



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**DVOUKOMOROVÝ ROŠTOVÝ KOTEL PRO
SPALOVÁNÍ DIGESTÁTU**

DIGESTATE GRATE BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Krejčířík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jiří Krejčířík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
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 diplomové práce:

Dvoukomorový roštový kotel pro spalování digestátu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalování digestátu a podobných paliv přináší zvýšené nároky na spalovací technologie hlavně díky větší náchylnosti paliv ke spékání popelovin a k vyšší tvorbě emisí TZL vzhledem k povaze paliva. Práce bude zaměřena na studium teoretických podmínek spalování digestátu, návrh konstrukčního řešení kotle a experimentální ověření výsledných parametrů.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši spalování digestátu.

Vyhodnotit dosavadní výsledky naměřené na kotlech určených ke spalování dřevní štěpky.

Provést parametrickou studii stechiometrických a bilančních podmínek kotle.

Navrhnout úpravy kotlového tělesa s cílem dosáhnout co nejlepších emisních parametrů a stability hoření.

Experimentálně ověřit emisní a provozní parametry kotle.

Seznam doporučené literatury:

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce

DLOUHÝ, Tomáš: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80--1-03757-7

BUDAJ, Florian: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983,

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

Termín odevzdání diplomové 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

Tato diplomová práce se zabývá vlastnostmi digestátu při spalování, návrhem konstrukčního řešení kotle pro spalování digestátu a experimentálním ověřením parametrů kotle. První kapitola se zabývá vlastnostmi digestátu jako paliva. Na ni navazuje kapitola zabývající se dosavadními naměřenými výsledky na podobném kotli. Poté následuje stechiometrický výpočet kotle pro digestát. Další kapitola je věnována modelům spalovací komory. Na tuto kapitolu navazuje kapitola s experimentálním ověřením modelů komory a ladění spalovacího procesu. Poslední kapitola obsahuje návrh konstrukčních a provozních opatření.

Klíčová slova

Digestát, spalování, roštový kotel, stechiometrie, biomasa, emise

ABSTRACT

This master thesis deals with the properties of digestate in combustion, design of construction solution of digestate boiler and experimental verification of boiler parameters. The first chapter deals with the properties of digestate as a fuel. It is followed by a chapter dealing with the existing measured results on a similar boiler. This is followed by a stoichiometric calculation of the digestate boiler. The next chapter is devoted to combustion chamber models. This chapter is followed by a chapter with experimental verification of chamber models and combustion process tuning. The last chapter contains design of construction and operational measures.

Key words

Digestate, combustion, grate boiler, stoichiometry, biomass, emission,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍŘÍK, Jiří. *Dvoukomorový roštový kotel pro spalování digestátu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116909>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Dvoukomorový kotel pro spalování digestátu* vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Bc. Jiří Krejčířík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Martinovi Lisému, Ph.D., za cenné rady, vstřícnost a ochotu při vedení mé práce. Rovněž děkuji všem mým blízkým za jejich podporu během celého studia

OBSAH

ÚVOD	11
1 Digestát	12
1.1 Vlastnosti digestátu	12
1.2 Úprava digestátu pro spalování.....	13
2 Vyhodnocení dosavadních naměřených výsledků	14
2.1 Popis spalovacího zařízení	14
2.2 Emise CO	15
2.3 Emise NO _x	17
2.4 Emise SO ₂	19
2.5 Emise TZL	21
3 Stechiometrický výpočet	22
3.1 Vstupní parametry paliva	22
3.2 Stanovení objemu vzduchu při spalování	23
3.3 Stanovení množství spalin při spalování	24
3.4 Hustota spalin	25
3.5 Hmotové množství vzduchu a spalin	26
3.6 Tepelná bilance ohniště	26
3.7 Teplota nechlazeného plamene	27
3.8 I-t diagram spalin bez recirkulace.....	28
3.9 Měrná tepelná kapacita spalin.....	31
3.10 Vliv vlhkosti paliva na teplotu nechlazeného plamene	32
3.11 Vliv teploty vzduchu na teplotu nechlazeného plamene	33
3.12 Recirkulace spalin	34
4 Spalovací zařízení GEMOS ZKG	35
4.1 Popis konstrukce komory.....	35
4.2 Měření a regulace kotle.....	35
5 Model spalovací komory	38
5.1 Model s chlazeným roštem	39
5.2 Model s chlazeným roštem a chlazenými stěnami.....	40
5.3 Model s chlazeným roštem, chlazenými stěnami a klenbou.....	41
5.4 Srovnání parametrů spalin na výstupu z dohořivacího kanálu	42
6 Spalovací zkoušky kotle	43
6.1 Měřicí přístroje	43
6.2 Přípravy měření.....	44
6.3 Ověření vlivu chlazení	45
6.3.1 Měření s chlazeným roštem.....	45
6.3.2 Měření s chlazeným roštem a chlazenými stěnami.....	47
6.3.3 Měření s chlazeným roštem, chlazenými stěnami a chlazenou klenbou.....	53
6.4 Měření k optimalizaci spalování.....	55

6.4.1	Měření – dřevní štěpka	55
6.4.2	Měření – seno pelety.....	57
7	Návrh konstrukčních a provozních úprav.....	60
	ZÁVĚR.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	67

ÚVOD

Tématem mé diplomové práce je problematika spalování digestátu v kotli o výkonu přibližně 100 kW. V současné době je velký tlak na maximální snížení ekologické zátěže od energetiky. Ke snížení této zátěže dochází především realizováním opatření jako odsíření či instalace odlučovačů na TZL (tuhé znečišťující látky).

Zároveň z důvodu vyčerpatelnosti fosilních paliv je potřeba hledat paliva alternativní. Mezi tyto paliva můžeme zařadit i digestát – neboli fermentační zbytky. Tyto zbytky jsou odpadním produktem z bioplynových stanic, které slouží ke tvorbě bioplynu z biologických ostatků po zemědělské činnosti.

Pro účely spalování digestátu byl navržen ve spolupráci se společností GEMOS dvoukomorový kotel pro spalování digestátu s modifikovatelným systémem chlazení. Tento kotel má být určen pro vytápění rodinných či bytových domů, škol apod. Pro potřeby tohoto návrhu byl zhotoven stechiometrický výpočet, který je součástí této diplomové práce.

Kotel byl instalován na kotelnu Energetického ústavu, kde došlo k ověřování modelových stavů při různém stavu zapojení chlazení. Dále docházelo k měřením při hledání optimálního nastavení kotle (přívody vzduchu, pohyb roštu aj.). Během všech těchto měření docházelo zároveň k měření koncentrace emisí oxidu uhelnatého, oxidů dusíku a měření koncentrace kyslíku. Tyto hodnoty byly poté přepočteny a porovnány s normou ČSN EN 303-5: *Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva s ruční a samočinnou dodávkou o jmenovitém výkonu nejvýše 500 kW*.

Na základě naměřených hodnot je v závěru práce uveden návrh konstrukčních a provozních opatření pro optimalizaci provozu kotle. Ověření těchto opatření bude předmětem výzkumu, který pokračuje na Energetickém ústavu.

1 Digestát

Digestát vzniká jako zbytek po fermentaci. Touto se rozumí proces zpracování zbytkové biomasy, biologicky rozložitelných komunálních odpadů aj. Při fermentaci dochází ke kvašení těchto vstupních surovin a vzniku bioplynu. Tento bioplyn se využívá jako palivo pro kogenerační jednotky, které slouží k výrobě elektrické energie a tepla. Tuhé zbytky, které po fermentaci zůstávají se mohou využít jako hnojivo v zemědělské činnosti anebo mohou mít po přepracování energetické využití. Samotná fermentace může probíhat buď jako suchá nebo mokrá. [62][1]

Mokrá fermentace

Fermentace probíhá v mokřém fermentoru (reaktoru), ve kterém dochází za stálého míchání k ohřívání vsázky a jejímu zplyňování. Zbytek po zplyňování je tekutý s obsahem sušiny pouze 6–10 %. Obsah sušiny lze zvýšit odstředováním, po kterém se obsah sušiny zvýší až na 30 %. Z hlediska termického využití jsou možnosti dalšího využití tohoto zbytku. První možností je přidání paliv s vyšším kalorickým obsahem (např. uhlí). Druhou možností je další zpracování odstředěného zbytku. Tím je myšleno předsoušení, odvodňování aj. [1]

Suchá fermentace

Proces suché fermentace probíhá, tak že dojde k navezení biomasy v sypkém stavu do prostoru fermentoru. Po navezení biomasy dochází k uzavření fermentoru a zahájení samotného procesu fermentace. Při něm dochází k perkulárnímu kropení, díky kterému je zajištěna vlhkost biomasy a obnovení mikrobiální kultury. [1][2]

1.1 Vlastnosti digestátu

Jelikož po fermentaci obsahují tuhé zbytky velké množství vody je nejpodstatnější část přípravy zbytků pro energetické využití jejich sušení. Zbytek po fermentaci může obsahovat až 70 % vody, která negativně ovlivňuje vlastnosti paliva. [1]

Hrubý rozbor paliva a prvkový rozbor závisí jak na způsobu fermentace, tak na vstupních surovinách do fermentoru.

Digestát připravený mokrou metodou se pohybuje kolem 50 % hořlaviny, z nichž je přibližně 44 % prchavá. U digestátu vzniklého suchou fermentací se obsah hořlaviny u odvodněného vzorku pohybuje kolem 54,6 %, z toho je přibližně 42 % hořlavina prchavá. Obsah prchavé hořlaviny ovlivňuje vzněcování paliva a stabilizuje proces hoření. Pro porovnání černé uhlí obsahuje přibližně 40 % prchavé hořlaviny. Čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny tím je palivo náchylnější na degradaci kvality. [1]

Podstatnou složkou u paliv organického původu je síra. Obsah síry je u paliva vzniklého mokrou fermentací je přibližně 2,3 % v hořlavině. Pro odvodněný vzorek po suché fermentaci je obsah roven přibližně 0,35 %. Obsah síry je důležitý z důvodu rizika provozních potíží. Pokud palivo obsahuje více jak 1% síry dochází k zvyšování teploty rosného bodu, a tím ke zvyšování rizika nízkoteplotní koroze. Při ní dochází k podkročení teploty rosného bodu spalin a kondenzaci par. Pokud je v palivu obsažena síra dochází nejdříve ke kondenzaci par kyseliny sírové, které mají podstatně vyšší teplotu kondenzace než vodní páry. Dalšími riziky spojenými se sírou je snižování charakteristických teplot popele a snižování výhřevnosti.[3][4]

Digestát, stejně jako ostatní paliva z biomasy, má vysoký obsah alkalických kovů. Tento vysoký obsah spolu s relativně nízkou teplotou tavení popele a ostatními prvky, které digestát

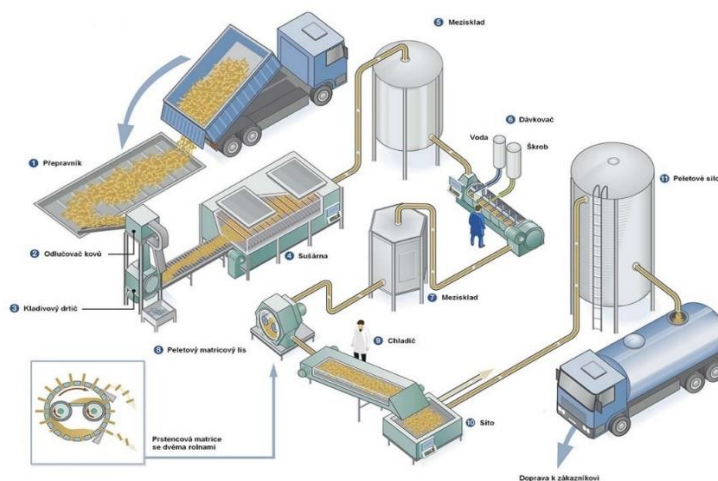
obsahuje (chlór, křemík, vápník), způsobuje významné provozní problémy v kotli, jako jsou slinování, nahromadění a spékání popele, emise prachu a těchto kovů aj. Jedním z opatření proti spékání paliva mohou být aditiva, které obsahují zvýšený obsah CaO – oxidu vápenatého, SiO₂ – oxidu křemičitého nebo Al₂O₃ – oxidu hlinitého. [5][6]

1.2 Úprava digestátu pro spalování

Postup přípravy digestátu probíhá následovně. Z fermentoru je přiváděn digestát do separátoru, kde dochází k oddělování pevné a tekuté složky. Velikost separace je závislá na nastavení a výkonu separátoru. Vyseparovaná pevná složka (separát) poté opouští separátor otvorem v podě a padá na mezisklad. Tekutá složka (fugát) se odvádí potrubím do koncového skladu digestátu. [7]

Po separaci následuje sušení separátu v pásové sušárně. Toto sušení probíhá pomocí horkého vzduchu, který může být ohříván pomocí horké vody z okruhu chlazení kogenerační jednotky bioplynové stanice. Proces sušení se odehrává na prodyšném sušicím pásu, na kterém je vytvořena sušící vrstva o tloušťce 10–15 cm. Ze separátu musí být odstraněny větší kusy materiálu a kovové části, které by mohly způsobit mechanické poškození pásu. Pod sušicím pásem je pomocí ventilátorů vytvořen podtlak přibližně 1 kPa. Díky tomuto podtlaku dochází k nasávání vnějšího vzduchu, který je ohříván pomocí radiátorů umístěných nad pásem. Teplota ohřátí vzduchu se pohybuje mezi 50–70 °C. Na konci pásu dochází k měření výstupní vlhkosti. Na základě vlhkosti dochází k automatické regulaci rychlosti pásu. Pro tvorbu pelet je ideální výsledná vlhkost paliva 15 %. Po vysušení je materiál pomocí šnekového dopravníku přemístěn do zásobníku. [7]

Poslední fází je peletování paliva, která se odehrává na peletovací lince. Na této lince dochází k nejprve k rozmělnění vysušeného separátu v drtiči. Poté následuje granulátor, ve kterém dochází za vysokého tlaku a teploty k tvorbě pelet. Pelety z granulátoru vystupují přímo do chladiče, ze kterého po zchlazení míří do koncového skladu a jsou připraveny k energetickému využití. [7]



Obr. 1.1 Schéma peletovací linky[8]

Obr. 1.2 Požadavky dle Směrnice o ekodesignu 2009/125/ES – platné od 1.1.2020 [14] Obr.
1.3 Schéma peletovací linky[8]

2 Vyhodnocení dosavadních naměřených výsledků

V rámci výzkumu pro firmu GEMOS byly na kotelně Energetického ústavu VUT prováděny měření na jejím spalovací zařízení. Výzkum byl prováděn za účelem ověření vlastností vybraných paliv. Toto zařízení se skládá ze zplyňovací komory ZKG a horkovodního kotle KWH. Zařízení je určeno ke spalování dřevní štěpky. Na zařízení bylo provedeno spalování paliv z digestátu, energetického kompostu, šťovíku, dřevní štěpky aj. Na měření vlastností při spalování energetického kompostu a šťovíku jsem se podílel během psaní bakalářské práce. Dále zde jsou uvedeny hodnoty ze zkoušek při spalování digestátu. V této práci jsem pro srovnání uvedl výsledky naměřené při spalování energetického kompostu a digestátu, kdy u digestátu jsou uvedeny výsledky ze dvou měření.

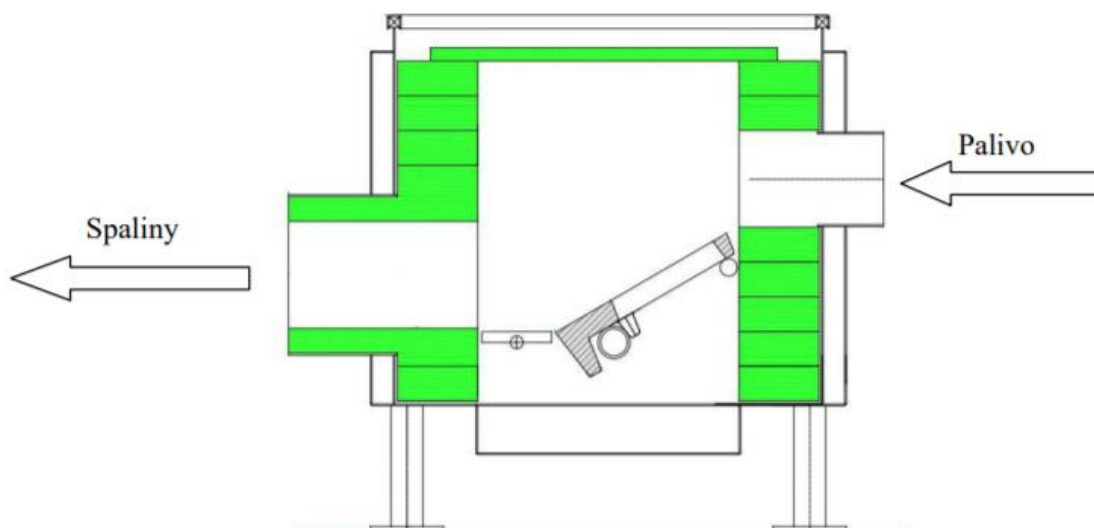
Během těchto měření byly sledovány hodnoty emisí CO, NO_x a tuhých znečišťujících látek (TZL). Měření emisí CO a NO_x probíhalo pomocí přístroje Ultramat Siemens 21/O₂ a 22. U TZL došlo k odběru vzorku v komíně a jeho následujícím přepočtu k referenční hodnotě kyslíku 10 %. Měření probíhalo tak, že nejdříve došlo k optimalizaci spalovacího procesu, tak aby výkon kotle byl přibližně 100 kW. Všechny naměřené hodnoty byly přepočítány podle rovnice 2-1 na hodnoty referenční, aby je bylo možné porovnat s emisními třídami dle ČSN EN 303/5. [9]

$$X_{ref} = X_{nam} \cdot \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2skut}} \quad (2-1)$$

kde	X_{ref}	[mg/m ³]	je referenční hodnota koncentrace emisí,
	X_{nam}	[mg/m ³]	je naměřená hodnota koncentrace emisí,
	O_{2ref}	[%]	je referenční hodnota kyslíku,
	O_{2skut}	[%]	je skutečná hodnota kyslíku při spalování.

2.1 Popis spalovacího zařízení

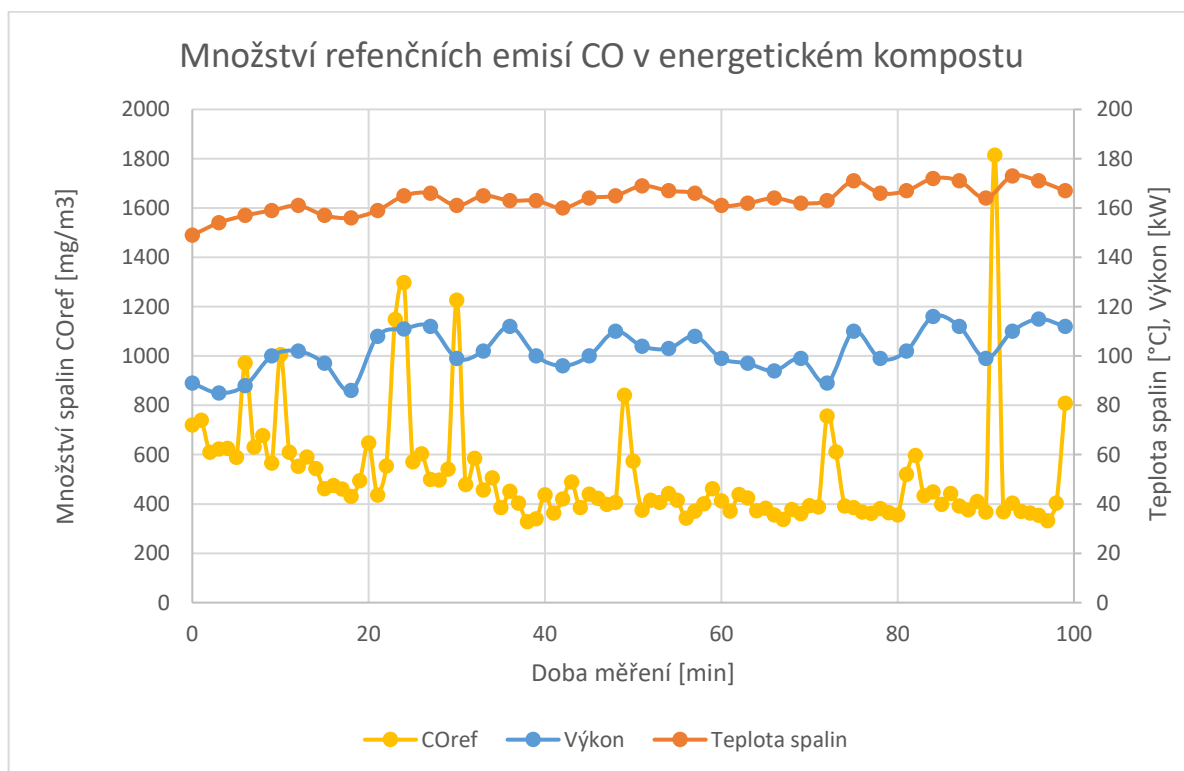
Jak bylo uvedeno výše spalovací zařízení, na kterém probíhaly spalovací zkoušky je horkovodní kotel KWH 120 se zplyňovací komorou ZKG-110. Proces spalování v tomto zařízení, probíhá tak, že do horní části zplyňovací komory je přivedeno nad šikmý rošt palivo. Na šikmém roštu se palivo vlivem gravitace pohybuje směrem dolů. Během tohoto pohybu dochází k ohřívání a sušení. Na rošt šikmý navazuje rošt vodorovný, na kterém dochází k iniciaci paliva. Aby byl proces spalování kvalitní jsou do komory přiváděny dva proudy vzduchu. Celé schéma komory je vidět na následujícím schématu. [10]



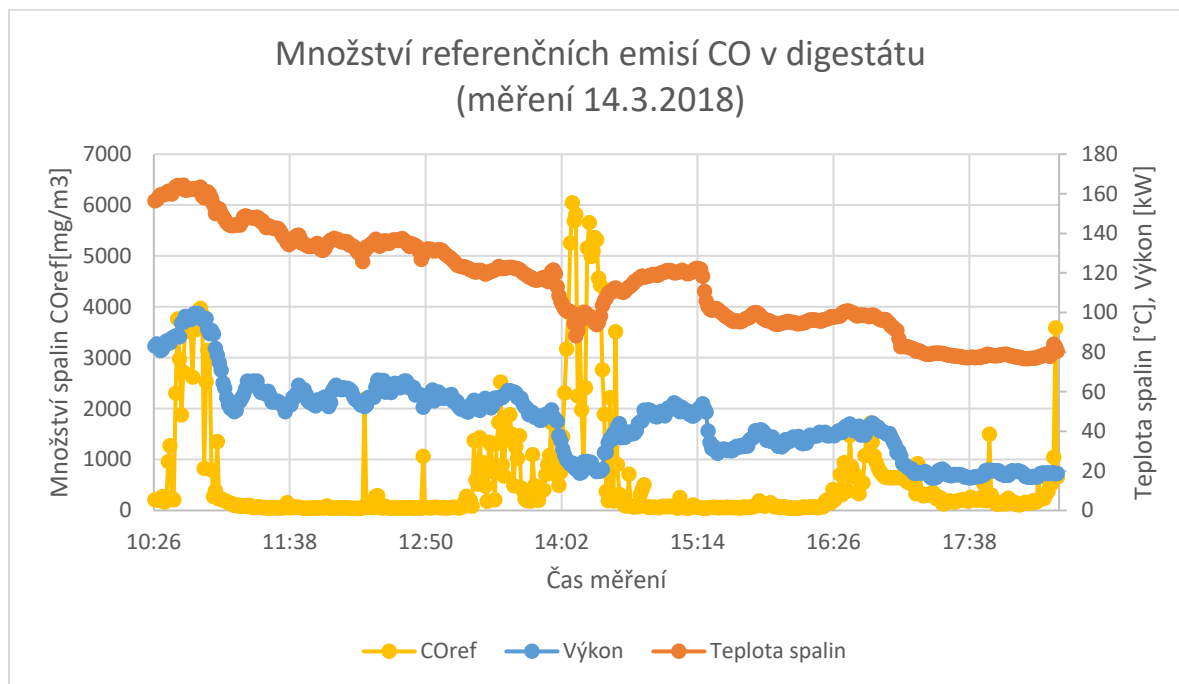
Obr. 2.1 Schéma zplyňovací komory ZKG s rošty[10]

