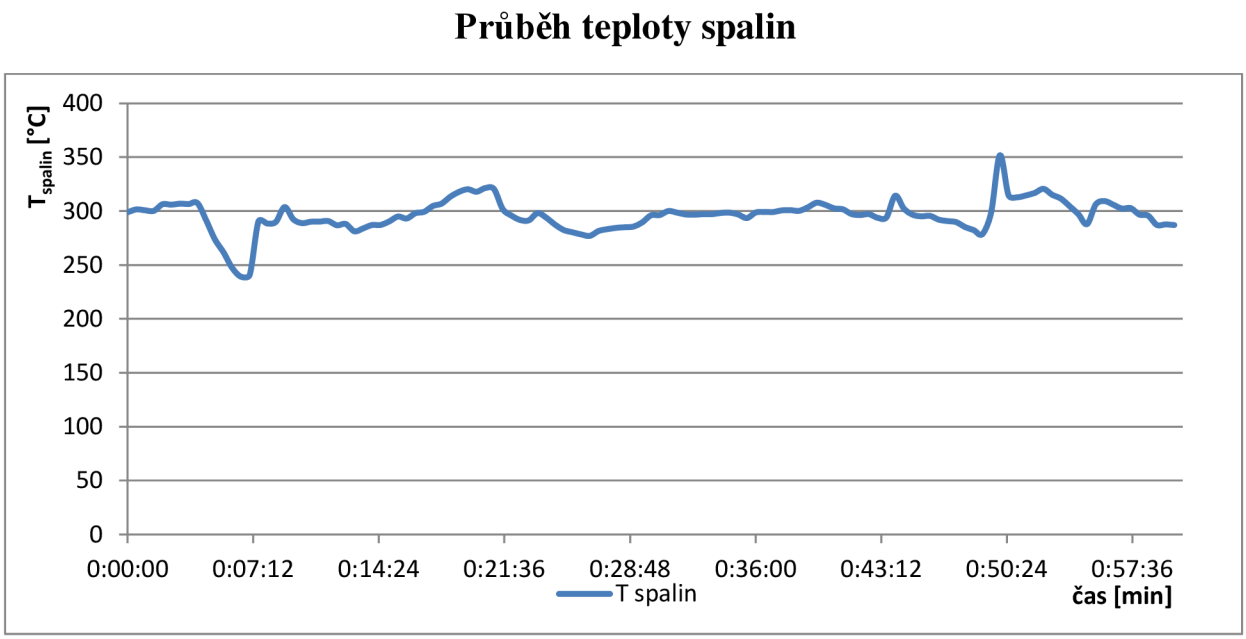


Obrázek 23: Graf - porovnání hodnot CO a CO při 10% O2

Porovnání hodnot CO_2 a O_2



Obrázek 24: Graf - závislost CO2 a O2 na čase pro 2. měření



Obrázek 25: Graf - průběh teploty spalin na čase pro 2. měření

Závěr 3. měření:

Měření číslo 3 bylo ze všech tří měření nejstálejší a nejklidnější. Bylo sice ovlivněno chybou analyzátoru, ale celkový výsledek tato chyba neovlivnila. Špatné proudění spalin do analyzátoru proběhlo v čase 7 minut od začátku měření. Jak je z grafu patrné, ihned se v tento čas změnily hodnoty CO, CO_2 i O_2. Další zakolísání kolem času 50 minut je zapříčiněno mechanickým zaroštováním roštu pod spalovací komorou a následného uvolnění nechtěných látek do kouřovodu. V průběhu teploty nepozorujeme žádné významné kolísání, což nasvědčuje dobrému a stálému hoření.

9. Závěr

V první části bakalářské práci bylo provedeno základní rozdělení nejpoužívanějších paliv a jejich výhřevností. Dále bylo provedeno rozdělení kotlů na tuhá paliva dle způsobu spalování a obsluhy. Poté byla stručně charakterizovaná norma ČSN EN 303-5 pro měření emisí kotlů na tuhá paliva.

V druhé části je přiblíženo a vyhodnoceno měření kotle na tuhá paliva Slokov Variant SL 22D. Měření proběhlo v pořádku a z výsledku byly vypočítány hodnoty účinností jednotlivých paliv. Pro 1. měření vyšla nepřímá účinnost 56,3% a obsah oxidu uhelnatého CO 0,49% hmot. což odpovídá 1180 mg/m^{3}N z čeho vyplývá, že tento kotel spadá při spalování bukového dřeva do emisní třídy 4. Ve 2. měření vyšla nepřímá účinnost 53,52% a obsah CO 1,28% hmot. Tato hodnota představuje 2200 mg/m^{3}N a námi měřený kotel s hrubou štěpkou jako palivem spadá do emisní třídy 3. Největší účinnost 61,2% a nejmenší obsah CO 0,27% hmot. vyšel pro měření jemné štěpky číslo 3. Přepočítaný obsah CO je 1078 mg/m^{3}N, takže spalování jemné štěpky v kotli Slokov řadíme do emisní třídy 4.