2.2 Emise CO

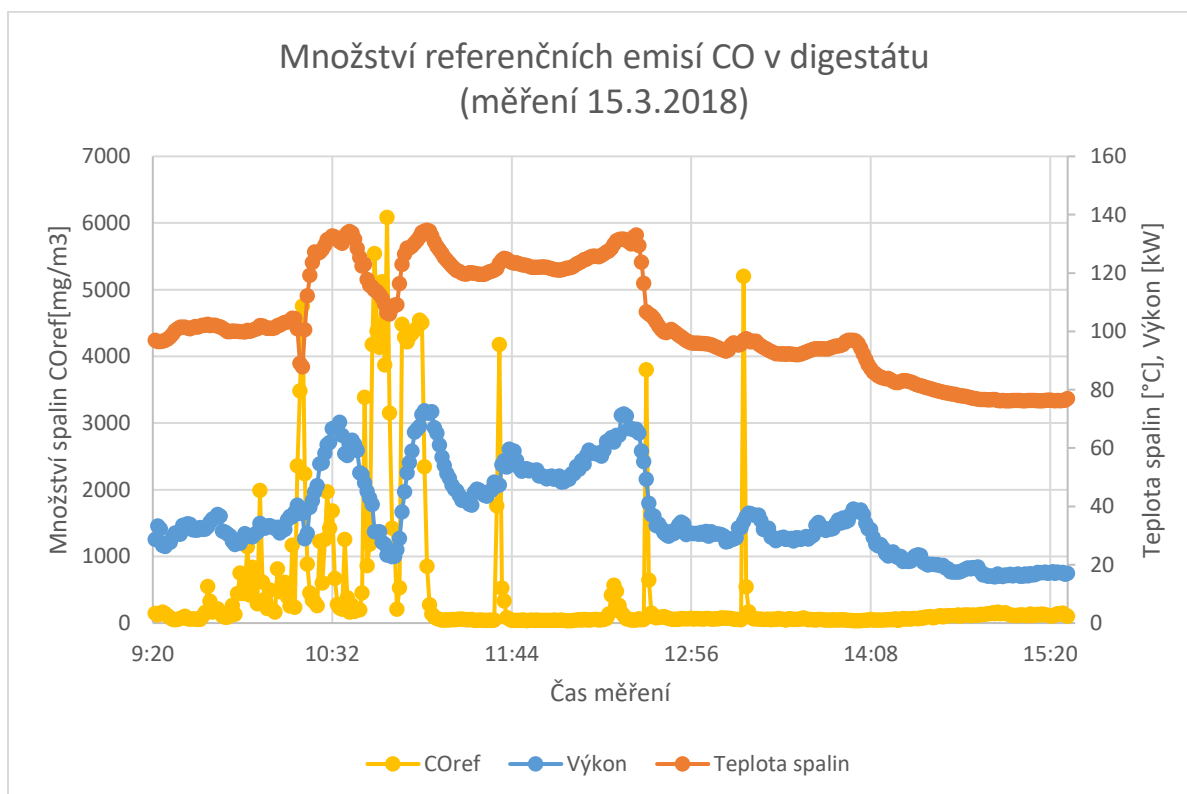
Měření emisí CO za kotlem, je využíváno jako indikátor kvality spalovacího procesu. Vysoké hodnoty emisí CO ukazují na špatně nastavené podmínky při spalování nebo špatně navrženou konstrukci spalovacího zařízení. [11]



Graf 2.1 Množství referenčních emisí CO v energetickém kompostu [9]



Graf 2.2 Množství referenčních emisí CO v digestátu – měření 14.3.2018



Graf 2.3 Množství referenčních emisí CO v digestátu – měření 15.3.2018

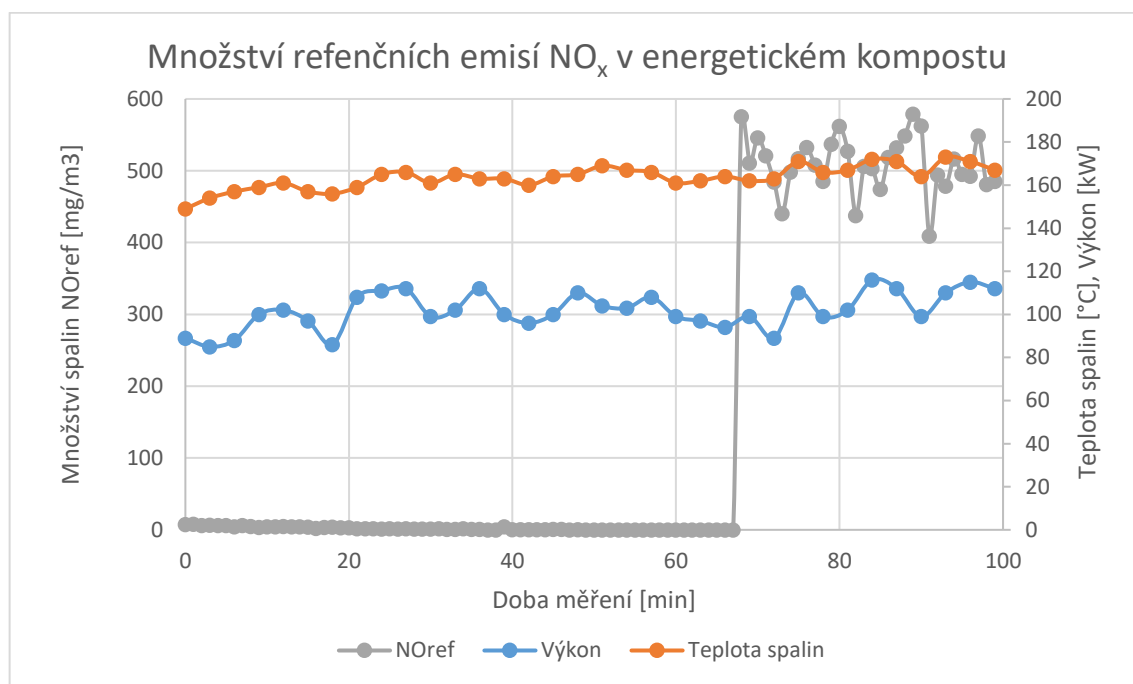
Tab. 2.1 Průměrné množství referenčních emisí CO

Palivo	COref [mg/m ³]
Energetický kompost	513,2368
Digestát – 14.3.2018	603,1135
Digestát – 15.3.2018	463,0281

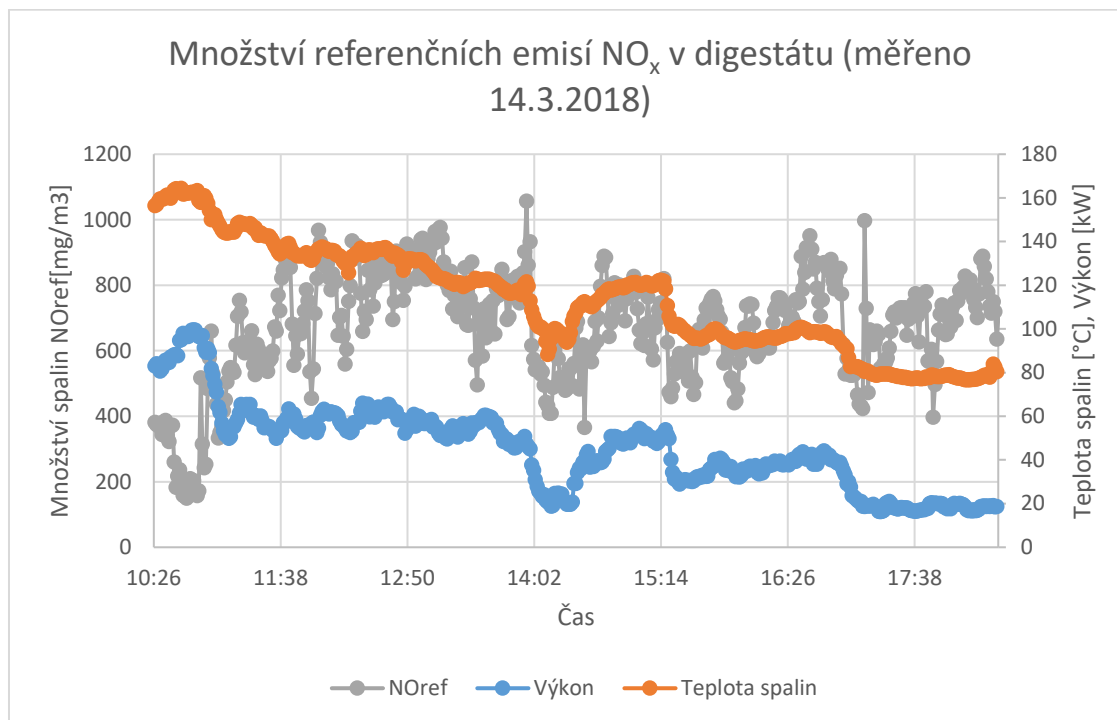
Pokud porovnáme průměrné hodnoty množství CO referenčního s emisní normou ČSN EN 303-5, pak hodnoty naměřené 15. 3. splňují limity pro emisní třídu 5. Hodnoty ze 14. 3. jsou v emisní třídě 4.

2.3 Emise NO_x

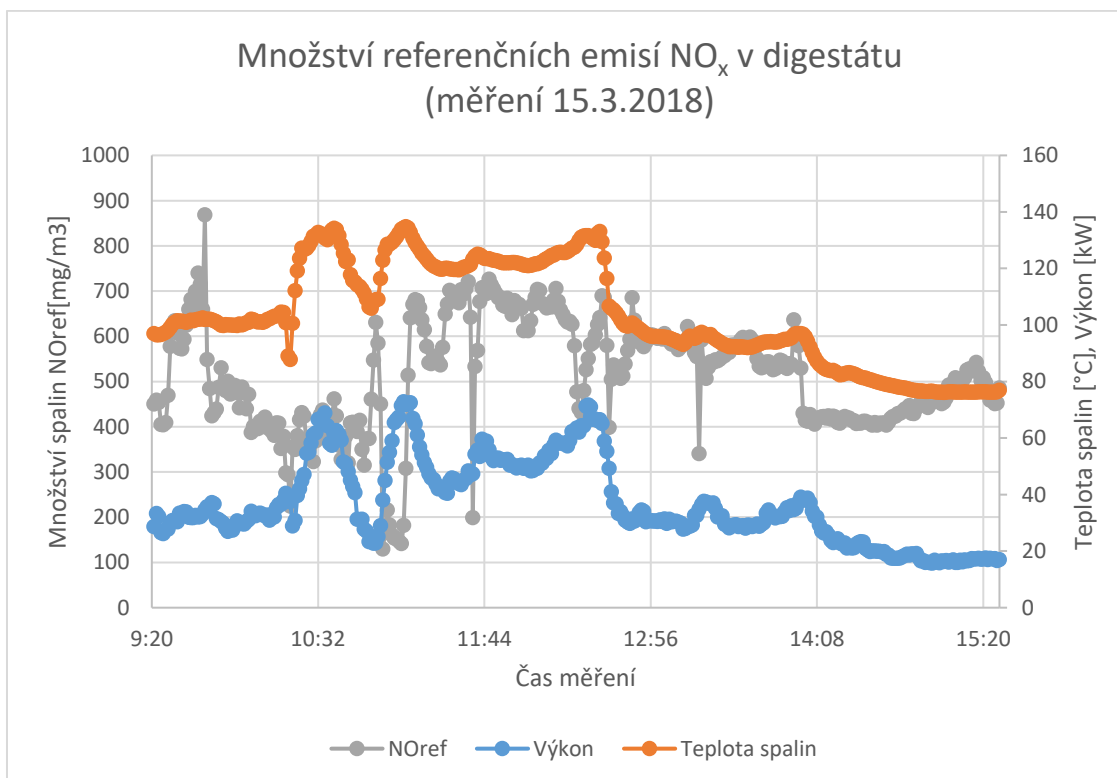
Tvorba těchto emisí je ovlivněna především množstvím samotného dusíku v palivu a teplotou ve spalovací komoře. Při spalování paliv s obsahem dusíku může docházet ke tvorbě dvou typů NO_x. Tvorba prvního typu je závislá pouze na obsahu dusíku v palivu. Tvorba druhého typu tzv. termických NO_x probíhá ve spalovací komoře, pokud dojde k překročení teploty 1000 °C. [11]



Graf 2.4 Množství referenčních emisí NO_x v energetickém kompostu [9]



Graf 2.5 Množství referenčních emisí NO_x v digestátu – měření 14.3.2018



Graf 2.6 Množství referenčních emisí NO_x v digestátu – měření 15.3.2018

Tab. 2.2 Průměrné množství referenčních emisí NO_x

Palivo	NO_{ref} [mg/m^3]
Energetický kompost	164,3728
Digestát – 14.3.2018	663,571
Digestát – 15.3.2018	511,155

Z hlediska emisí NO_x je jejich tvorba u paliv z digestátu podstatně vyšší než u energetického kompostu. Toto je ovlivněno především množstvím dusíku v palivu. Obsah dusíku v energetickém kompostu je přibližně 0,78 %, ovšem u digestátu je obsah asi 2,09 %. Obě tyto hodnoty jsou u vzorků v bezvodém stavu. Řešením vysokého obsahu dusíku u digestátu může být například přimíchávání jiného paliva, např. smrkových pilin.

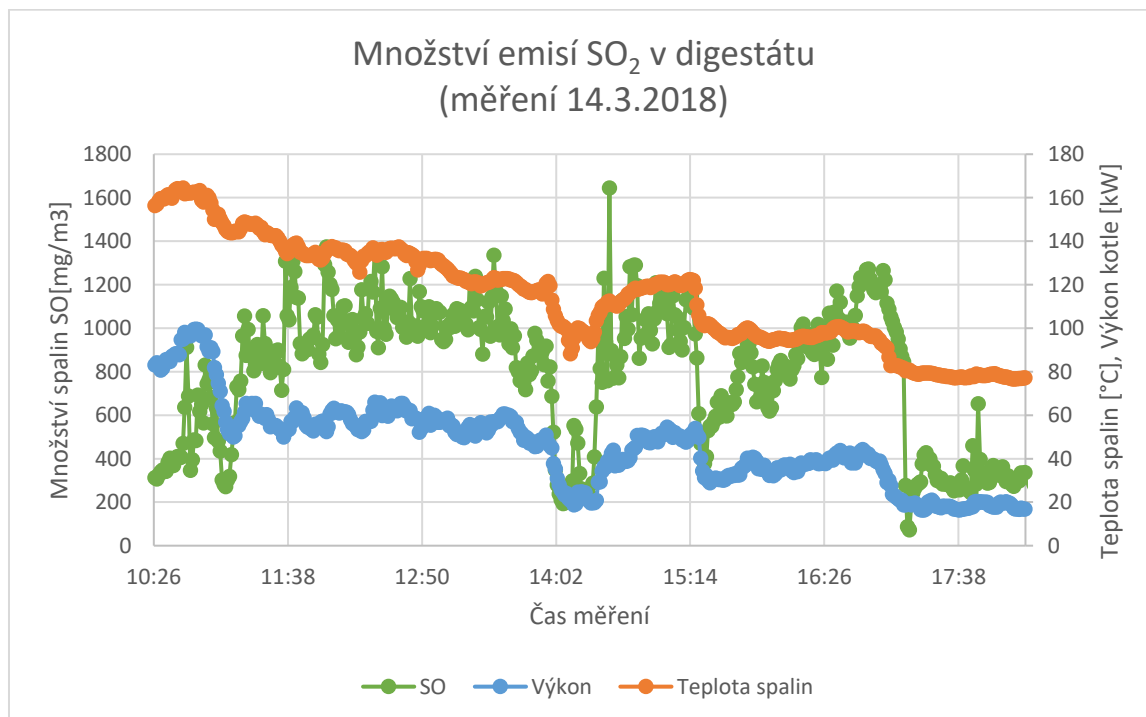
Pokud následující hodnoty porovnáme s *Emisní normou*, která bude platit od 1. 1. 2020, je u paliv digestátu jedná přibližně o trojnásobné překročení tohoto limitu. Energetický kompost tuto normu splňuje.

Platné předpisy	výkon / příkon kotle	typ kotle	tuhé částice (PM)	uhlovodíky (OGC, TOC)	oxid uhelnatý (CO)	oxidy dusíku (NO_x vyjádřeno jako NO_2)	oxid siřičitý (SO_2)
Požadavky dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES – požadavky pro kotle na tuhá paliva, platnost od 1. 1. 2020, jedná se o sezónní emise znečišťujících látek – vážený průměr (85% $P_{\text{snížený}}$, 15% P_{jmen})	do 0,5 MW	automatické kotle	55 (40) ³⁾	27 (20) ³⁾	682 (500) ³⁾	273 ⁴⁾ (200) ³⁾	
		manuální kotle	82 (60) ³⁾	41 (30) ³⁾	955 (700) ³⁾	477 ⁵⁾ (350) ³⁾	

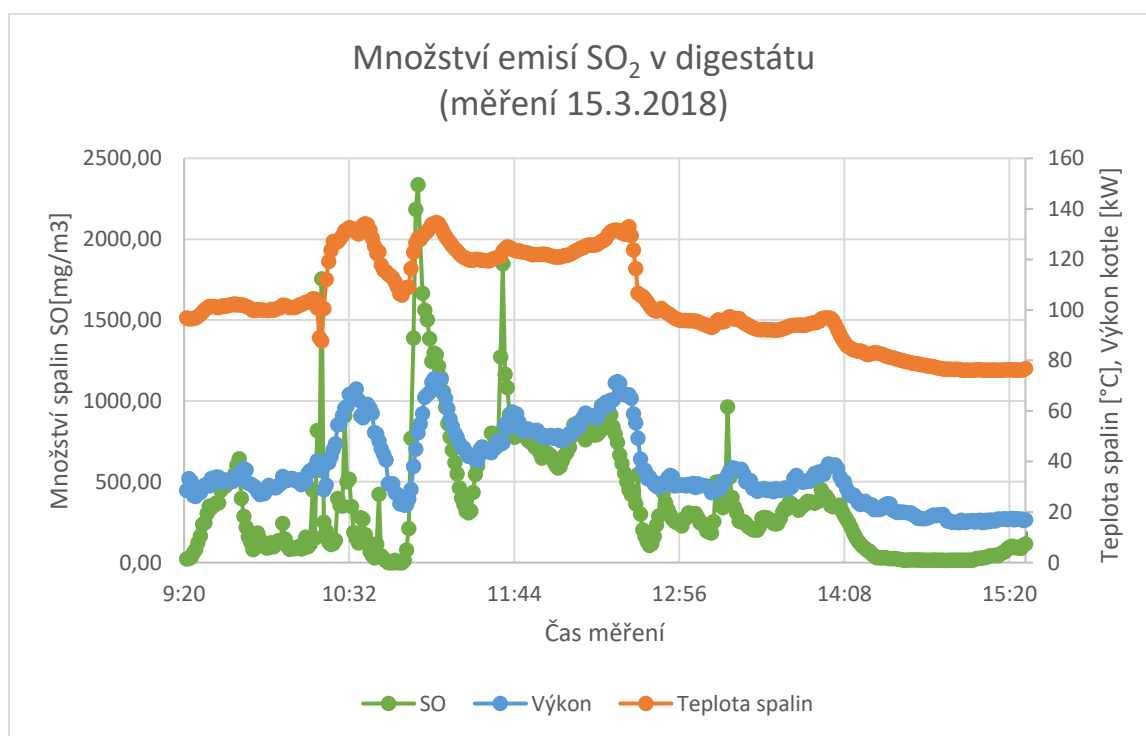
Obr. 2.2 Požadavky dle Směrnice o ekodesignu 2009/125/ES – platné od 1.1.2020 [14]

2.4 Emise SO_2

Obsah síry v biomase je oproti fosilním palivům nižší. Přesto je síra rizikem při spalování biomasy, a to z toho důvodu, že při spalování jsou nižší teploty spalin. Toto může mít za následek podkročení rosného bodu spalin a vznik tzv. nízkoteplotní koroze. Při spalování biomasy může rovněž docházet k reakci síry a vodíku, který je přítomen z důvodu vlhkosti v palivu, za vzniku H_2S – sirovodíku. [12]



Graf 2.7 Množství spalín SO₂ v digestátu – měření 14.3.2018



Graf 2.8 Množství emisí SO₂ v digestátu – měření 15.3.2018

Výše uvedené emisní normy nepojednávají o emisních limitech pro emise SO. Průměrné hodnoty jsou zde uvedeny pouze jako ukazatel nebezpečí nízkoteplotní koroze. V následující tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty za celou dobu měření.

Tab. 2.3 Průměrné množství emisí SO₂

Palivo	SO ₂ [mg/m ³]
Digestát – 14. 3. 2018	781,09
Digestát – 15. 3. 2018	375,08

2.5 Emise TZL

Tuhé znečišťující látky jsou obecně veškeré prachové částice, které jsou odváděny z kotle. Většinou jsou TZL tvořeny částicemi PM₁, tedy částicemi menšími než 0,1 μm. TZL vznikají ze dvou zdrojů. Prvním zdrojem je popelovina obsažená v palivu neboli tuhý nespalitelný zbytek po spalování. Druhým zdrojem jsou produkty nedokonalého spalování jako saze či zkondenzované organické látky. Tvorba TZL také závisí na prvkovém složení. Prvky podporující tvorbu TZL jsou draslík, chlór, sodík, síra aj. [13]

Měření emisí TZL proběhlo pouze při spalovacích zkouškách energetického kompostu. Při těchto zkouškách byly provedeny dva odběry vzorků. Hodnota TZL u prvního vzorku byla **435 mg/m³** a u druhého **419 mg/m³**. Ani u jednoho z těchto vzorků nebyly emisní limity pro TZL, které budou platit od 1. 1. 2020, a to 40 mg/m³. Nutno však podotknout, že měření probíhalo přímo za kotlem. Nebylo zde tedy využito žádných prostředků pro čištění spalin.

3 Stechiometrický výpočet

Pro potřeby návrhu nového spalovacího zařízení byl vytvořen stechiometrický výpočet. Tento výpočet je prováděn pro určení potřebného vzduchu pro spalování a zároveň pro stanovení objemu spalin při spalování digestátu. Veškeré uvedené hodnoty jsou vztaženy na 1 kg paliva a na normální podmínky, což je při 0 °C a 0,101 MPa. [15]

3.1 Vstupní parametry paliva

Základním vstupem pro stechiometrický výpočet jsou vstupní parametry paliva, v tomto případě digestátu. Hodnoty uvedené v následující tabulce byly získány rozbořem v palivové laboratoři Energetického ústavu VUT a prvkovým rozbořem, který proběhl na Ústavu procesního inženýrství VUT.

Tab. 3.1 Vstupní parametry digestátu

Vstupní parametry digestátu			
Vlhkost	W^r	8,904 %	%
Popel v bezvodém vzorku	A^d	13,84 %	%
Vodík v hořlavíně	H^{daf}	5,87 %	%
Uhlík v hořlavíně	C^{daf}	54,21 %	%
Dusík v hořlavíně	N^{daf}	2,83 %	%
Síra v hořlavíně	S^{daf}	0,5 %	%
Kyslík v hořlavíně	O^{daf}	31,39 %	%
Spalné teplo	Q_s^{daf}	15694	kJ/kg
Součinitel přebytku vzduchu	α	1,5	-
Účinnost	η	0,75	-
Výkon	P	110	kW
Množství paliva	M_{pal}	0,0136	kg/s

- Určení složení paliva v surovém stavu

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) = 0,1384 \cdot (1 - 0,08904) = 12,608 \% \quad (3.1-1)$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,0587 \cdot (1 - 0,08904 - 0,12608) = 0,04607 = 4,61 \% \quad (3.1-2)$$

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,5421 \cdot (1 - 0,08904 - 0,12608) = 0,42549 = 42,55 \% \quad (3.1-3)$$

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,0283 \cdot (1 - 0,08904 - 0,12608) = 0,02221 = 2,22 \% \quad (3.1-4)$$

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,005 \cdot (1 - 0,08904 - 0,12608) = 0,00392 = 0,39 \% \quad (3.1-5)$$

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,3139 \cdot (1 - 0,08904 - 0,12608) = 0,24637 = 24,64 \% \quad (3.1-6)$$

- Určení spalného tepla a výhřevnosti

$$Q_s^r = Q_s^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 15694 \cdot (1 - 0,08904 - 0,1261)$$

$$Q_s^r = 12318 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.1-7)$$

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 12318 - 2453 \cdot (0,08904 + 9 \cdot 0,0461)$$

$$Q_i^r = 11089 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.1-8)$$

3.2 Stanovení objemu vzduchu při spalování

- Minimální množství kyslíku potřebné pro spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2}^{Min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (3.2-1)$$

$$V_{O_2}^{Min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,4255}{12,01} + \frac{0,0461}{4,032} + \frac{0,0039}{32,06} - \frac{0,2464}{32} \right) = 0,8794 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}}$$

- Minimální množství suchého vzduchu potřebné pro spálení 1 kg paliva

$$V_{VS}^{Min} = \frac{V_{O_2}^{Min}}{0,21} = \frac{0,8794}{0,21} = 4,188 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}} \quad (3.2-2)$$

- Objem vodní páry na 1 m³ suchého vzduchu

V atmosférickém vzduchu se vždy vyskytuje určité množství vodní páry, která zvětšuje objem vzduchu. Její koncentrace je závislá na teplotě vzduchu, která odpovídá určitému tlaku vzduchu a relativní vlhkosti.

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p^a}{p^c - p^a} = 0,7 \cdot 0,024 = 0,0168 \quad (3.2-3)$$

kde φ – relativní vlhkost vzduchu [%]

p^a – absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu [Pa]

p^c – celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu [Pa]

Relativní vlhkost volím pro tento případ 70 % a součinitel $\frac{p^a}{p^c - p^a}$ při teplotě 20 °C 0,024.

Dále je potřeba určit součinitel f , který vyjadřuje poměrné zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry při dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu.

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p^a}{p^c - p^a} = 1 + V_{H_2O} = 1 + 0,7 \cdot 0,024 = 1,0168 \quad (3.2-4)$$

Hodnoty součinitele f by se měli pohybovat mezi 1,01 a 1,05.

- Minimální množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$V_{VV}^{Min} = V_{VS}^{Min} \cdot f = 4,188 \cdot 1,0168 = 4,255 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{pal}} \quad (3.2-5)$$

- Minimální množství vodní páry

Jedná se o páru, která je obsažena v hořlavině paliva (vodík), ve vlhkosti paliva (vstupní vlhkost paliva) a ve spalovacím vzduchu

$$V_{H_2O} = V_{VV}^{Min} - V_{VS}^{Min} = (f - 1) \cdot V_{VS}^{Min} = (1,0168 - 1) \cdot 4,188 = 0,067 \frac{m^3}{kg_{pal}} \quad (3.2-6)$$

- Skutečné množství vlhkého vzduchu potřebné pro spálení 1 kg paliva s ohledem na součinitel přebytku vzduchu

$$V_{VV}^{skut} = V_{VV}^{Min} \cdot \alpha = 4,255 \cdot 1,5 = 6,382 \frac{m^3}{kg_{pal}} \quad (3.2-7)$$

3.3 Stanovení množství spalin při spalování

- Minimální množství suchých spalin, které vznikne při dokonalém spálení 1 kg paliva.

$$V_{SS}^{Min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

- Množství oxidu uhličitěho ve spalinách

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VS}^{Min} \quad (3.3-1)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,4255 + 0,0003 \cdot 4,188 = 0,78987 \frac{Nm^3}{kg}$$

- Množství oxidu siřičitého ve spalinách

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0039 = 0,00268 \frac{Nm^3}{kg} \quad (3.3-2)$$

- Množství dusíku ve spalinách

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{VS}^{Min} \quad (3.3-3)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0222 + 0,7805 \cdot 4,188 = 3,28628 \frac{Nm^3}{kg}$$

- Množství argonu ve spalinách

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VS}^{Min} = 0,0092 \cdot 4,188 = 0,03853 \frac{Nm^3}{kg} \quad (3.3-4)$$

- Množství suchých spalin

$$V_{SS}^{Min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

$$V_{SS}^{Min} = 0,78987 + 0,00268 + 3,28628 + 0,03853 = 4,117 \frac{Nm^3}{kg}$$

- Množství vodních par ve spalinách

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,81}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,41}{18,016} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{VS}^{Min} \quad (3.3-5)$$

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0461 + \frac{22,41}{18,016} \cdot 0,08904 + (1,0168 - 1) \cdot 4,188$$

$$V_{H_2O}^S = 0,690 \frac{m^3}{kg_{pal}}$$

- Minimální množství vlhkých spalin

$$V_{SV}^{Min} = V_{SS}^{Min} + V_{H_2O}^S = 4,117 + 0,69 = 4,807 \frac{m^3}{kg_{pal}} \quad (3.3-6)$$

- Množství vlhkých spalin při spalování s přebytkem vzduchu α

$$V_{SV} = V_{SV}^{Min} + (\alpha - 1) \cdot V_{VV}^{Min} = 4,807 + (1,5 - 1) \cdot 4,255 \quad (3.3-7)$$

$$V_{SV} = 6,935 \frac{m^3}{kg_{pal}}$$

3.4 Hustota spalin

- Měrný podíl oxidu uhličitého ve spalinách

$$x_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SV}} = \frac{0,78987}{6,935} = 0,1139 \quad (3.4-1)$$

- Měrný podíl oxidu siřičitého ve spalinách

$$x_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SV}} = \frac{0,00267}{6,935} = 3,86E - 4 \quad (3.4-2)$$

- Měrný podíl dusíku ve spalinách

$$x_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SV}} = \frac{3,28628}{6,935} = 0,4739 \quad (3.4-3)$$

- Měrný podíl argonu ve spalinách

$$x_{Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{SV}} = \frac{0,03852}{6,935} = 0,00556 \quad (3.4-4)$$

- Měrný podíl vodních par ve spalinách

$$x_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SV}} = \frac{0,68979}{6,935} = 0,09947 \quad (3.4-5)$$

- Měrný podíl vzduchu ve spalinách

$$x_{vzduch} = 1 - (x_{CO_2} + x_{SO_2} + x_{N_2} + x_{Ar} + x_{H_2O}) \quad (3.4-6)$$

$$x_{vzduch} = 1 - (0,1139 + 3,86E - 4 + 0,4739 + 0,00556 + 0,09947) = 0,40625$$

- Výsledná hustota spalin

$$\rho_{SP} = (x_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + x_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + x_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + x_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + x_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} + x_{vzduch} \cdot \rho_{vzduch}) \quad (3.4-7)$$

Tab. 3.2 Hustota složek spalin

Hustota složek		
ρ_{CO_2}	1,9768	kg/m ³
ρ_{SO_2}	2,9268	kg/m ³
ρ_{N_2}	1,25047	kg/m ³
ρ_{Ar}	1,78385	kg/m ³
ρ_{H_2O}	0,8058	kg/m ³
ρ_{vzduch}	1,293	kg/m ³

$$\rho_{SP} = (0,1139 \cdot 1,9768 + 3,86E - 4 \cdot 2,9268 + 0,4739 \cdot 1,25047 + 0,00556 \cdot 1,78385 + 0,09947 \cdot 0,8058 + 0,40625 \cdot 1,293)$$

$$\rho_{SP} = 1,434 \frac{kg}{m_n^3}$$

3.5 Hmotové množství vzduchu a spalin

- Minimální hmotové množství spalovacího kyslíku

$$G_{O_2 Min} = 32 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (3.5-1)$$

$$G_{O_2 Min} = 32 \cdot \left(\frac{0,4255}{12,01} + \frac{0,0461}{4,032} + \frac{0,0039}{32,06} - \frac{0,2464}{32} \right) = 1,257 \frac{kg}{kg_{pal}}$$

- Hmotové minimální množství suchého spalovacího vzduchu na 1 kg spáleného paliva

$$G_{VSMIn}^S = \frac{1}{0,2331} \cdot G_{O_2 Min} = \frac{1}{0,2331} \cdot 1,257 = 5,392 \frac{kg}{kg_{pal}} \quad (3.5-2)$$

- Hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu

$$G_{VVMIn}^S = G_{VSMIn}^S + (f - 1) \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 0,804 \cdot G_{O_2 Min} \quad (3.5-3)$$

$$G_{VVMIn}^S = 5,392 + (1,0168 - 1) \cdot \frac{1}{0,21} \cdot 0,804 \cdot 1,257 = 5,449 \frac{kg}{kg_{pal}}$$

Hodnota 0,804 je měrná hmota vodní páry při 0 °C a 0,101 MPa

3.6 Tepelná bilance ohniště

Tato bilance stanovuje množství uvolněného tepla ve spalovací komoře. Jedná se bilanci mezi teplem přivedeným v palivu a ve spalovacím vzduchu na jedné straně a teplem odvedeným ve spalinách.

- Hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu

$$Q_{pal} = Q_i^r \cdot M_{pal} \cdot \eta \quad (3.6-1)$$

$$Q_{pal} = 11089 \cdot 0,0136 \cdot 0,75 = 46,2 \frac{kJ}{s}$$

- Hmotové minimální množství vlhkého spalovacího vzduchu

V rámci zjednodušení výpočtu je uvažována, po konzultaci s vedoucím DP Ing. Martinem Lisým, ztráta chemickým a mechanickým nedopalem 5 %.

$$Q_{vzduch} = (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot i_{VV} \quad (3.6-2)$$

Entalpie vzduchu i_{VV} je nahrazena vztahem $c_{VV} \cdot t_{VV}$. Hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu je brána z tabulek pro teplotu 25 °C.

$$Q_{vzduch} = (1 - 0,05) \cdot 6,382 \cdot 1,3195 \cdot 25 = 200 \frac{kJ}{kg}$$

- Teplo obsažené ve spalinách

$$Q_{spaliny} = M_{pal} \cdot (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SV} \cdot i_{SV} \quad (3.6-3)$$

$$Q_{spaliny} = 0,0136 \cdot (1 - 0,05) \cdot 6,935 \cdot i_{SV}$$

Jelikož entalpie spalín není známa, je potřeba ji v dalším kroku dopočítat z bilanční rovnice ohniště, která vyjadřuje rovnováhu mezi stavem před a po spálení paliva. Entalpie spalín je nezbytně nutná pro výpočet teploty nechlazeného plamene.

$$Q_{pal} + Q_{vzduch} = Q_{spaliny} \quad (3.6-4)$$

$$Q_i^r \cdot M_{pal} \cdot \eta + (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot i_{VV} = M_{pal} \cdot (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SP} \cdot i_{SV}$$

$$i_{SV} = \frac{Q_i^r \cdot \eta + (1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{VV} \cdot c_{VV} \cdot t_{VV}}{(1 - \xi_{MN} - \xi_{CN}) \cdot V_{SV}} \quad (3.6-5)$$

$$i_{SV} = \frac{11089 \cdot 0,75 + (1 - 0,05) \cdot 6,382 \cdot 1,3195 \cdot 25}{(1 - 0,05) \cdot 6,935}$$

$$i_{SV} = 1292,79 \frac{kJ}{kg}$$

3.7 Teplota nechlazeného plamene

Tato teplota se určuje za pomoci entalpie spalín a poměrného složení spalín. Entalpie jednotlivých složek spalín při daných teplotách jsou uvedeny v následující tabulce. Výsledná entalpie spalín pro jednotlivé teploty při daném složení spalín je rovněž uvedena v následující tabulce.

Tab. 3.3 Entalpie jednotlivých složek spalín v závislosti na teplotě

Entalpie $\left[\frac{kJ}{m^3} \right]$								
	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
CO ₂	357	559	772	994	1225	1462	1705	1952
SO ₂	392	610	836	1070	1310	1550	1800	2052
H ₂ O	304	463	626	795	969	1149	1334	1526
N ₂	260	392	527	666	804	948	1094	1241
vzduch	267	407	551	699	850	1004	1160	1318
Ar	186	278	372	465	557	650	743	835
	303,77	462,62	626,18	794,89	965,85	1142,17	1321,43	1503,12

Výpočet entalpie pro jednotlivé teploty probíhal podle následujícího algoritmu. Pro příklad uvádím pouze výpočet pro teplotu 200 °C.

$$i_{SP200} = (x_{CO_2} \cdot 357 + x_{SO_2} \cdot 392 + x_{N_2} \cdot 260 + x_{Ar} \cdot 186 + x_{H_2O} \cdot 304 + x_{vzduch} \cdot 267) \quad (3.7-1)$$

$$i_{SP200} = (0,1139 \cdot 357 + 3,86E-4 \cdot 392 + 0,4739 \cdot 260 + 0,00556 \cdot 186 + 0,09947 \cdot 304 + 0,40625 \cdot 267)$$

$$i_{SP200} = 303,77 \frac{kJ}{kg}$$

Jelikož entalpie spalin z tepelné bilance ohniště je 1225,25 kJ/kg, což je mezi teplotou 700 °C a 800 °C, jsem tedy za pomoci lineární interpolace dopočítat teplotu nechlazeného plamene.

$$T_{NP} = 700 + (i_{sv} - i_{700^\circ C}) \cdot \frac{800 - 700}{i_{800^\circ C} - i_{700^\circ C}} \quad (3.7-2)$$

$$T_{NP} = 700 + (1292,79 - 1142,17) \cdot \frac{800 - 700}{1321,43 - 1142,17}$$

$$T_{NP} = 784,02^\circ C$$

3.8 I-t diagram spalin bez recirkulace

I-t diagram spalin slouží pro znázornění závislosti entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu. Jelikož při změně paliva, vlivem jeho složení, dochází ke změně entalpie, slouží tento diagram pro převod veličin mezi sebou.

Vztah pro výpočet entalpie spalin o teplotě t , které vzniknou spálením 1 kg tuhého paliva s přebytkem vzduchu α je následující:

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.8-1)$$

- Entalpie spalin (pro teplotu 100 °C)

$$I_{Smin}^t = i_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + i_{SO_2} \cdot V_{SO_2} + i_{N_2} \cdot V_{N_2} + i_{Ar} \cdot V_{Ar} + i_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop} \quad (3.8-2)$$

$$I_{Smin}^t = 170 \cdot 0,78987 + 191 \cdot 0,00268 + 129 \cdot 3,28628 + 93 \cdot 0,03853 + 151 \cdot 0,067$$

$$I_{Smin}^t = 572,42 \frac{kJ}{kg}$$

- Měrné teplo vzduchu (pro teplotu 100 °C)

$$d = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 \quad (3.8-3)$$

$$d = (1,0168 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3$$

$$d = 9,949 \frac{g}{kg}$$

$$c = c_s + 0,0016 \cdot d = 1,300 + 0,0016 \cdot 9,949 = 1,316 \frac{kJ}{m^3 K} \quad (3.8-4)$$

- Entalpie vzduchu (pro teplotu 100 °C)

$$I_{Vmin}^t = V_{VS}^{min} \cdot (c \cdot t)_{vz} \quad (3.8-5)$$

$$I_{Vmin}^t = 4,188 \cdot 1,316 \cdot 100 = 551,07 \frac{kJ}{kg}$$

- Celková entalpie spalin $\alpha=1,5$; $t=100^\circ C$; $f=1,016$

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad (3.8-6)$$

$$I_s^{t,\alpha} = 572,42 + (1,5 - 1) \cdot 551,07 = 847,96 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

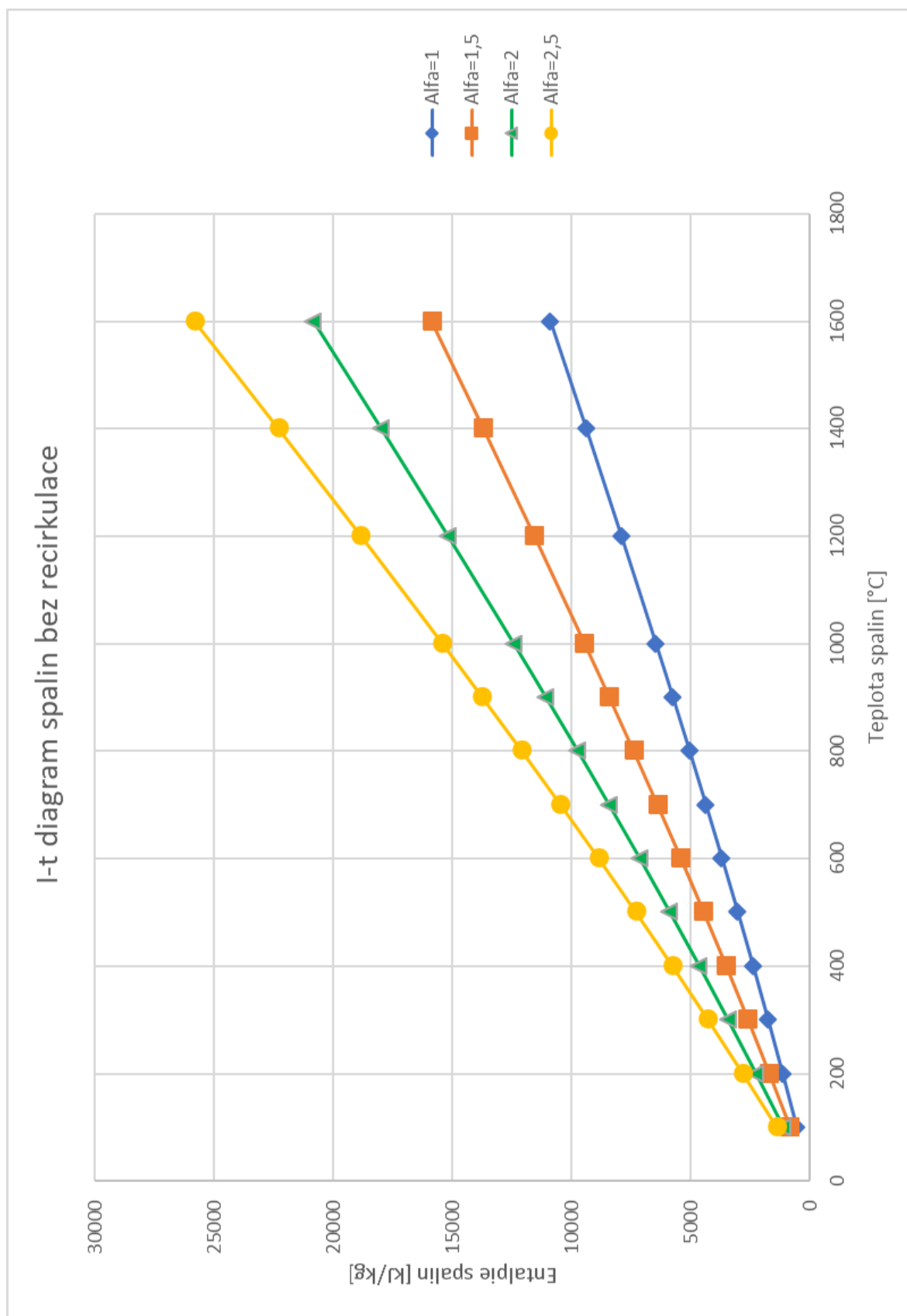
Tab. 3.4 Entalpie spalin a měrné teplo vzduchu

Teplota	Entalpie spalin					Měrné teplo vzduchu	
t	i _{CO2}	i _{SO2}	i _{N2}	i _{Ar}	i _{H2O}	c _s	c _v
[°C]	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$
100	170	191	129	93	151	1,3	1,316
200	357	394	260	186	305	1,307	1,323
300	559	610	392	278	463	1,317	1,333
400	772	836	526	372	626	1,329	1,345
500	994	1070	664	465	795	1,343	1,359
600	1225	1310	804	557	968	1,356	1,372
700	1462	1554	947	650	1149	1,371	1,387
800	1705	1801	1093	743	1335	1,384	1,400
900	1952	2052	1241	835	1526	1,398	1,414
1000	2203	2304	1392	928	1723	1,41	1,426
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1,433	1,449
1400	3239	3323	2009	1300	2559	1,453	1,469
1600	3769	3587	2325	1577	3002	1,471	1,487

Stejný výpočet je proveden pro všechny teploty. Z tohoto výpočtu dostaneme hodnoty entalpie spalin pro danou teplotu a entalpie vzduchu pro danou teplotu. Poté jsou ještě stanoveny celkové entalpie v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu. Všechny výsledky jsou přehledně uvedeny v následující tabulce a grafu.

Tab. 3.5 Závislost entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu

t	I _{Smin}	I _{Vmin}	I _s	I _s	I _s	I _s
[°C]	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right]$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2$	$\alpha = 2,5$
100	572,42	551,07	572,42	847,96	1123,49	1399,03
200	1165,08	1108,01	1165,08	1719,08	2273,08	2827,08
300	1773,13	1674,57	1773,13	2610,42	3447,7	4284,99
400	2396,88	2252,86	2396,88	3523,32	4649,75	5776,18
500	3041,28	2845,39	3041,28	4463,97	5886,67	7309,37
600	3699,6	3447,14	3699,6	5423,16	7146,73	8870,30
700	4373,10	4065,63	4373,1	6405,91	8438,73	10471,54
800	5061,55	4689,99	5061,55	7406,54	9751,53	12096,52
900	5760,03	5328,99	5760,03	8424,53	11089	13753,53
1000	6471,97	5971,36	6471,97	9457,66	12443,3	15429,02
1200	7918,69	7281,22	7918,69	11559,3	15199,9	18840,52
1400	9390,99	8612,01	9391	13697	18003	22309,01
1600	10889,16	9962,90	10889,2	15870,6	20852,1	27119,37168



Graf 3.1 I-t diagram spalin bez recirkulace

3.9 Měrná tepelná kapacita spalin

Měrná tepelná kapacita konečné směsi spalin se spočítá z entalpie jednotlivých složek spalin při dané teplotě. Jelikož víme, že teplota spalin je mezi 700 °C a 800 °C jsou pro nás podstatné hodnoty měrné tepelné kapacity na těchto teplotách, proto budou uvedeny výpočty pouze na těchto teplotách. Ostatní hodnoty byly dopočítány podle stejného výpočtu a jsou uvedeny v následující tabulce. V rámci zjednodušení výpočtu zanedbáváme vliv argonu na výslednou měrnou tepelnou kapacitu výsledné směsi spalin.

Tab. 3.6 Měrná tepelná kapacita jednotlivých složek spalin v závislosti na teplotě

Měrná tepelná kapacita spalin $c_p \left[\frac{kJ}{m^3 K} \right]$								
složka	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
CO ₂	1,6696	1,7863	1,8626	1,9298	1,9892	2,0419	2,0889	2,1311
SO ₂	1,8631	1,9427	2,001	2,0725	2,1227	2,1688	2,2063	2,224
H ₂ O	1,5062	1,5227	1,5425	1,5648	1,5791	1,6147	1,6413	1,6684
N ₂	1,2951	1,2994	1,3069	1,3167	1,3281	1,3404	1,3533	1,3664
vzduch	1,3	1,307	1,317	1,329	1,343	1,356	1,371	1,384
c_{p_sp}	1,483	1,502	1,521	1,54	1,559	1,58	1,60	1,619

- Měrná tepelná kapacita pro teplotu 700 °C

$$c_{p_{sp700}} = x_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2700}} + x_{SO_2} \cdot c_{p_{SO_2700}} + x_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O700}} + x_{N_2} \cdot c_{p_{N_2700}} + x_{vz} \cdot c_{p_{vz700}} \quad (3.9-1)$$

$$c_{p_{sp700}} = 0,1139 \cdot 2,0889 + 3,86E-04 \cdot 2,2063 + 0,09947 \cdot 1,6413 + 0,4739 \cdot 1,3533 + 0,40625 \cdot 1,371$$

$$c_{p_{sp700}} = 1,60 \frac{kJ}{m^3 K}$$

- Měrná tepelná kapacita pro teplotu 800 °C

$$c_{p_{sp800}} = x_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2800}} + x_{SO_2} \cdot c_{p_{SO_2800}} + x_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O800}} + x_{N_2} \cdot c_{p_{N_2800}} + x_{vz} \cdot c_{p_{vz800}} \quad (3.9-2)$$

$$c_{p_{sp800}} = 0,1139 \cdot 2,1311 + 3,86E-04 \cdot 2,224 + 0,09947 \cdot 1,6684 + 0,4739 \cdot 1,3664 + 0,40625 \cdot 1,384$$

$$c_{p_{sp800}} = 1,619 \frac{kJ}{m^3 K}$$

- Výsledná hodnota měrné tepelné kapacity pro teplotu nechlazeného plamene 785,43 °C

Tento výpočet provedeme lineární aproximací z hodnot měrné tepelné kapacity pro teploty 700 °C a 800 °C, teploty nechlazeného plamene 784,02 °C.

$$c_{sp764,34} = c_{p700} + (c_{p800} - c_{p700}) \cdot \frac{785,43 - 700}{800 - 700} \quad (3.9-3)$$

$$c_{sp764,34} = 1,60 + (1,619 - 1,60) \cdot \frac{785,43 - 700}{800 - 700}$$

$$c_{sp764,34} = 1,617 \frac{kJ}{m^3 K}$$

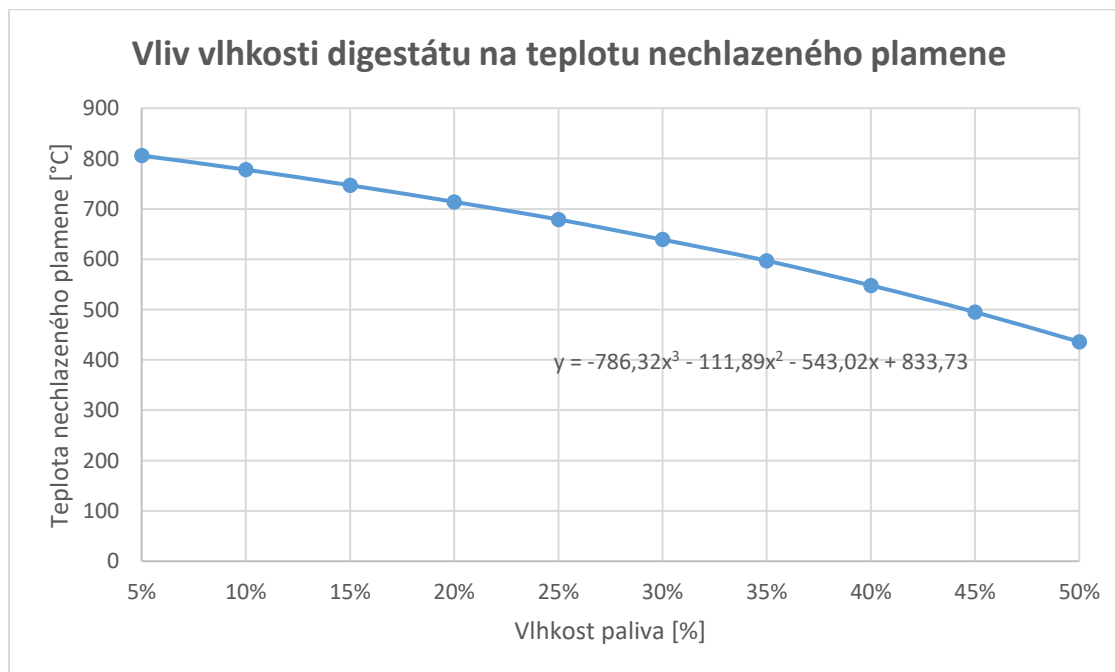
3.10 Vliv vlhkosti paliva na teplotu nechlazeného plamene

Jelikož se vlhkost digestátu pro různé vzorky může značně lišit, z důvodu různého vysušení digestátu, proběhl po dohodě s vedoucím DP, opakovaný výpočet rovnic 3.1-2 až 3.7-2 pro vlhkosti od 5 % do 50 % s krokem 5 %.