Pro zlepšení spalování a zároveň zvětšení účinnosti by mohly být vylepšeny některé parametry kotle, nebo přidány doplňky. Největší důraz by měl být kladen na nastavení kotle pro určitý druh paliva. Pro lepší spalování dřeva je vhodné zavřít přívod primárního vzduchu a použít automatický regulátor pro sekundární vzduch. Při spalování štěpky je vhodnější používat primární přísun vzduchu, protože štěpka nepropouští díky své velikosti dostatečné množství vzduchu a hoření je neúčinné a zadušené. Dále pro zvýšeni účinnosti, bych doporučil předělání terciálních trysek přívodu vzduchu. Trysky by měly být menšího průměru a ve větším počtu, aby lépe pomáhaly ke spalování zplodin. Další zlepšení účinnosti by bylo předehřátí přívodu terciálního vzduchu, aby nedocházelo k nechtěnému ochlazování spalin.

Seznam použité literatury:

[1] Uhelné elektrárny ČEZ: Informace. *Uhelné elektrárny ČEZ: Informace o uhelné energetice* [online]. 2012 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/informace-o-uhelne-energetice.html

[2] Černé uhlí [online]. 2011 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.cerneuhli.cz/

[3] Vyrábíme koks: co je koks a jak vzniká. *Koksovny* [online]. 2010 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.koksovny.cz/cs/vyrabime-koks/co-je-koks-a-jak-vznika

[4] Ceny paliv a energií: Přehled cen uhlí a koksu. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/prehled-cen-uhli-a-koksu

[5] *Palivove_drevo* [online]. 2008 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: http://www.rodovystatek.cz/palivove_drevo.jpg

[6] Cena biomasy: Pelety a brikety jsou v létě levnější. *Na zeleno* [online]. 2011 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: http://www.nazeleno.cz/cena-biomasy-pelety-a-brikety-jsou-v-lete-levnejsi.aspx

[7] *Drevarska_stepka* [online]. 2007 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cdp.cz/wp-content/uploads/drevarska-stepka-2.jpg

[8] Ceny paliv a energií: Přehled cen dřevní štěpky. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/prehled-cen-drevni-stepky

[9] *Pelety* [online]. 2006 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.mrk.cz/images/clanky/pajda/pelety.jpg

[10] Kapalná paliva. *Kapalná paliva* [online]. 2006 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/KapalnaPaliva.pdf

[11] Spalování plynných paliv: Složení plynných paliv. *Spalovací procesy* [online]. 2011 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://spalovaci-procesy.wz.cz/PP.html

[12] Kotle na dřevo: ekonomické topení dřevem. *Topenáři* [online]. 2011 [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: http://www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-klasicka/kotle-na-tuha-paliva/drevo.php

[13] Kotle na pelety: ekologické topení dřevěnými peletami. *Topenáři* [online]. 2011 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-klasicka/kotle-na-tuha-paliva/pelety.php

[14] Legislativní požadavky na teplovodní kotle na tuhá paliva určené k vytápění domácností. In: *Legislativní požadavky na teplovodní kotle na tuhá paliva určené k vytápění domácností* [online]. 2011 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: http://vec.vsb.cz/userfiles/Legislativni-pozadavky-na-teplovodni-kotle-na-tuha-paliva-urcene-k-vytapeni-domacnosti.pdf.pdf

[15] *Slokov*: *Kotle* [online]. 2012 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.slokov.cz

[16] BILANCE EMISÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK Z MALÝCH ZDROJŮ ZNEČIŠŤOVÁNÍ SE ZAMĚŘENÍM NA SPALOVÁNÍ TUHÝCH PALIV. In: *Chemické listy* [online]. 2011 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_11_851-855.pdf

[17] ČSN EN 13240. *Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů*: *Požadavky a zkušební metody*. Praha: ÚNMZ, 2002.

[18] SYNEK, M. Možnosti vytápění biomasou, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Otakar Štelcl.

[19] Buk lesní. *Biomasa-info* [online]. 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/buk.pdf

Seznam použitých značek a symbolů:

Značka	Název veličiny	Jednotka
b	Hmotnostní podíl spalitelných složek v pevných zbytcích spalováním vztahu k jejich hmotnosti	%
C	Hmotnostní podíl uhlíku ve zkušebním palivu	%
CO	Objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalinách	%
CO_2	Objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	%
C_r	Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v pevných zbytcích spalování propadlých roštem v závislosti na množství spáleného zkušebního paliva	%
C_{pmd}	Střední měrná tepelná kapacita suchých spalin při srovnávacích podmínkách v závislosti na teplotě a složení spalin	$kJ/(K.m^3)$
C_{pmH2O}	Střední měrná tepelná kapacita vodní páry při srovnávacích podmínkách v závislosti na teplotě	$kJ/(K.m^3)$
H	Hmotnostní podíl vodíku ve zkušebním palivu	%
H_u	Výhřevnost zkušebního paliva	kJ/kg
η	Účinnost	%
P	Celkový tepelný výkon	kW
Q_a	Ztráty citelným teplem spalin ve vztahu k hmotnosti zkušebního paliva	kJ/kg
Q_b	Ztráty plynným nedopalem ve vztahu k hmotnosti zkušebního paliva	kJ/kg
Q_c	Ztráty sdílením tepla do okolí ve vztahu k hmotnosti zkušebního paliva paliva	kJ/kg
q_a	Poměrná ztráta citelným teplem spalin (Q_a) ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva	%
q_b	Poměrná ztráta plynným nedopalem (Q_b) ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva	%
q_c	Poměrná ztráta sdílením tepla do okolí (Q_c) ve vztahu k výhřevnosti zkušebního paliva	%
R	Hmotnostní podíl pevných zbytků spalování propadlých roštem ve vztahu k hmotnosti spáleného zkušebního paliva	%