Vlhkost je jediný důležitý parametr, který se v tomto výpočtu mění. Ostatní parametry jako přebytek vzduchu, součinitel f a teplota vzduchu zůstávají stejné.

Tab. 3.7 Závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti paliva

W^r [%]	T_{np} [°C]
5	806
10	778
15	747
20	714
25	679
30	639
35	597
40	548
45	495
50	436



Graf 3.2 Vliv vlhkosti digestátu na teplotu nechlazeného plamene

3.11 Vliv teploty vzduchu na teplotu nechlazeného plamene

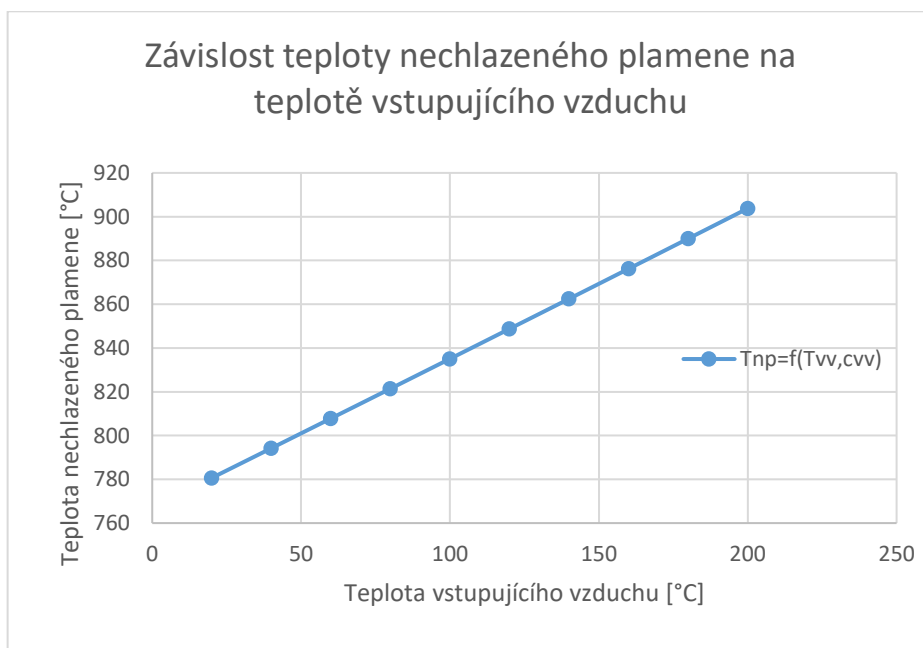
Dalším důležitým faktorem, který má vliv na teplotu nechlazeného plamene je teplota přiváděného vzduchu. Pro tento výpočet byly stanoveny hodnoty v rozmezí 20–200 °C s krokem 20 °C. Hodnoty teploty nechlazeného plamene pro různé teploty přiváděného vzduchu byly získány cyklickým výpočtem rovnic 3.6-2 až 3.7-2.

Pro tyto výpočty byly ponechány hodnoty přebytku spalovacího vzduchu, součinitele f totožné jako v předchozích výpočtech. Vlhkost vzorku byla brána $W^t=8,904$ %. Jelikož hodnota měrné tepelné kapacity vzduchu pro jednotlivé teploty je různá, je potřeba tuto hodnotu dle tabulek lineárně aproximovat.

Výsledky pro jednotlivé teploty jsou shrnuty v následující tabulce a závislost je vykreslena v grafu.

Tab. 3.8 Vliv teploty vzduchu na teplotu nechlazeného plamene

T_{vv} [°C]	c_{vv} [$\frac{kJ}{m^3K}$]	T_{np} [°C]
20	1,3193	780,63
40	1,3206	794,21
60	1,3217	807,8
80	1,3229	821,42
100	1,324	835,06
120	1,3254	848,74
140	1,3268	862,45
160	1,3282	876,19
180	1,3296	889,96
200	1,331	903,76



Graf 3.3 Závislost teploty nechlazeného plamene na teplotě vstupujícího vzduchu

3.12 Recirkulace spalin

Výpočet recirkulace neproběhl, jelikož výrobce kotle jej nepožadoval. Celková konstrukce kotle je nevýhodná a recirkulace spalin by se nevyplatila.

4 Spalovací zařízení GEMOS ZKG

Na základě zpracované návrhu byla společností GEMOS vyrobena nová zplyňovací komora, která byla instalována na kotelnu Energetického ústavu VUT v Brně. Horkovodní kotel KWH byl ponechám původní.

4.1 Popis konstrukce komory

Nová spalovací komora je tvořena ocelovou skříní a vyzdívkou ze šamotových cihel. Tato vyzdívka je určena k zajištění akumulace tepla a tím k udržení stabilní teploty uvnitř komory. Vrchní část skříně je pomocí zvedáku možno otevřít a tím je umožněno se dostat do vnitřní části komory. Vnitřní konstrukce komory je členěna na dvě komory a šikmý posuvný rošt. Vnitřní konstrukce kotle není znázorněna z důvodu plánované právní ochrany. V rámci komory je instalován systém vnitřního chlazení. Ani tento systém zde není detailně popsán z důvodu plánované právní ochrany.

Palivo je do komory přiváděno pomocí dvou šnekových podavačů ze zásobníku. Vstup paliva do samotné komory je v boční stěně, přibližně uprostřed výšky celé skříně nad šikmým roštem. Palivo se vlivem posuvu roštu a gravitace posouvá na roštu. Během tohoto posuvu dochází k ohřátí, sušení a následnému zapálení paliva. Popel propadá skrze rošt do popelníku, ze kterého je odváděn pryč z komory.

Primární vzduch je do komory přiváděn pod šikmý rošt. Vstup sekundárního vzduchu je v prostoru nad roštem.

V prostoru komory dochází k měření teploty. Termočlánky pro měření teplot jsou umístěny ve stěně komory. Dále je měřena teplota v hrdle na výstupu z komory. Teplota spalin je měřena až na výstupu za horkovodním kotlem.

4.2 Měření a regulace kotle

Součástí návrhu bylo navržení nového ovládacího systému. Tento návrh byl zpracován na ústavu Automatizace a Informatiky VUT v Brně. Při vývoji tohoto ovládacího programu byl kladen důraz především na jednoduchost obsluhy a možnost řízení pomocí vzdáleného přístupu. Díky těmto požadavkům je potřeba, aby bylo ovládání kotle značně autonomní, tedy aby v případě změny, některého z parametrů, samo dokázalo jiný parametr upravit, tak aby byla zajištěna stabilita spalovacího procesu a minimální tvorba emisí.

Samotná regulace je rozdělena na několik funkčních celků:

Palivové cesty

Z hlediska regulace jsou zde dva podstatné celky. Prvním je regulace přívodu paliva do spalovací komory. Toto je řešeno pomocí ovládání šnekových dopravníků.

Druhým celkem jsou vlastnosti paliva. Vliv na regulaci kotle je takový, že na základě vlastností paliva jsou upravovány hodnoty, k nimž je potřeba se během celého spalovacího procesu přiblížit.

Spalovací komora

Regulace ve spalovací komoře probíhá na dvou místech. První je regulace primárního a sekundárního vzduchu. Jsou zde umožněny dvě varianty regulace pro přívod 1° a 2° vzduchu.

První varianta počítá se samostatnými ventilátory. Druhá pak se společným ventilátorem pro oba vzduchy a s přerozdělováním pomocí klapky.

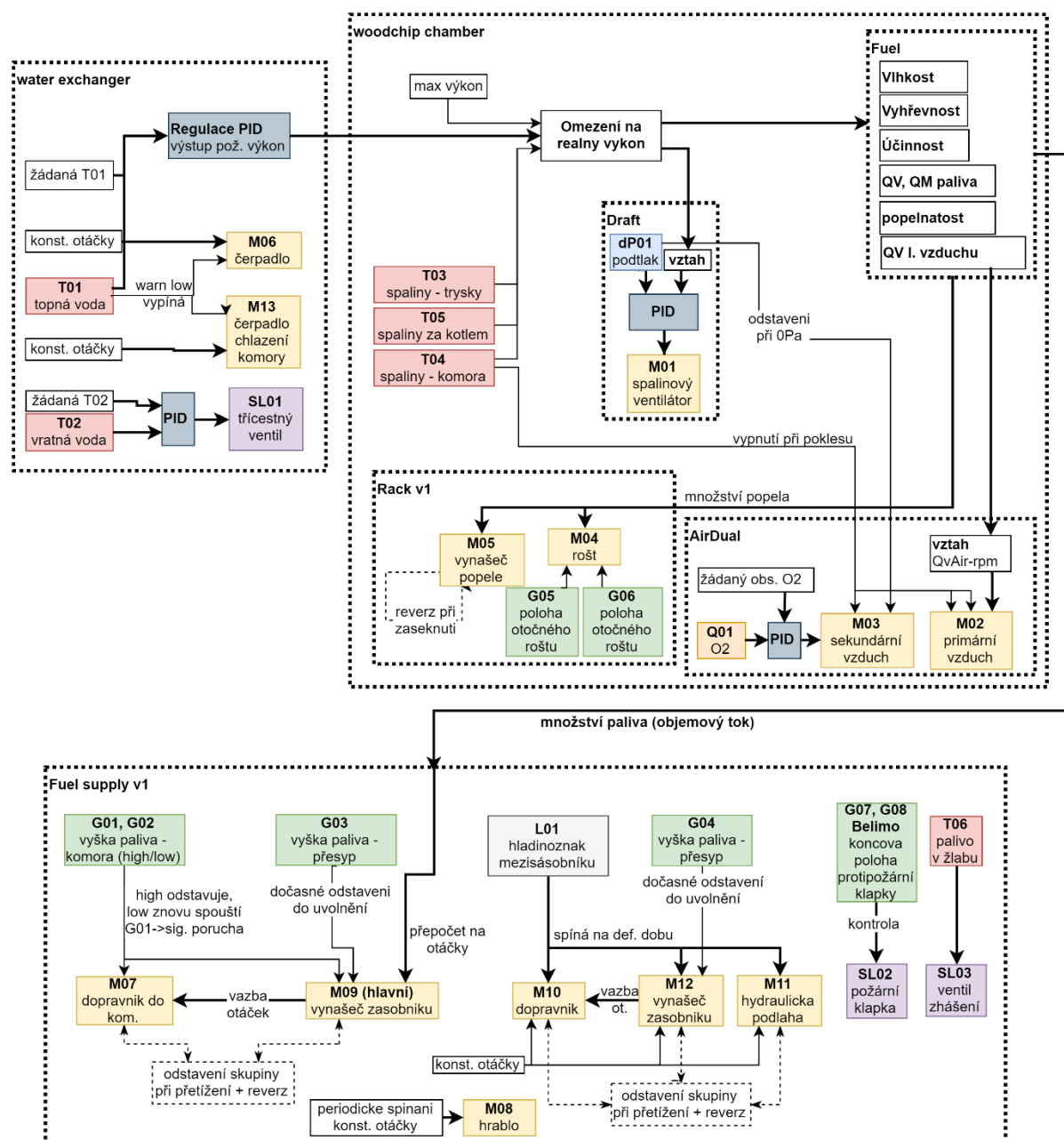
Druhá regulace uvnitř spalovací komory se týká pohonu roštu. Tato regulace je připravena jak pro přesuvný rošt, tak pro rošt otočný.

Dále se uvažuje, že bude instalována lambda sonda do spalinové cesty, která bude sloužit pro porovnání referenčního kyslíku (okolního vzduchu) a spalín.

Výměník

Zde se počítá s umožněním regulace jak pro teplovodní výměník, tak pro výměník teplovzdušný.

Pro spolehlivou funkci celého systému je nezbytné měření a řízení celé řady parametrů. Do kategorie měření patří: snímače teplot, snímače tlakové difference a koncové snímače. Mezi řízené parametry patří: elektromotory a servopohony.

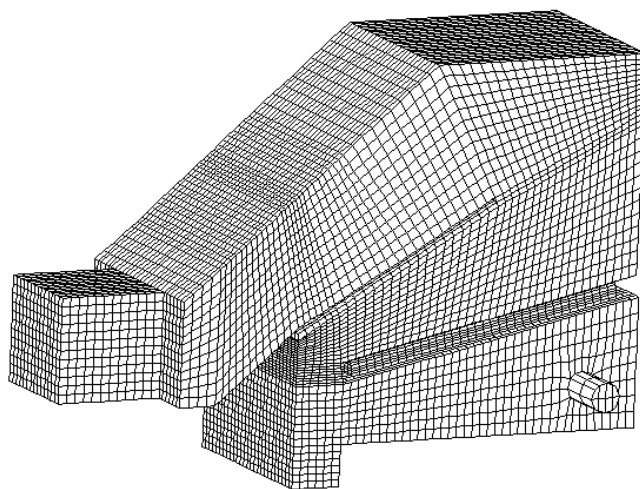


Obr. 4.1 Schéma regulace kotle

5 Model spalovací komory

Pro potřeby výzkumu bylo vytvořeno několik modelů spalovací komory. Tyto modely byly vytvořeny pomocí počítačového modelu, který využívá metodu kontrolních objemů (CFD) určenou pro řešení obecných úloh termo-fluidní mechaniky. Modely zachycují teplotní a rychlostní poměry v kotli. Modely spalovací komory byly vytvořeny s cílem ověřit tři případy chlazení teplosměnných a sálavých ploch v kotli. V prvním případě model ověřuje vliv chlazeného roštu, v druhém se jedná o ověření vlivu chlazeného roštu a chlazených bočních stěn ohniště. V posledním případě byl ověřován případ, kdy bude chlazený rošt, boční stěny ohniště a také klenba.

Ve výpočtu byly využity geometrické rozměry komory, které posloužily k vytvoření výpočetní sítě modelu. Dále byla jako náhrada za probíhající exoterní reakce použito zjednodušené zadání uvolňované tepelné energie pomocí objemových zdrojů tepelného výkonu. Celkový výkon 100 kW byl rozdělen tak, že 25 kW se uvolnilo ve vrstvě nad roštem, 25 kW bylo uvolněno v návazném prostoru spalovací komory pod klenbou a 50 kW bylo uvolněno v oblasti od přívodu sekundárního vzduchu po zlom dohořivacího kanálu.



Obr. 5.1 Výpočetní síť matematického modelu

Model dále počítal s provozními následujícími provozními parametry:

- množství primárního vzduchu 89 kg/h, teplota 15 °C
- množství sekundárního vzduchu 134 kg/h, teplota 15 °C
- výpočet realizovaný pro ustálené turbulentní stlačitelné proudění
- podtlak na výstupu z kotle -50 Pa
- vrstva paliva nahrazena odpovídající porozitou
- nachlazené stěny komory uvažovány jako adiabatické
- užito sálání tepla, povrchová teplota chlazených stěn 90 °C, absorpce stěn 60 %, odrazivost stěn 40 %

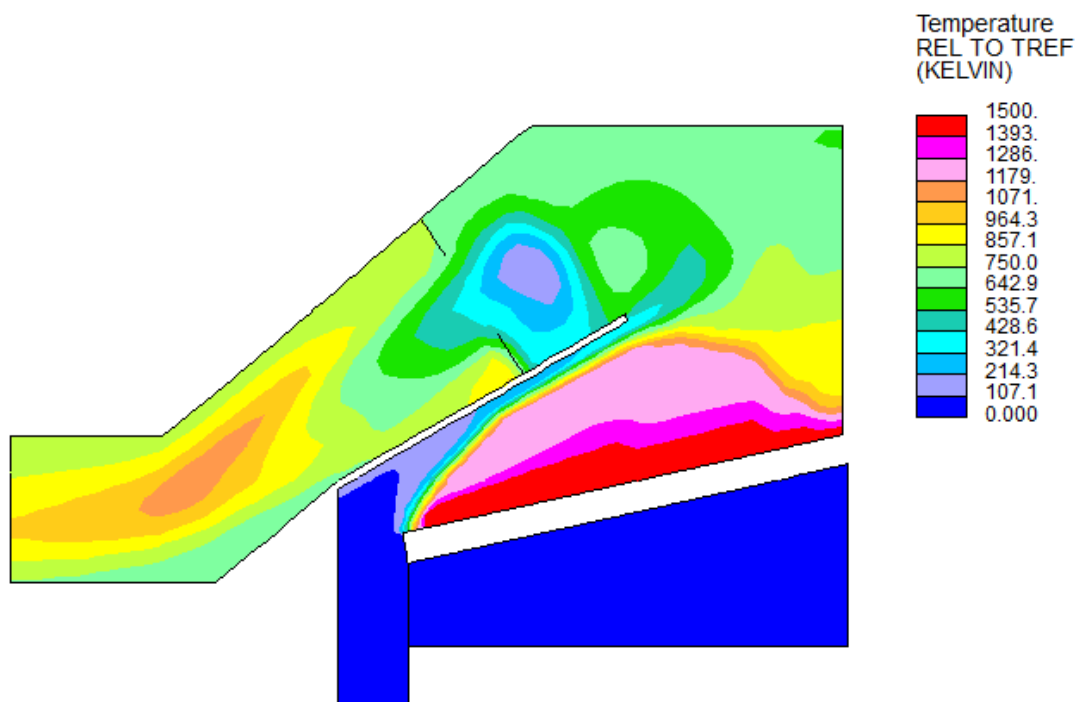
Dále byly zadány okrajové podmínky:

- vstup primárního vzduchu pod rošt – 89 kg/s, 15 °C, okrajová podmínka INLET
- vstup sekundárního vzduchu – 134 kg/s, 15 °C, okrajová podmínka INLET
- výstup spalin z řešené na konci dohořivacího kanálu – okrajová podmínka OUTLET s nulovým gradientem teploty a rychlosti

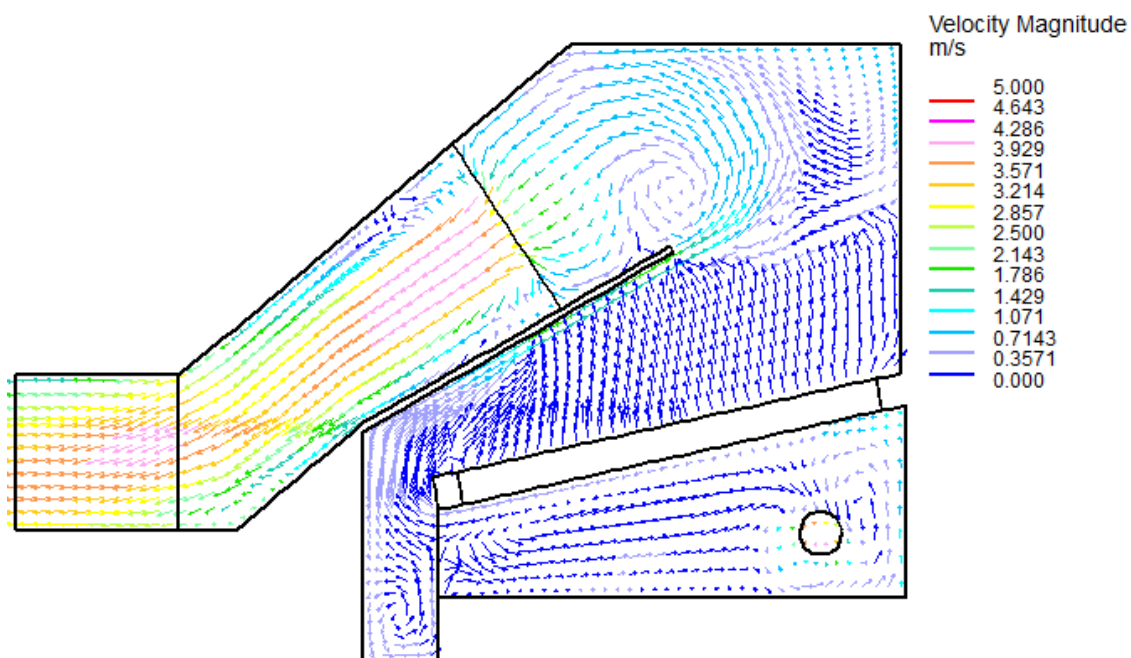
- celkový tepelný výkon spalovacího zařízení 100 kW

5.1 Model s chlazeným roštem

Chlazená stěna byla předepsána v modelu na horní rovinné ploše roštu. Ostatní povrchové plochy modelu byly uvažovány jako adiabatické.



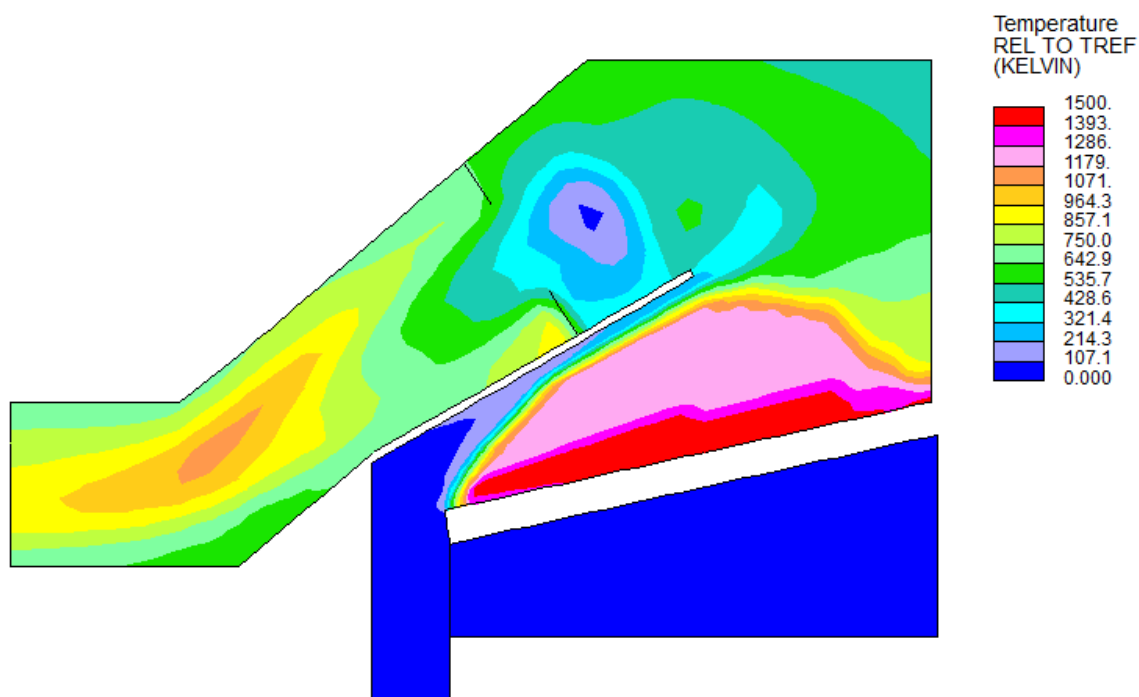
Obr. 5.2 Teplotní pole ve středové rovině kotle ve °C



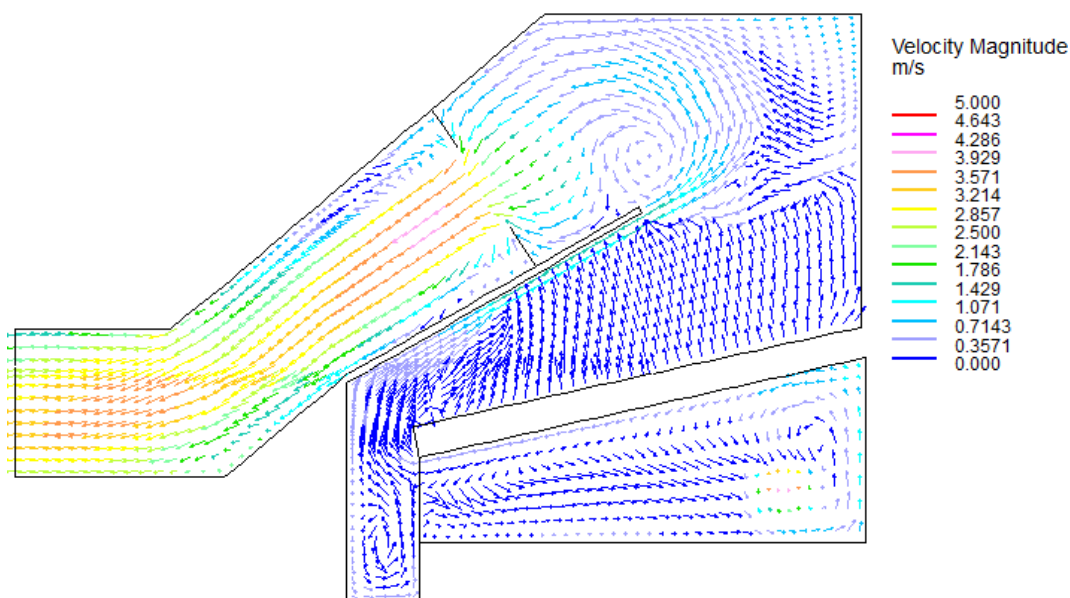
Obr. 5.3 Rychlostní pole ve středové rovině kotle

5.2 Model s chlazeným roštem a chlazenými stěnami

Chlazené stěny byly předepsány v modelu na horní rovinné ploše roštu a přední a zadní stěně spalovací komory. Ostatní povrchové plochy byly uvažovány jako adiabatické.



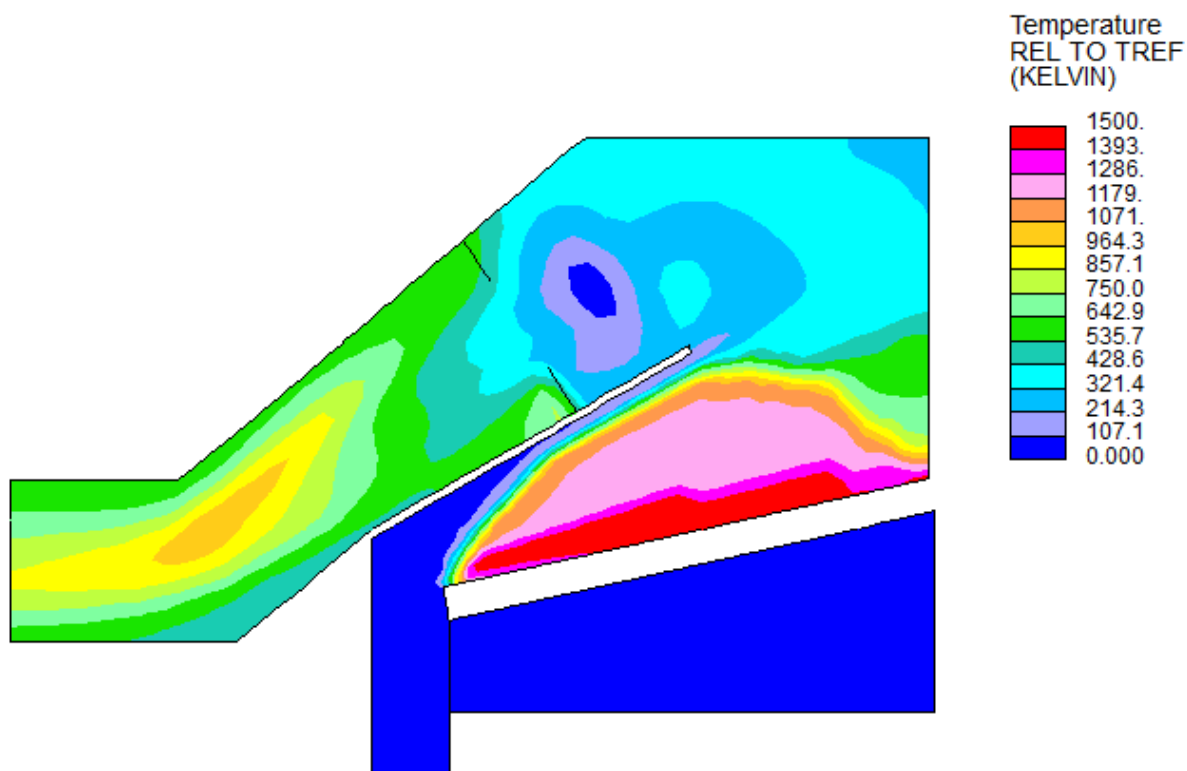
Obr. 5.4 Teplotní pole ve středové rovině kotle ve °C



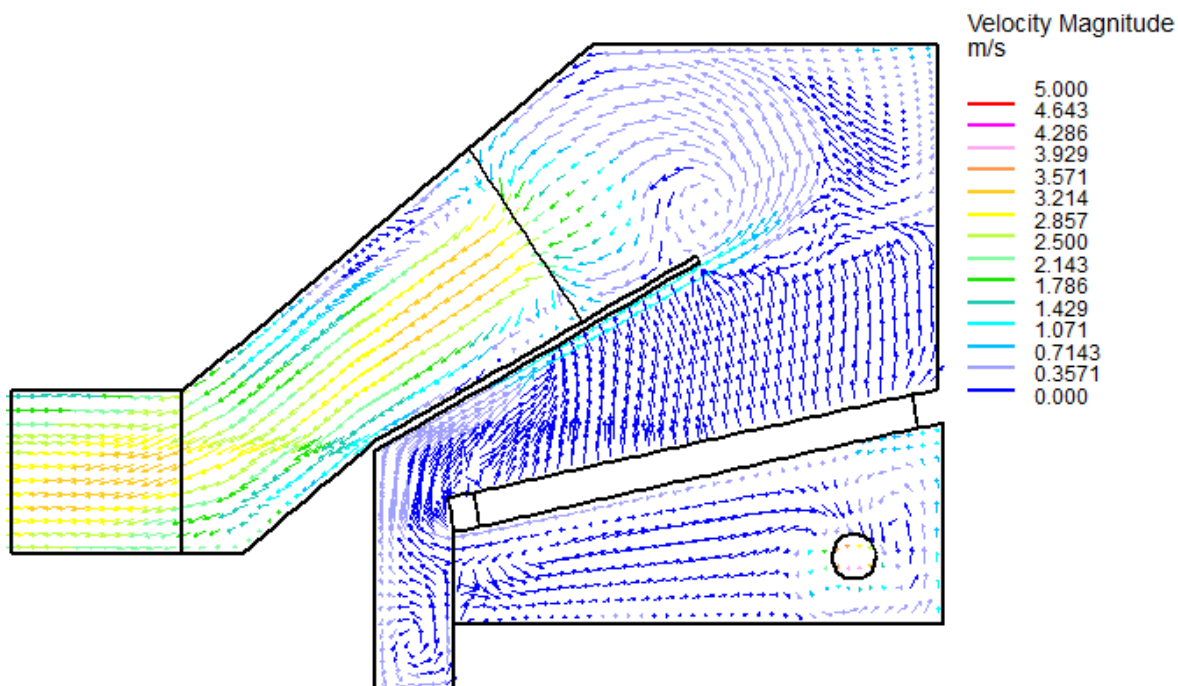
Obr. 5.5 Rychlostní pole ve středové rovině kotle

5.3 Model s chlazeným roštem, chlazenými stěnami a klenbou

Chlazené stěny byly předepsány na horní rovinné ploše roštu, přední a zadní stěně spalovací komory a na obě strany vložené desky vytvářející klenbu. Ostatní povrchové plochy uvažovány jako adiabatické.



Obr. 5.6 Teplotní pole ve středové rovině kotle ve °C



Obr. 5.7 Rychlostní pole ve středové rovině kotle

5.4 Srovnání parametrů spalin na výstupu z dohořivacího kanálu

Tab. 5.1 Srovnání parametrů na výstupu

	Střední teplota na výstupu plošně průměrována [°C]	Střední rychlost spalin na výstupu [m/s]	Střední teplota na výstupu hmotnostně průměrována [°C]
Chlazený rošt	837,5	2,4115	885,8
Chlazený rošt + stěny	781,2	2,2949	829,8
Chlazený rošt + stěny + klenba	671,2	2,0656	719,7

Teplota na výstupu uvedená v prvním sloupci tabulky odpovídá průměrné teplotě na výstupu získané plošným průměrováním. Nezohledňuje tedy skutečnost, že rychlé jádro proudu o vysoké teplotě střední hodnotu teploty při hmotnostním středování posouvá výše. Hmotnostně průměrovaná teplota je uvedena v posledním sloupci tabulky. Tato hodnota byla dopočtena s využitím střední rychlosti spalin na výstupu. Tato rychlost reprezentuje střední hodnotu složky rychlosti proudu spalin kolmé na výstupní průřez.

Pro dopočtení byly použity následující hodnoty:

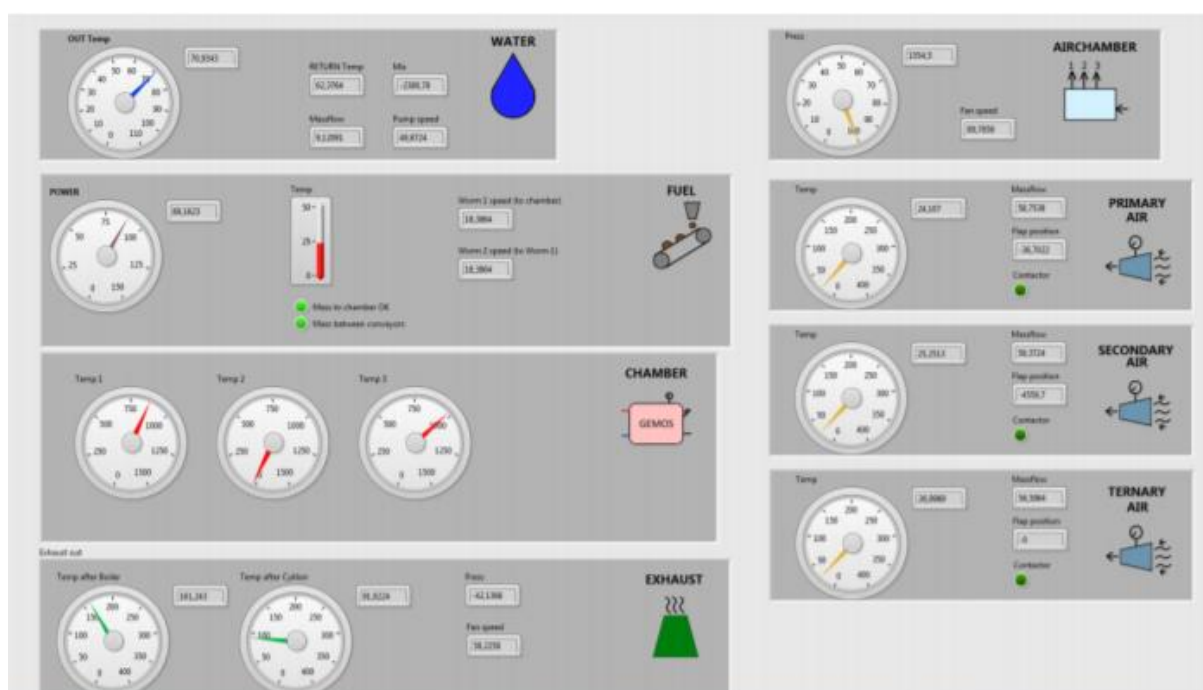
- plocha výstupního průřezu $0,0855 \text{ m}^2$
- hmotnostní tok spalin 223 kg/h
- molární hmotnost spalin $28,96 \text{ kg/kmol}$

6 Spalovací zkoušky kotle

Tato část diplomové práce se zabývá ověřením provozních parametrů kotle GEMOS při porovnání s teoretickými vypočtenými hodnotami. Měření bylo zaměřeno především na hodnoty teplot v ohništi a tvorbu emisí. Na základě naměřených hodnot byly navrženy další úpravy spalovací komory a jejich praktické ověření. Celý proces ověřování probíhal na kotelně Energetického ústavu VUT v Brně.

6.1 Měřicí přístroje

Pro měření teplot v ohništi byly využity sondy, termočlánky a průtokoměry umístěné v ohništi, na vstupech a výstupech z ohniště a za horkovodním kotlem. Záznam naměřených hodnot na těchto prvcích probíhal v prostředí LabView (Obr. 6.1)



Obr. 6.1 Software pro ovládání kotle [9]

Dalšími použitými přístroji, které sloužily k určování množství jednotlivých složek emisí byl ULTRAMAT 21 a 22 s funkcí autokalibrace. Tyto přístroje využívají k odběru spalin z komínu, v místě, kde je teplota spalin přibližně 200 °C, vytápěnou hadici. Pro zajištění odtahu spalin z komínu je použit spalínový ventilátor. Tato hadice přivádí spaliny přes soustavu filtrů k samotným analyzátorům. Soustava filtrů slouží k minimalizaci množství pevných částí ve spalinách, které se dostanou k analyzátorům. Pevné části ve spalinách by mohly negativně ovlivnit výsledek měření.

Přístroj ULTRAMAT 21 slouží pro analýzu plynů CO a O₂. Rozsah měření je u CO 0-5000 ppm. Pro O₂ je tento rozsah 0–25 %.

Analýzátor ULTRAMAT 22 je určen k analýze plynů NO_x a S. Měřicí rozsah pro NO_x je 0-1500 mg/m³. Pro S je rozsah 0-5000 mg/m³.

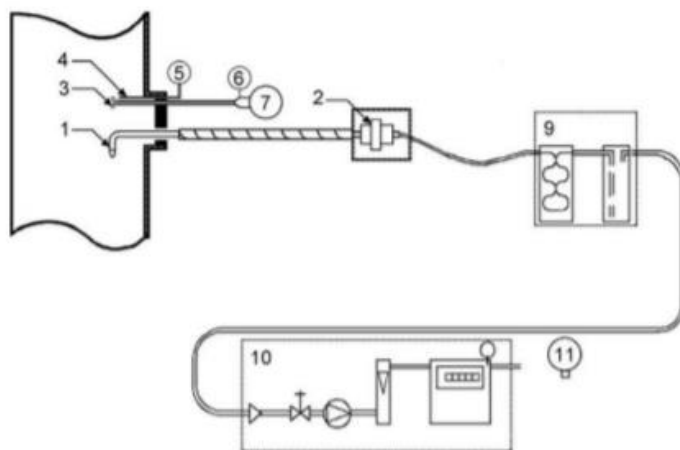
Aby bylo možné hodnoty, které jsou naměřeny těmito analyzátoři porovnat s emisními limity, je nutné je pomocí rovnice 2-1, přepočítat na hodnoty referenční.



Obr. 6.2 Analyzátor spalín ULTRAMAT 21 a 22 [10]

Poslední skupinou přístrojů použitých v rámci tohoto měření byly přístroje sloužící k určení množství emisí TZL. První přístroj z této skupiny byl analyzátor spalín TESTO 350 XL, který slouží k měření rychlosti spalín, na jejímž základě se určí velikost odběrové hubice. Po zvolení velikosti hubice dojde k připojení vzorkovacího zařízení s připraveným filtrem, na kterém docházelo k zachycení pevných částic. Po celou dobu měření, které trvá 30 minut, je nezbytné k zajištění izokinetických vlastností, aby bylo udrženo stále proudění.

Hodnoty je opět nutné přepočítat na hodnoty referenční pro možnost porovnání.



Obr. 6.3 Schéma měření TZL (1- hubice sondy, 2- sestava filtru, 3- Prandtova trubice, 4- teplotní čidlo, 5- měřidlo teploty, 6- měření statického tlaku, 7- měření diferenciálního tlaku, 9- chladicí a sušící zařízení, 10- sací jednotka, 11- tlakoměr)[16]

6.2 Přípravy měření

Pro většinu měření nebyl použit digestát jako palivo, pro které je komora určena. Digestát byl použit pouze pro případ chlazeného roštu a stěn, a to ve dvou úpravách (řezanka a pelety). Zbylá měření byla provedena s dřevní štěpkou, jelikož digestátu je v současné době nedostatek.

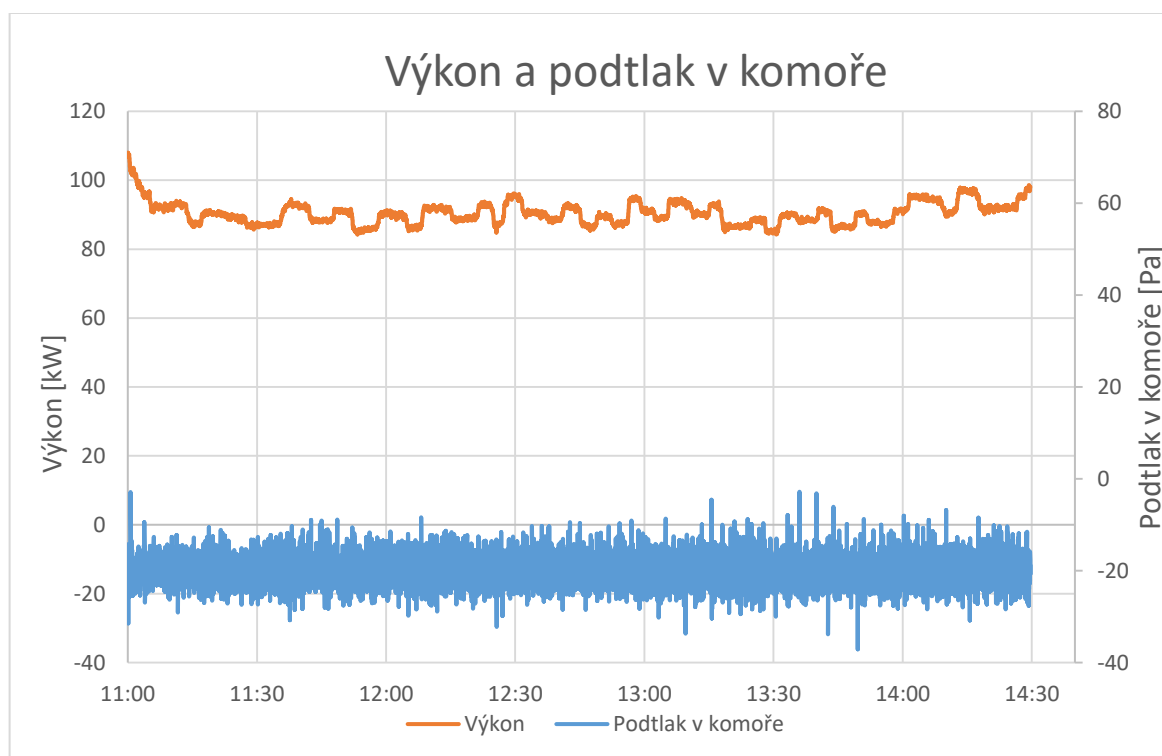
Pro zahájení zkoušek bylo potřebné zajistit pomalé nahřívání celého spalovacího zařízení, prohrátí na provozní teploty a zajištění správné funkce chladicí soustavy. Samotný záznam dat z měření byl započat až po ustálení soustavy.

6.3 Ověření vlivu chlazení

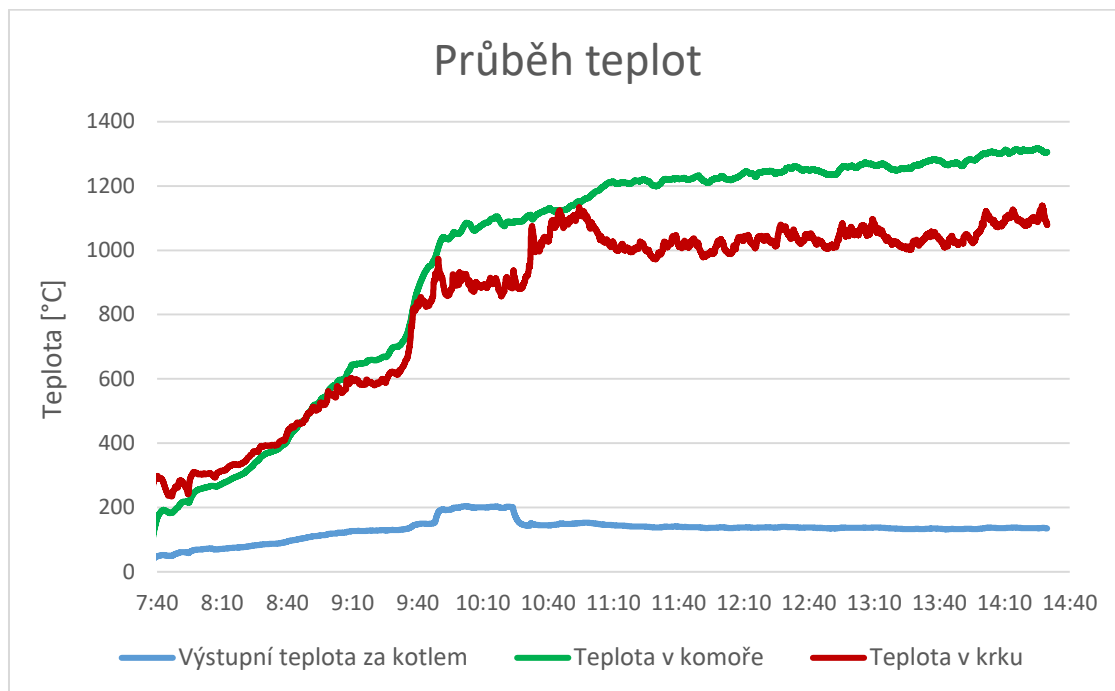
Během těchto měření došlo k ověřování matematických modelů uvedených v kapitole 6. Měření probíhalo bez další optimalizace kotle, jako je nastavování roštu nebo regulace 1° a 2° vzduchu. Jmenovitý výkon kotle je 110 kW.

6.3.1 Měření s chlazeným roštem

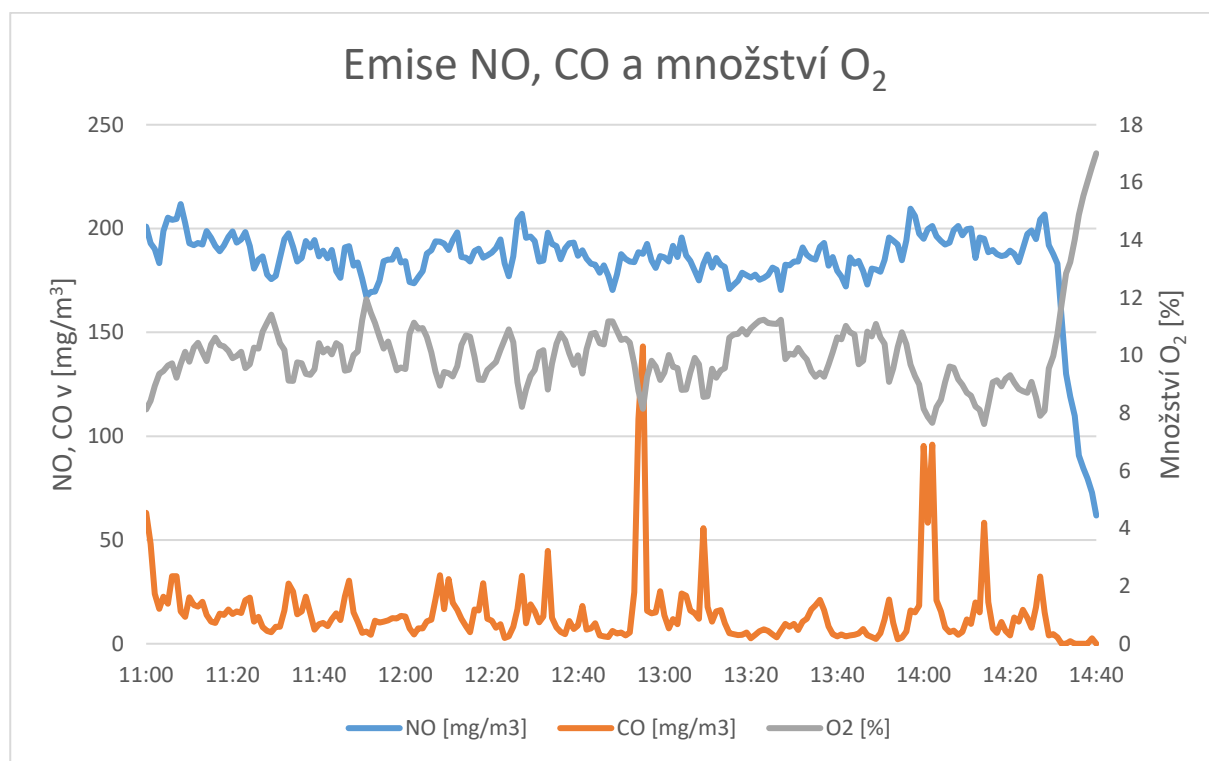
V průběhu měření s chlazeným byl udržován tepelný výkon kotle cca 90 kW. Chlazení roštu mělo výkon přibližně 20 kW. Průběh hoření paliva byl bezproblémový, což dokládá průběh podtlaku v ohništi i průběh plynných emisí a kyslíku. Emise oxidu uhelnatého jsou velmi nízké, což ukazuje na dobré vyhoření produktů spalování. Teplota v komoře – v jádru hoření odpovídá teplotě nechlazeného plamene při dané vlhkosti paliva. Teplota v krku dosahuje po najetí kotle průměrné hodnoty 1050 °C, což je v souladu s matematickým modelem. Průběhy jednotlivých veličin jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf 6.1 Chlazený rošt – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.2 Chlazený rošt – Průběh teplot



Graf 6.3 Chlazený rošt – Emise NO, CO a množství O₂

Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených referenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

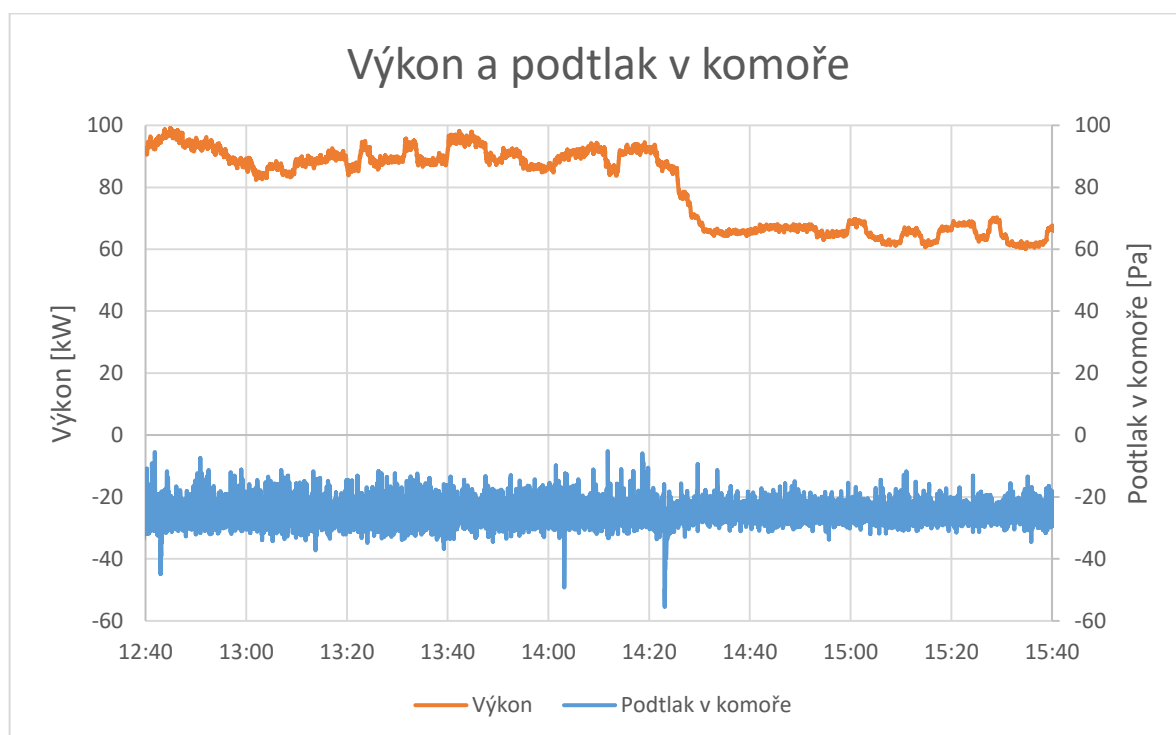
Tab. 6.1 Průměrné množství emisí – chlazený rošt

Měření s chlazeným rostem	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	187,3	13,5	10,04
Referenční hodnoty	187,9	13,55	10

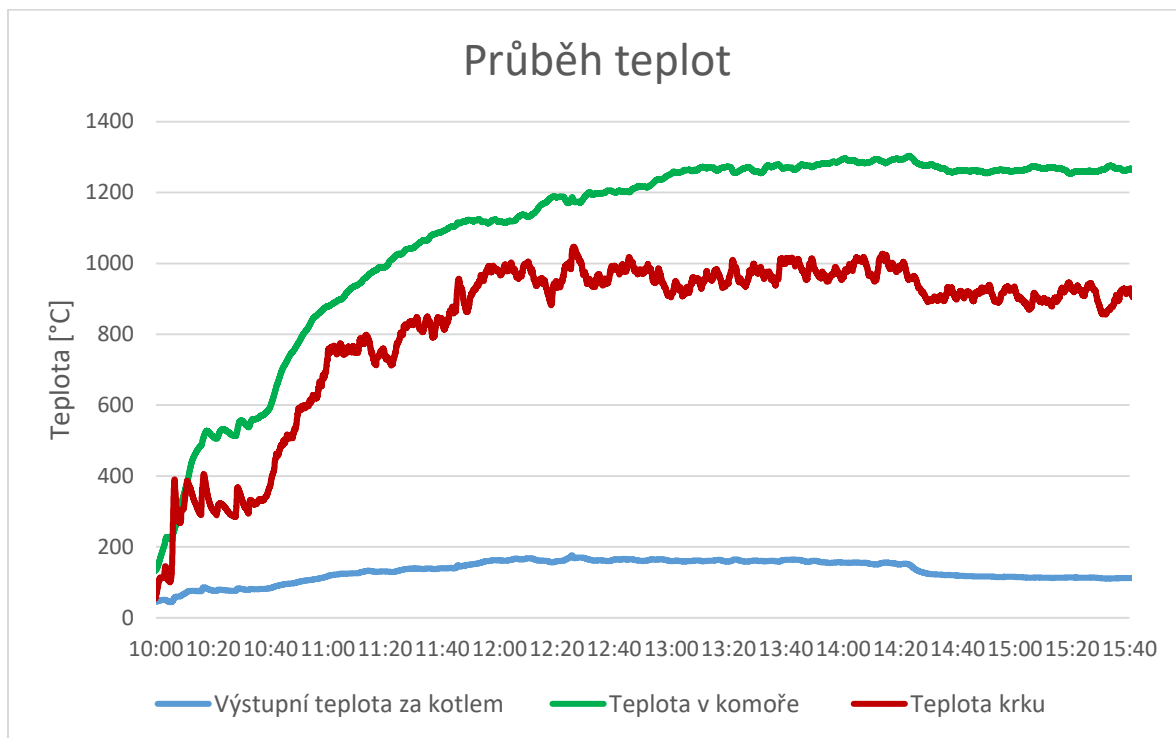
6.3.2 Měření s chlazeným rostem a chlazenými stěnami

Měření s chlazeným rostem a chlazenými stěnami – dřevní štěpka

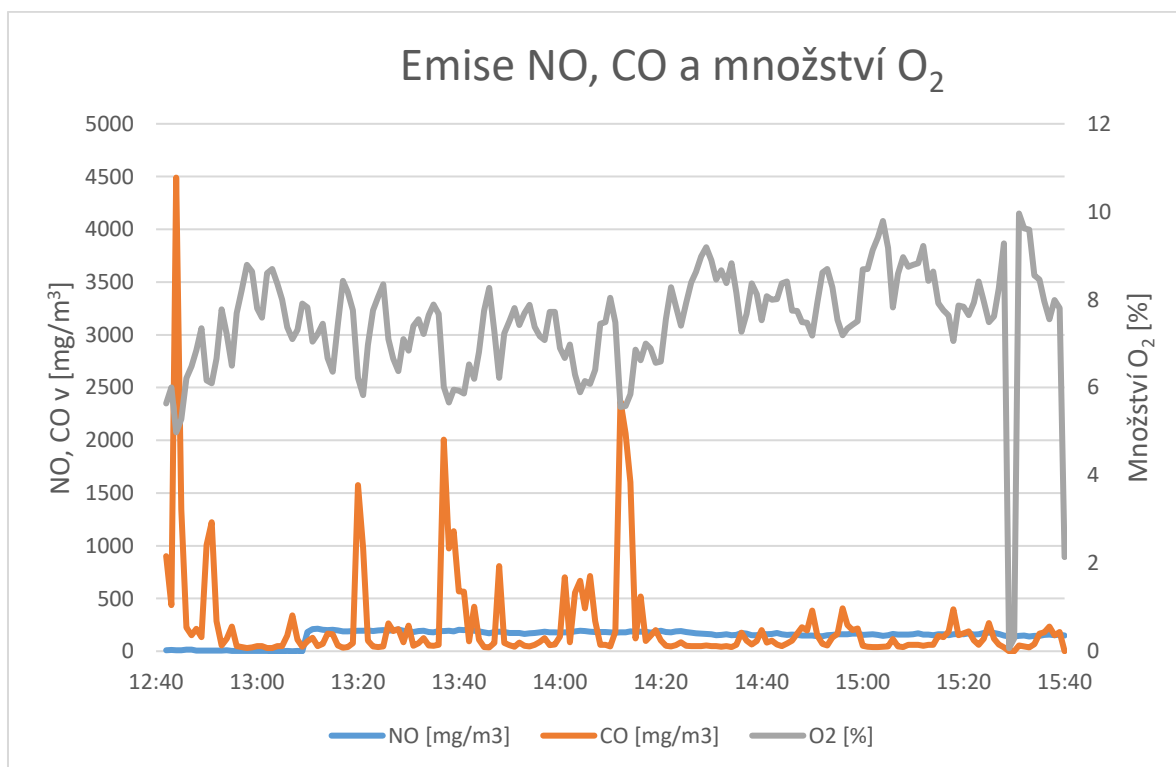
V průběhu měření byl v první části výkon udržován cca 90 kW. V této části byl výkon chlazení přibližně 20 kW. Poté došlo ke snížení výkonu kotle přibližně 60 kW. Výkon chlazení byl tedy přibližně 50 kW. Hoření paliva probíhalo bezproblémově, na což ukazuje podtlak v ohništi i průběh plyných emisí a kyslíku. Vyhoření produktů spalování proběhlo v pořádku, což dokazují emise oxidu uhelnatého. Teplota v komoře – v jádru hoření odpovídá teplotě nechlazeného plamene při dané vlhkosti paliva. Teplota v krku je po nasetí kotle v průměru přibližně 900 °C, což je v souladu s matematickým modelem. Všechny měřené veličiny jsou uvedeny v následujících grafech.



Graf 6.4 Chlazený rošt a chlazené stěny – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.5 Chlazený rošt a chlazené stěny – Průběh teplot



Graf 6.6 Chlazený rošt a chlazené stěny – Emise NO, CO a množství O₂

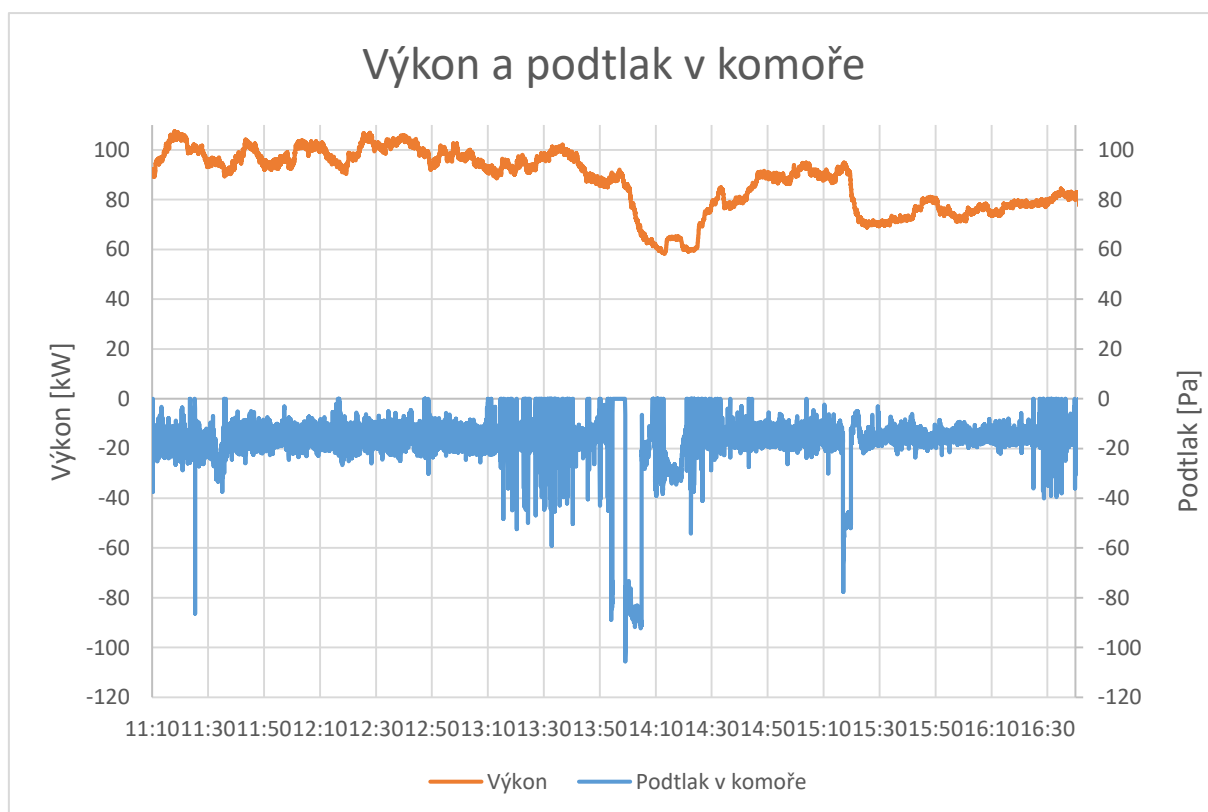
Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených retenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6.2 Průměrné množství emisí – chlazený rošt a chlazené stěny

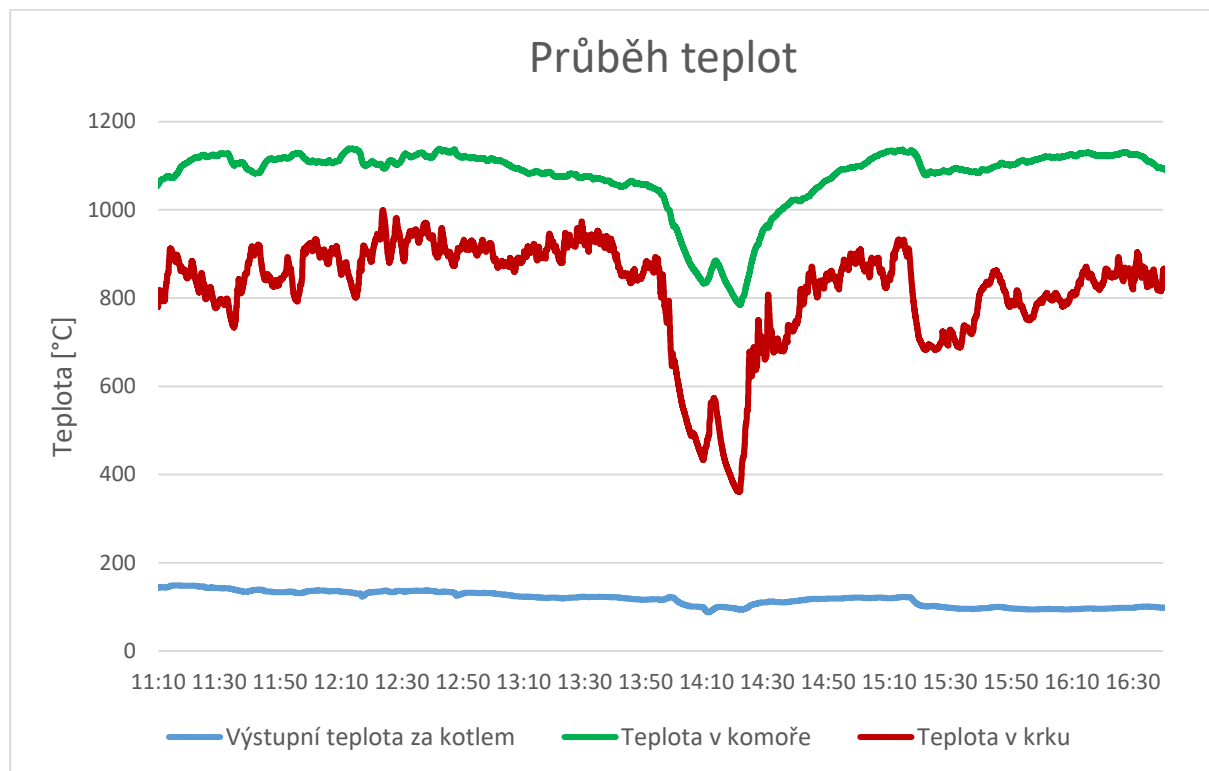
Měření s chlazeným roštem a chlazenými stěnami	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	161,3	108,5	8,18
Referenční hodnoty	161,2	93,1	10

Měření s chlazeným roštem a chlazenými stěnami – digestát řezanka

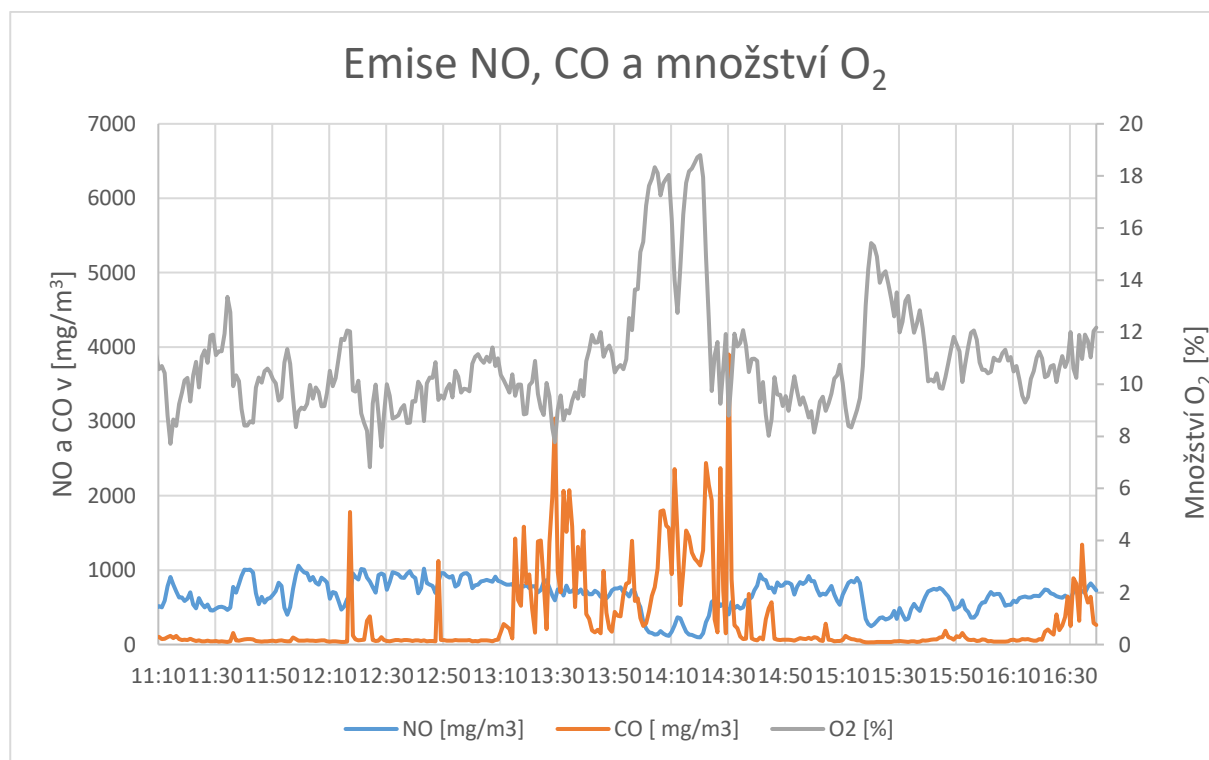
V dalším měření s chlazeným roštem a chlazenými stěnami byl jako palivo použit digestát ve formě řezanky. Měření probíhalo v první části na ustáleném výkonu cca 100 kW, kdy výkon chlazení byl cca 10 kW. Ve druhé části byl výkon ustálen na 80 kW a výkon chlazení byl tedy přibližně 30 kW. Hoření paliva probíhalo relativně bezproblémově, což ukazuje jednak průběh podtlaku v ohništi, stejně jako průběh plynných emisí a kyslíku. Emise oxidu uhelnatého jsou v průměru nízké, což je důkazem dobrého vyhoření produktů spalování. Teplota v komoře – v jádru hoření odpovídá teplotě nechlazeného paliva při dané vlhkosti. Teplota v krku je po najetí kotle na hodnotě přibližně 900 °C a je v souladu se zpracovaným modelem. Průběhy všech měřených veličin jsou znázorněny v následujících grafech.



Graf 6.7 Chlazený rošt a chlazené stěny – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.8 Chlazený rošt a chlazené stěny – Průběh teplot



Graf 6.9 Chlazený rošt a chlazené stěny – Emise NO, CO a množství O₂

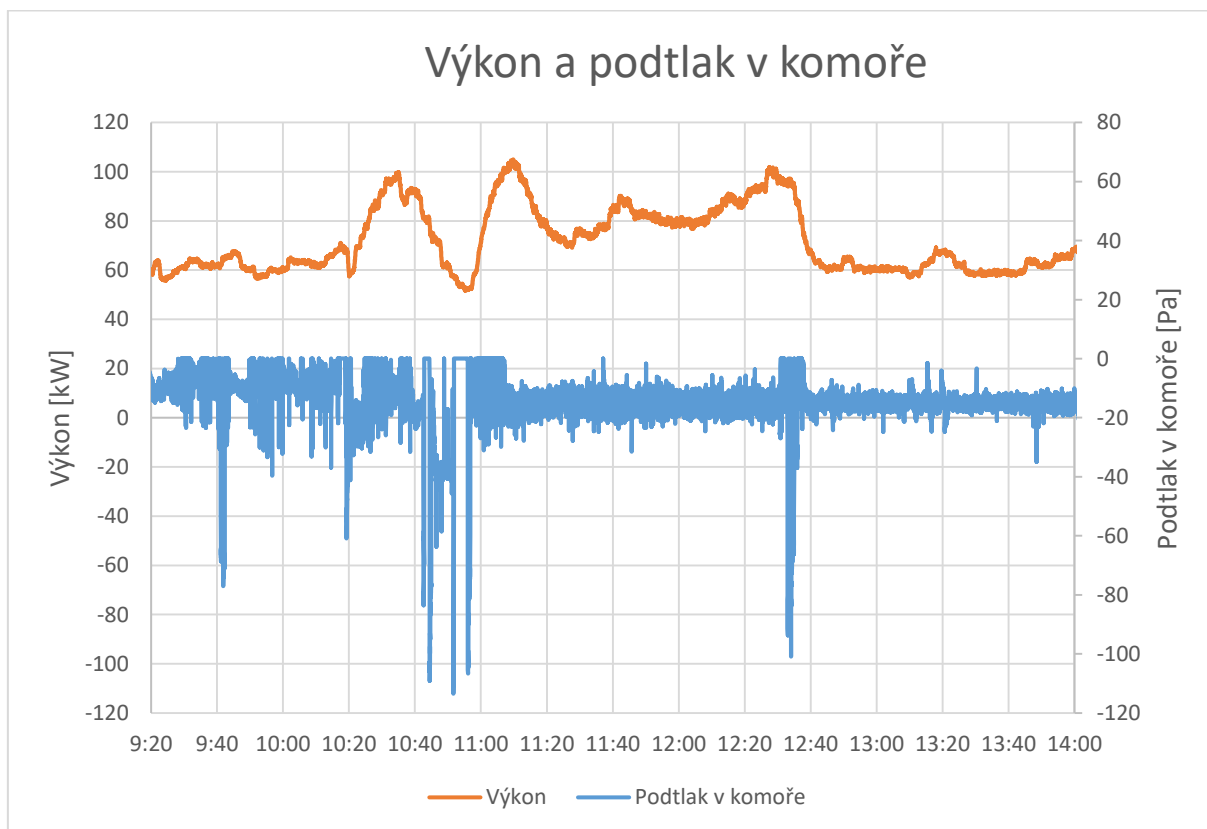
Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených referenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6.3 Průměrné množství emisí – chlazený rošt a chlazené stěny – digestát řezanka

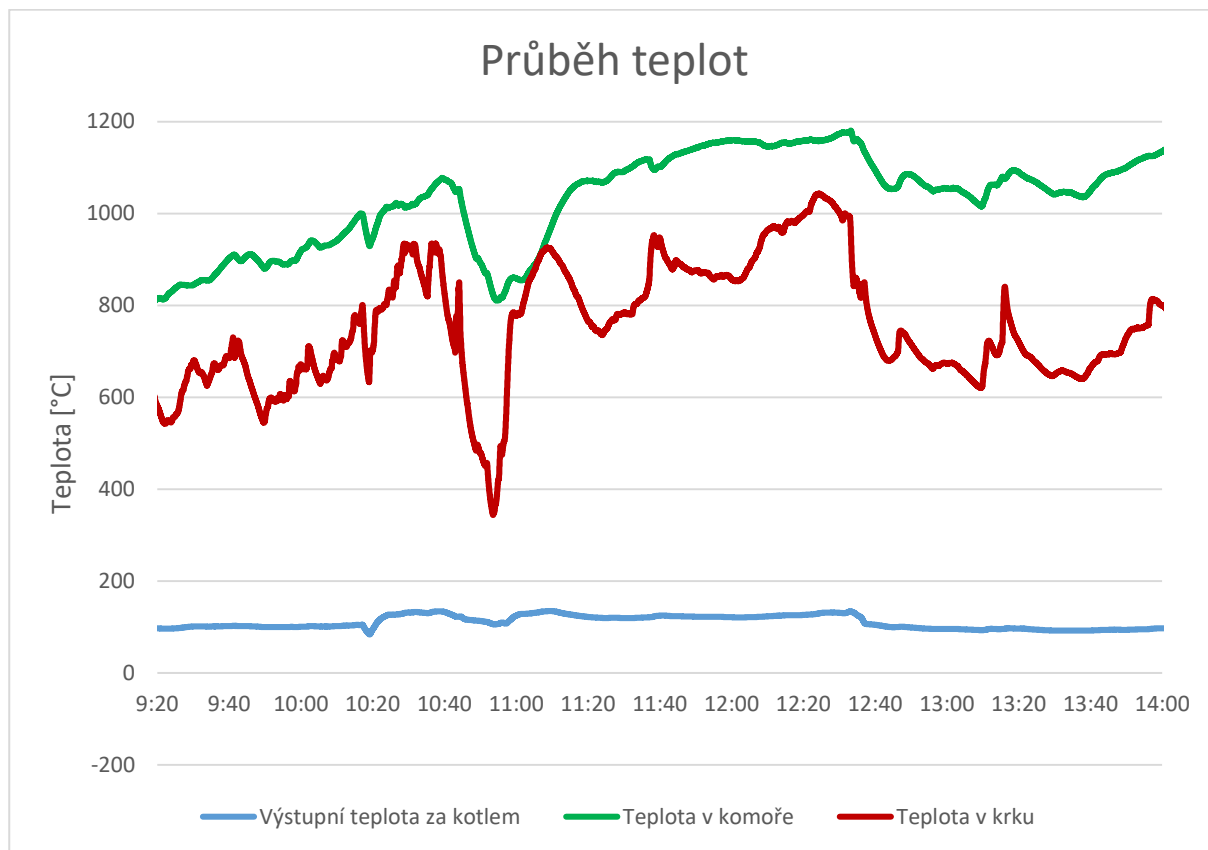
Měření s chlazeným roštěm a chlazenými stěnami – digestát řezanka	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	763,1	89,1	9,87
Referenční hodnoty	754,2	88,0	10

Měření s chlazeným roštěm a chlazenými stěnami – digestát pelety

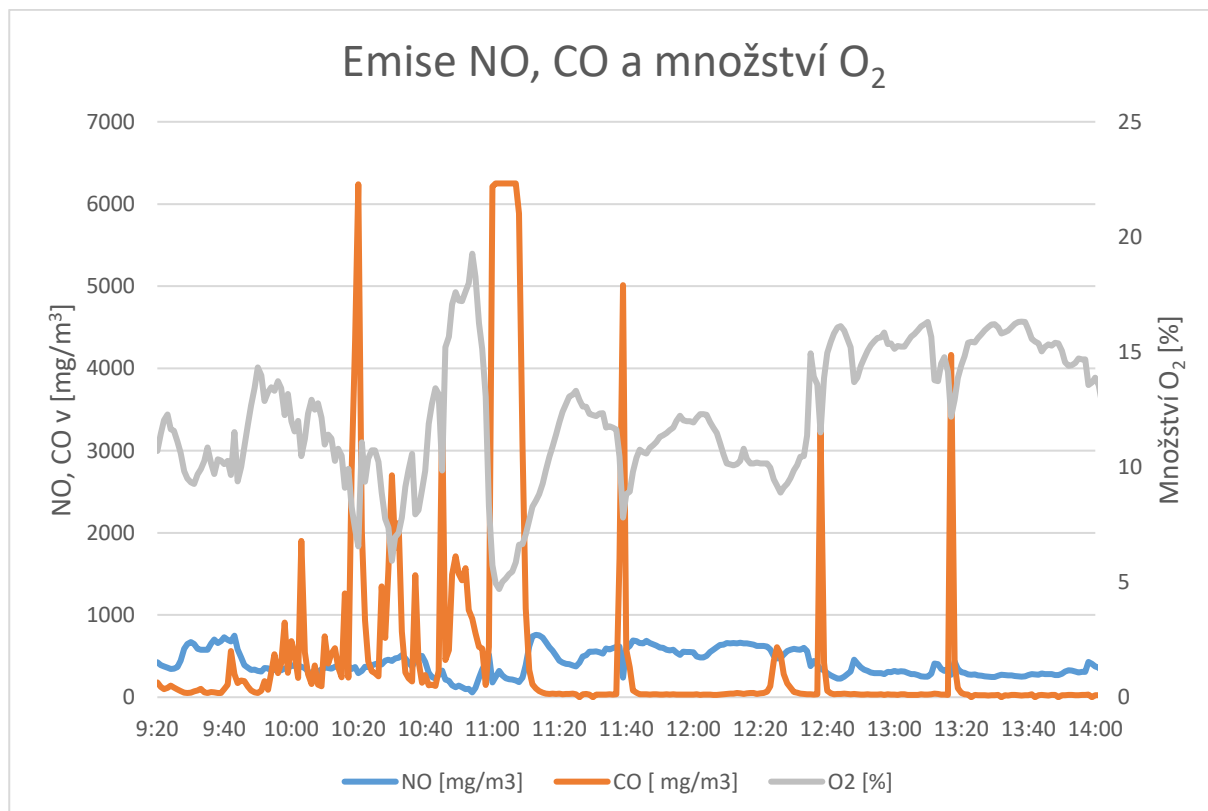
Pro poslední měření s chlazeným roštěm a stěnami byl použit jako palivo digestát ve formě pelet. Výkon byl po dobu měření udržován mezi 60–80 kW. Výkon chlazení ploch byl cca 30–50 kW. Samotné hoření mělo problematický průběh, což dokazuje průběh podtlaku v komoře i průběh plynných emisí a kyslíku. Dalším problémem při tomto měření byly nestabilní teploty v komoře i v krku. Důvodem komplikací, které nastaly v průběhu měření je především vysoká tvrdost pelet. U pelet nedošlo k prohoření ani během palivové zkoušky na obsah popele v žíhací peci. Průběhy veličin jsou znázorněny v následujících grafech.



Graf 6.10 Chlazený rošt a chlazené stěny – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.11 Chlazený rošt a chlazené stěny – Průběh teplot



Graf 6.12 Chlazený rošt a chlazené stěny – Emise NO, CO a množství O_2

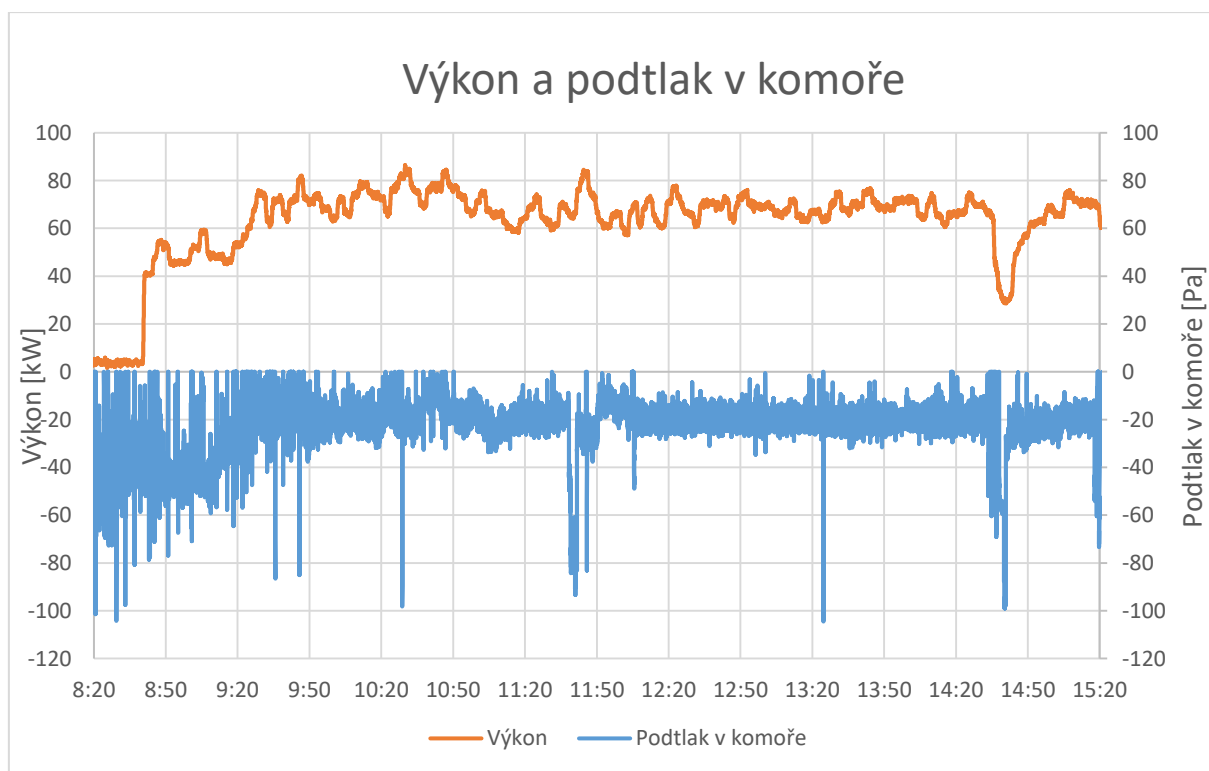
Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených referenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6.4 Průměrné množství emisí – chlazený rošt a chlazené stěny – digestát pelety

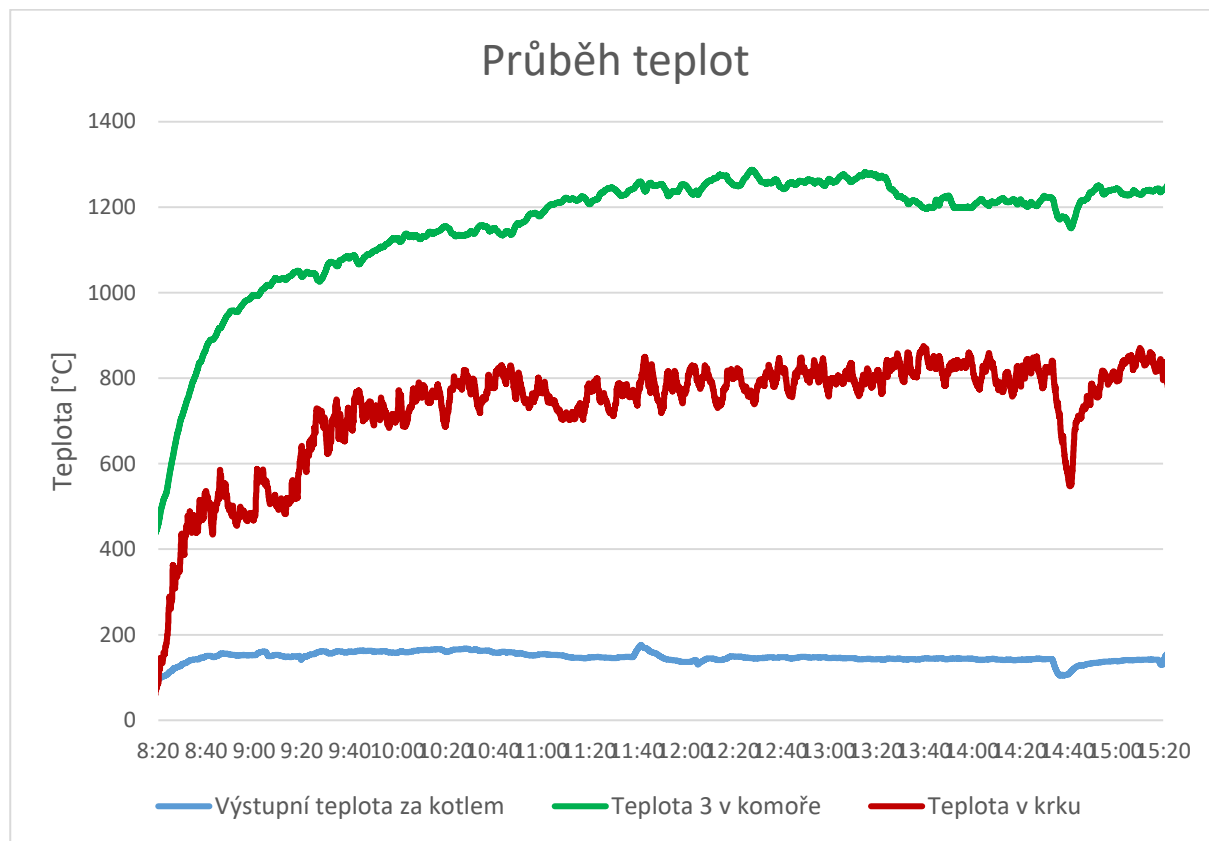
Měření s chlazeným roštěm a chlazenými stěnami – digestát pelety	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	358,1	421,9	13,25
Referenční hodnoty	504,9	594,9	10

6.3.3 Měření s chlazeným roštěm, chlazenými stěnami a chlazenou klenbou

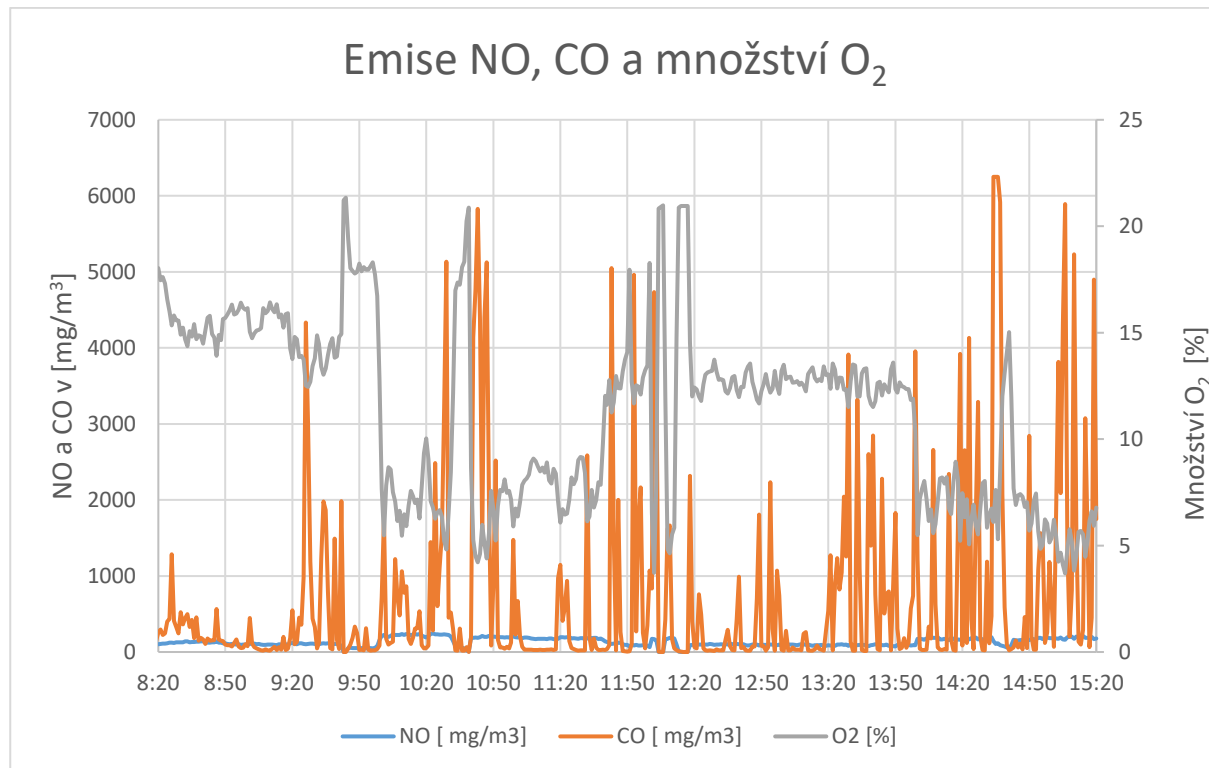
Měření probíhalo na výkonu přibližně 70 kW. Výkon chlazení byl cca 40 kW. Hoření bylo obtížněji regulované, což dokazuje jak průběh podtlaku v ohništi, tak průběh plynných emisí a kyslíku. Emise oxidu uhelnatého v průběhu měření významně kolísají, což ukazuje na horší vyhoření produktů spalování. Teplota v komoře (v jádru hoření) odpovídá teplotě nechlazeného plamene při dané vlhkosti paliva. Teplota v krku se po njetí kotle ustálila přibližně na hodnotě 810 °C, což odpovídá vypočtenému matematickému modelu. V následujících grafech jsou znázorněny průběhy všech měřených veličin.



Graf 6.13 Chlazený rošt, chlazené stěny a chlazená klenba – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.14 Chlazený rošt, chlazené stěny a chlazená klenba – Průběh teplot



Graf 6.15 Chlazený rošt, chlazené stěny a chlazená klenba – Emise NO, CO a množství O₂

Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených referenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6.5 Průměrné množství emisí – chlazený rošt, chlazené stěny a chlazená klenba

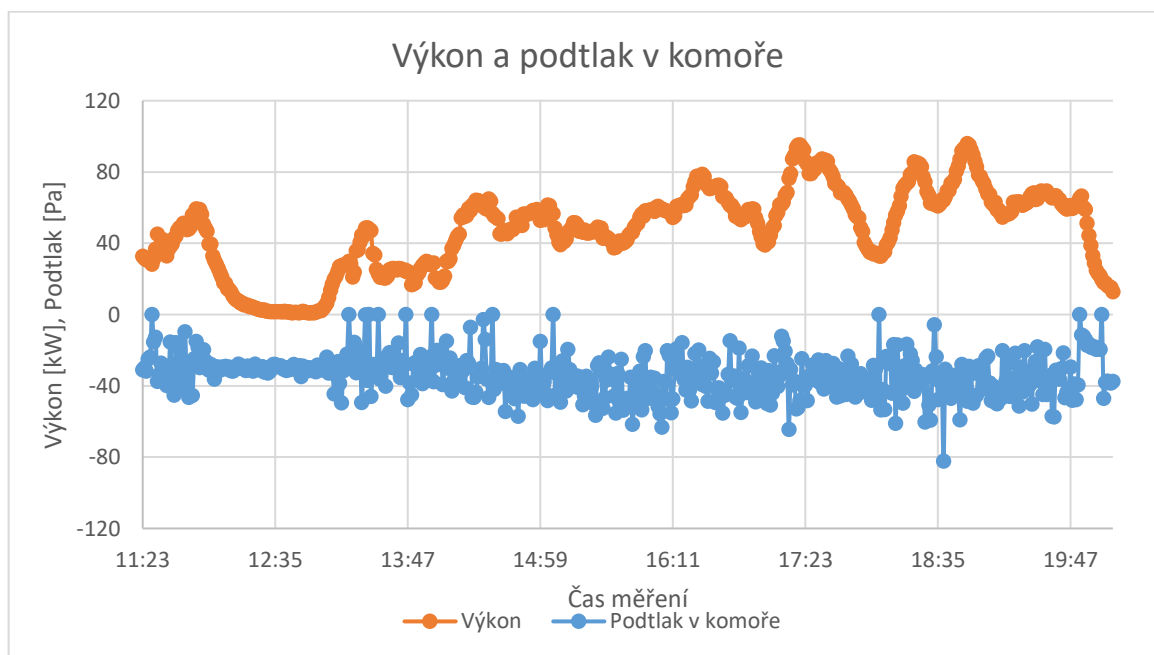
Měření s chlazeným roštem a chlazenými stěnami a chlazenou klenbou	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	94,17	495,3	12,67
Referenční hodnoty	124,3	653,8	10

6.4 Měření k optimalizaci spalování

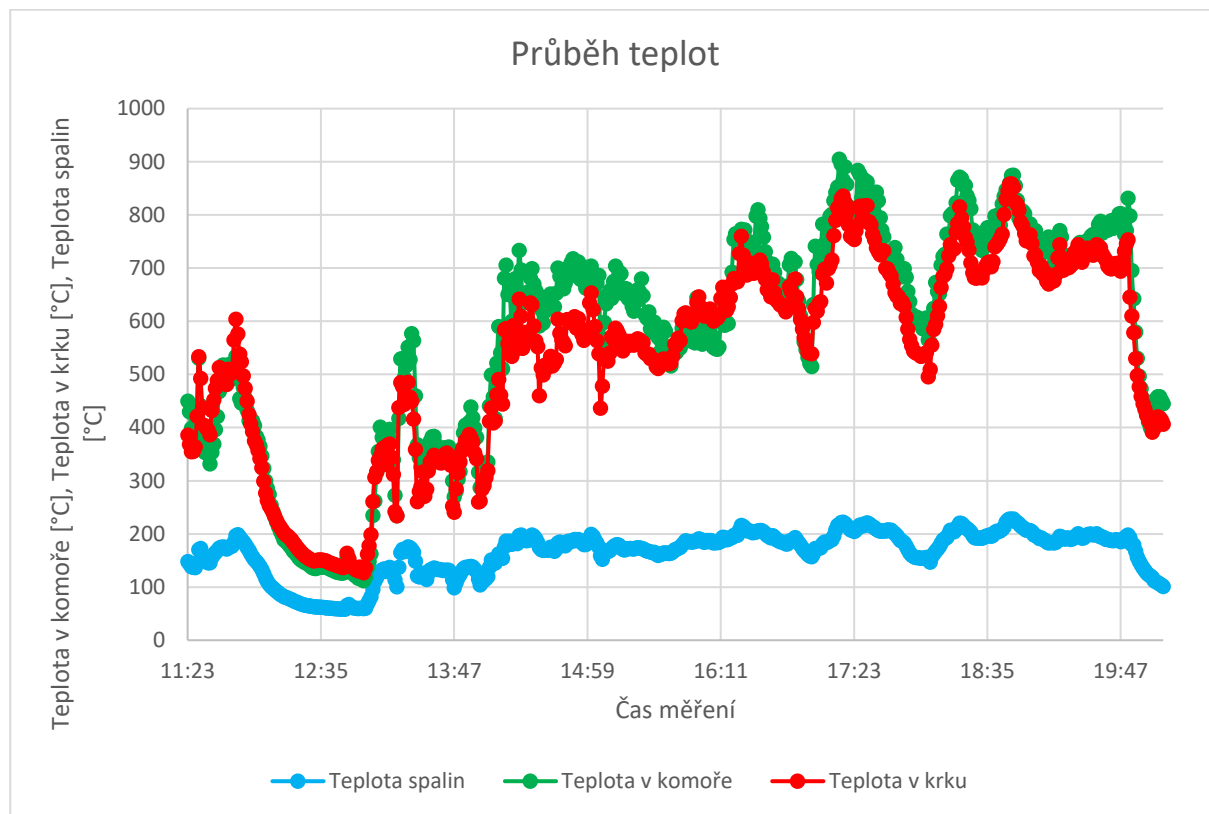
V rámci výzkumu proběhla další měření za účelem nastavení a ověření parametrů během procesu spalování a také ověření tvorby emisí CO, NO_x a TZL. Jako palivo byla při těchto měřeních použita dřevní štěpka a seno ve formě pelet. Při předchozích měřeních nedocházelo k pohybu roštu. Hlavním cílem těchto měření bylo najít optimální posun roštu. Pohyb roštu může být buď „dokola“ nebo pouze „dopředu-dozadu“. Jelikož všechna předchozí měření probíhala v ručním režimu, docházelo během těchto měření k ladění provozu na automatické řízení.

6.4.1 Měření – dřevní štěpka

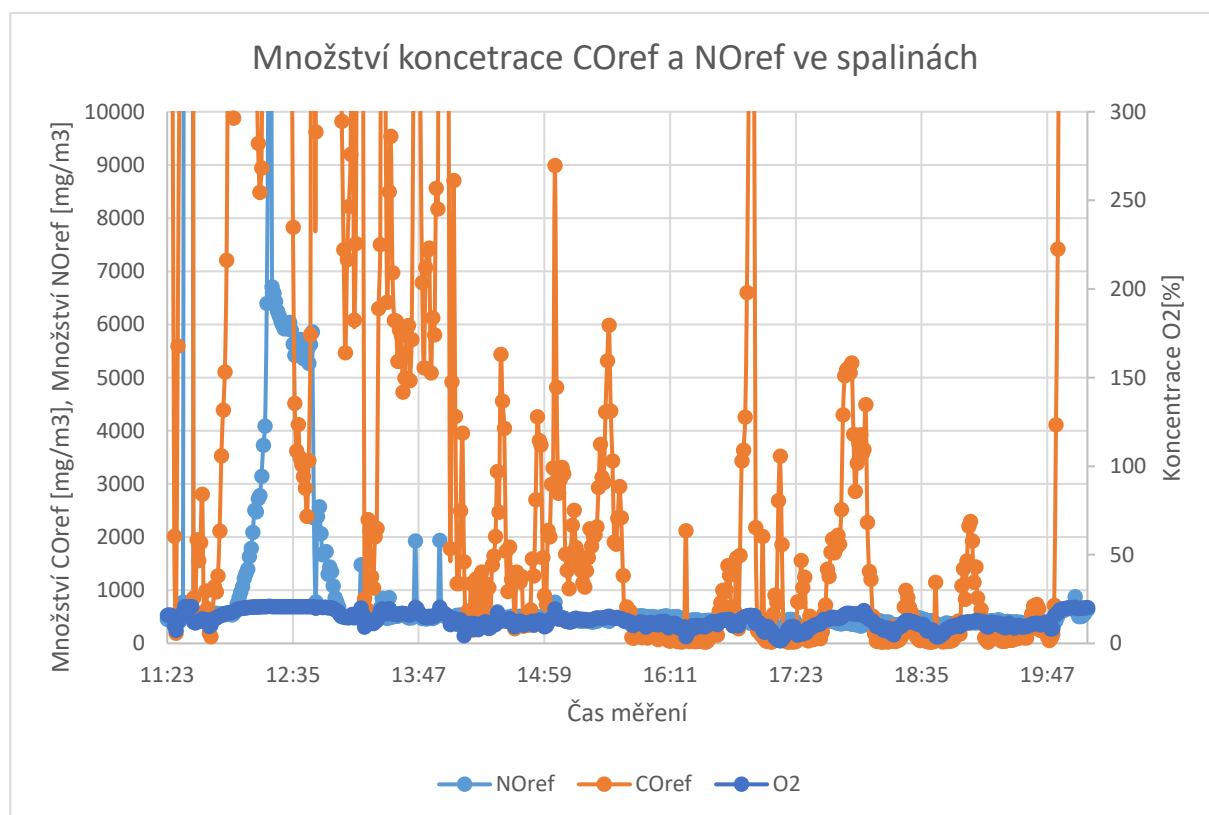
Pro toto měření byla jako palivo použita dřevní štěpka. Během tohoto měření bylo použito seno ve formě pelet. V průběhu měření byla snaha o ustálení výkonu přibližně na 50–60 kW. Hoření bylo obtížně regulovatelné, což dokazuje jednak průběh podtlaku, stejně jako průběh plyných emisí a kyslíku. Emise oxidu uhelnatého v průběhu měření hodně kolísají, což ukazuje na špatné vyhoření produktů spalování. Dalším významným problémem jsou kolísající teploty v komoře i v hrdle. Během měření nedošlo k zapečení paliva. Výsledné referenční emise CO jsou ve 3. emisní třídě dle normy ČSN EN 303-5. Průběhy měřených veličin jsou znázorněny v následujících grafech.



Graf 6.16 Regulace kotle – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.17 Regulace kotle – Průběh teplot



Graf 6.18 Regulace kotle – Množství koncentrace COref a NOref ve spalinách

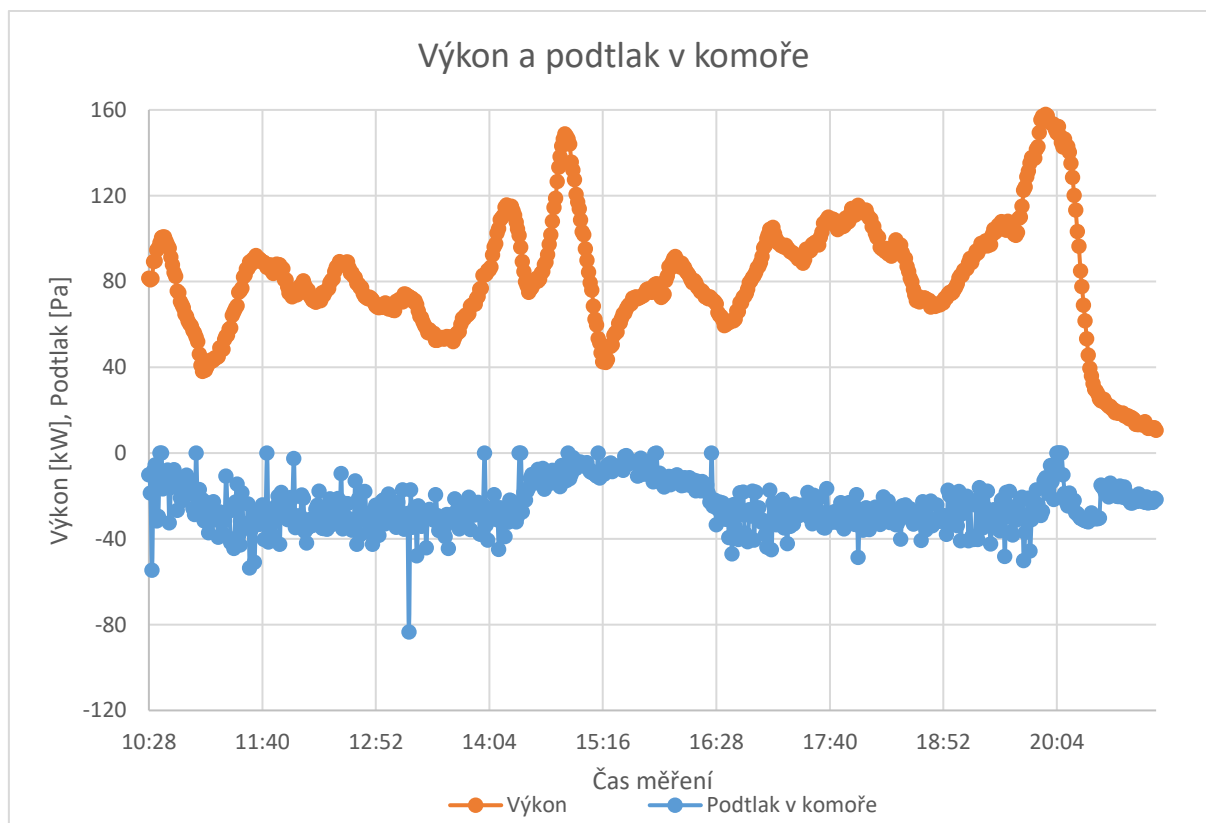
Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených referenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6.6 Průměrné množství emisí – regulace kotle – dřevní štěpka

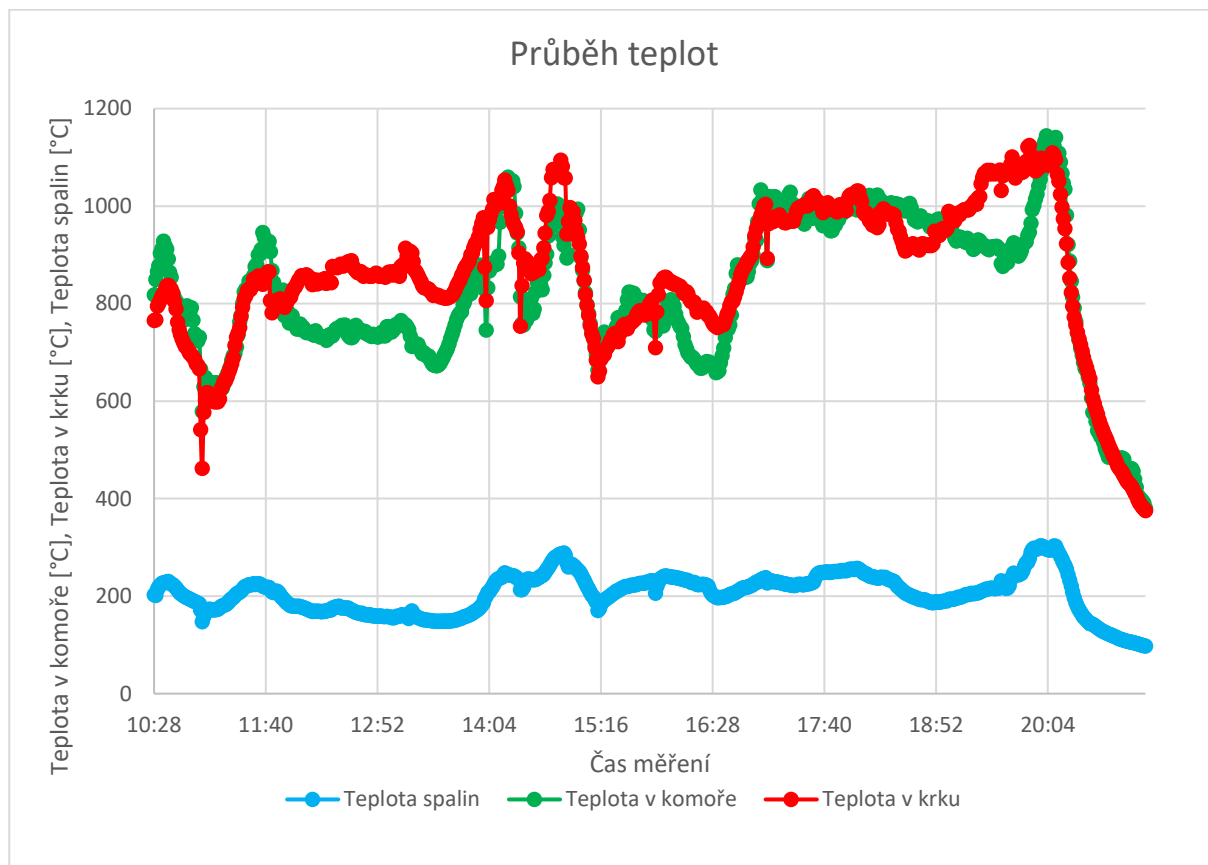
Měření se dřevní štěpka	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	308,49	1474	13,41
Referenční hodnoty	1214,76	2233	10

6.4.2 Měření – seno pelety

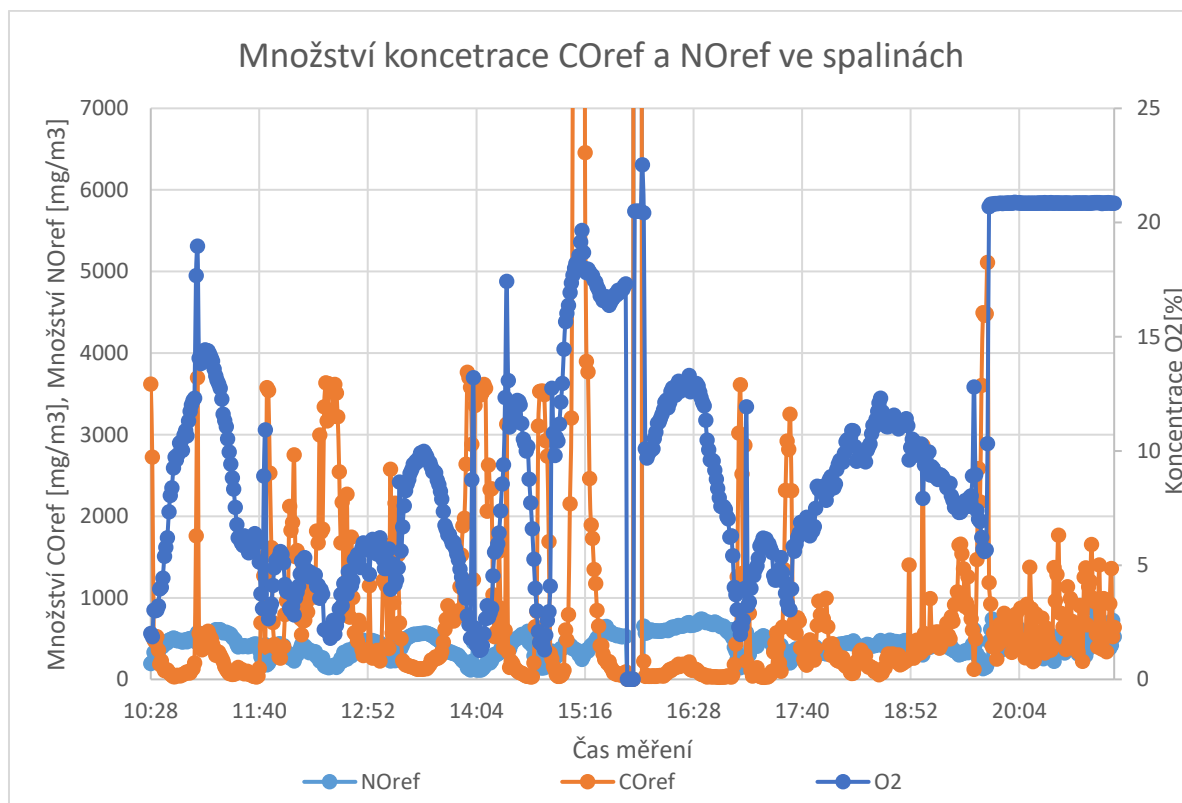
Během tohoto měření bylo použito seno ve formě pelet. V průběhu měření byla snaha o ustálení výkonu přibližně na 80 kW. Hoření bylo obtížně regulovatelné, na což ukazuje průběh podtlaku i průběh plynných emisí a kyslíku. Emise oxidu uhelnatého v průběhu měření hodně kolísají, což ukazuje na špatné vyhoření produktů spalování. Dalším významným problémem jsou kolísající teploty v komoře i v hrdle. Během měření nedošlo k zapečení paliva. Výsledné hodnoty emisních limitů jsou pro CO na hranici 4. emisní třídy podle normy ČSN EN 303-5. Všechny průběhy měřených veličin jsou znázorněny v následujících grafech.



Graf 6.19 Regulace kotle – Výkon a podtlak v komoře



Graf 6.20 Regulace kotle – Průběh teplot



Graf 6.21 Regulace kotle – Množství koncentrace COref a NOref ve spalínách

Průměrné hodnoty naměřených a přepočtených referenčních emisí CO a NO_x a množství O₂ jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6.7 Průměrné množství emisí – regulace kotle – seno pelety

Měření se senem – pelety	NO _x	CO	O ₂
	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[%]
Skutečné hodnoty	394,63	1015,52	10,14
Referenční hodnoty	778,19	1028,61	10

7 Návrh konstrukčních a provozních úprav

Na základě naměřených výsledků bylo navrženo několik úprav. Z hlediska konstrukce jsou to následující úpravy:

1. Umístění lambda sondy – tato sonda bude umístěna do spalinové cesty a bude sloužit k regulaci přívodu 2° vzduchu
2. Zmenšení mezer mezi roštnicemi – toto opatření bude realizováno především pro zmenšení propadu paliva na roštu
3. Utěsnění horního kraje roštu – opatření, díky kterému bude zajištěn lepší průtah primárního vzduchu skrz rošt
4. Lehce zvýšit teplotu v komoře snížením výkonu chlazeného segmentu, což lze realizovat např. částečnou izolací segmentu

Mezi návrhy provozních úprav patří:

1. Optimalizace pohybu roštu – pohyb bude buď probíhat v jednom směru nebo dojde v půlce cyklu otočení směru pohybu
2. Optimalizace přívodu sekundárního vzduchu – pro tuto optimalizaci bude sloužit lambda sonda
3. Optimalizace posuvu paliva – určení rychlosti otáčení roštu, díky kterému dochází k posuvu paliva v komoře, aby byl zajištěn čas potřebný k vyhoření paliva.

Výše uvedený návrh změn bude předmětem pokračujícího výzkumu.

ZÁVĚR

V první rešeršní části mé práce jsou uvedeny vlastnosti digestátu jako paliva. Dále zde jsou shrnuty dosavadní výsledky naměřené na jednokomorovém kotli.

Jedním z hlavních cílů mé diplomové práce bylo provést stechiometrický výpočet pro digestát. Konkrétně bylo počítáno s digestátem ve formě pelet s vlhkostí v surovém stavu 8,9 % a obsahem popela v bezvodém stavu 13,4 %. Výpočet byl proveden se součinitelem přebytku vzduchu 1,5 pro jmenovitý výkon kotle 110 kW. Součástí výpočtu je i I-t diagram spalín pro různé součinitele přebytku vzduchu. Dále byl proveden výpočet pro závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti paliva. Poslední část stechiometrického výpočtu byla provedena pro zjištění vlivu teploty přiváděného vzduchu na teplotu nechlazeného plamene.

Dalším cílem bylo ověřit emisní a provozní parametry kotle. Toto ověření probíhalo ve dvou fázích. Nejdříve byla ověřena shoda modelů spalovací komory s různým zapojením chlazení. Při tomto ověřování nedocházelo k regulaci ostatních provozních parametrů kotle jako je pohyb roštu či regulace přívodu 1° a 2° vzduchu. Vytvořené matematické modely se s naměřenými hodnotami většinou shodovaly. Výjimku tvoří měření s chlazeným rostem a stěnami, při kterém byl jako palivo použit digestát ve formě pelet. Hlavním důvodem je především vysoká tvrdost pelet, u kterých nedošlo k dostatečnému prohoření. Tento problém se objevoval už během zkoušek v palivové laboratoři, konkrétně při zkoušce na obsah popele. Při těchto měřeních byly emise oxidu uhelnatého na hranici 4. a 5. emisní třídy podle normy ČSN EN 303-5.

Druhou fází, která probíhala na kotelně Energetického ústavu, bylo ladění provozních parametrů kotle. Během těchto měření byla prováděna regulace roštu a regulace přívodu vzduchu. Dále docházelo k nastavování parametrů pro automatické řízení celého procesu spalování. Tyto parametry ještě nebyly plně ověřeny a budou součástí dalšího výzkumu. Emise oxidu uhelnatého byly během měření ve 4. emisní třídě dle normy ČSN EN 303-5.

Posledním cílem byl návrh úprav. Tento návrh byl proveden, ovšem z časových důvodů nebylo možné funkčnost úprav ověřit. Ověření bude předmětem výzkumu, který pokračuje na Energetickém ústavu VUT v Brně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BORKOVEC, O. *Energetické využití odpadu ze suché a mokré fermentace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [2] *Bioplynové stanice „suchá“ anaerobní fermentace* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/cz/sucha-fermentace/>
- [3] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983, 858 s.
- [4] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, 212 s.: il. ; 30 cm. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [5] OCHECOVÁ, Pavla: *Popel z biomasy – významný zdroj živin*. *Biom.cz* [online]. 2015-01-19 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin>>. ISSN: 1801-2655.
- [6] MÍKA, Martin, VOLÁKOVÁ, Pavlína, KLÁPŠTĚ, Břetislav, JANKOVSKÝ, Ondřej, VERNER, Vladimír: *Jak potlačit spékání biomasového popela?*. *Biom.cz* [online]. 2011-11-28 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela>>. ISSN: 1801-2655.
- [7] KASTNER, Petr. 2014. Využití tuhých odpadů z bioplynové stanice k výrobě energie. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] Peletizační linky. 2012. *NÁDRŽE* [online]. Hranice. Available at: <http://www.sila-nadrze.cz/peletizacni-linky.html>
- [9] KREJČÍŘÍK, J. *Vlastnosti alternativních paliv z biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [10] ZBOŘIL, M. *Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [11] KOLONIČNÝ, Jan. *Emise při spalování biomasy*. *Biom.cz* [online]. 2010-06-07 [cit. 2017-02-13]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>
- [12] ELBL, P. *Degradace biomasy při skládování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [13] KUBESA, Petr a Jiří HORÁK. *Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení*. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [14] HORÁK, Jiří, František HOPAN and Kamil Krpec. *Co musí splnit nový kotel na tuhá paliva po roce 2020?* [online]. Available at: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>
- [15] BUDAJ, Florian. 1973. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 194 s.

- [16] BAŠTA, T. *Metody měření emisí tuhých látek ve spalinách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
W^r	vlhkost surového vzorku	%
A^d	obsah popele v bezvodém stavu	%
A^r	obsah popele v surovém stavu	%
H^{daf}	obsah vodíku v hořlavině	%
C^{daf}	obsah uhlíku v hořlavině	%
N^{daf}	obsah dusíku v hořlavině	%
S^{daf}	obsah síry v hořlavině	%
O^{daf}	obsah kyslíku v hořlavině	%
H^r	obsah vodíku v surovém stavu	%
C^r	obsah uhlíku v surovém stavu	%
N^r	obsah dusíku v surovém stavu	%
S^r	obsah síry v surovém stavu	%
O^r	obsah kyslíku v surovém stavu	%
Q_s^{daf}	spalné teplo v hořlavině	kJ/kg
Q_s^r	spalné teplo v surovém stavu	kJ/kg
Q_i^r	výhřevnost v surovém stavu	kJ/kg
α	součinitel přebytku vzduchu	-
P	výkon kotle	kW
η	účinnost kotle	-
M_{pal}	množství paliva	kg/s
V_{O_2Min}	minimální objem kyslíku ke spálení 1 kg paliva	m ³ /kg _{pal}
V_{VS}^{Min}	minimální objem suchého vzduchu ke spálení 1 kg pal.	m ³ /kg _{pal}
V_{H_2O}	minimální objem vodní páry	m _{H₂O} ³ / kg _{pal}
φ	relativní vlhkost vzduchu	%
p^c	celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu	Pa
p^a	absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti	Pa
V_{VV}^{Min}	minimální objem vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg pal.	m ³ /kg _{pal}
V_{VV}^{Skut}	skut. množství vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg pal.	m ³ /kg _{pal}
V_{SS}^{Min}	minimální objem suchých spalin při spálení 1 kg pal.	m ³ /kg _{pal}
V_{CO_2}	objem oxidu uhličitého ve spalinách	Nm ³ /kg
V_{SO_2}	objem oxidu siřičitého ve spalinách	Nm ³ /kg
V_{N_2}	objem dusíku ve spalinách	Nm ³ /kg
V_{Ar}	objem argonu ve spalovacím vzduchu	Nm ³ /kg
$V_{H_2O}^S$	objem vodní páry ve spalinách	m ³ /kg _{pal}
V_{SV}^{Min}	minimální objem vlhkých spalin	m ³ /kg _{pal}

V_{SV}	objem vlhkých spalín při spal. s přebytkem vzduchu	$\text{m}^3/\text{kg}_{\text{pal}}$
x_i	měrný podíl složek spalín	-
ρ_{SP}	hustota spalín	kg/m^3
G_{O_2Min}	hmotové minimální množství spalovací kyslíku	kg/kg
G_{VSmin}^S	hmotové minimální množství suchého spal. vzduchu	kg/kg
G_{VVmin}^S	hmotové minimální množství vlhkého vzduchu	kg/kg
Q_{pal}	teplo obsažené v palivu	kJ/s
Q_{vzduch}	teplo obsažené ve spalovacím vzduchu	kJ/kg
$Q_{spaliny}$	teplo obsažené ve spalínách	kJ/kg
i_{VV}	entalpie vlhkého vzduchu	kJ/m^3
i_{SV}	entalpie spalín	kJ/m^3
ξ_{MN}	ztráta mechanickým nedopalem	-
ξ_{CN}	ztráta chemickým nedopalem	-
T_{NP}	teplota nechlazeného plamene	$^{\circ}\text{C}$
$I_S^{t,\alpha}$	entalpie spalín o teplotě t při přebytku α	kJ/kg (kJ/m^3)
I_{Smin}^t	entalpie spalín při dané teplotě	kJ/kg (kJ/m^3)
I_{Vmin}^t	entalpie vzduchu při dané teplotě	kJ/kg
c_p	měrná tepelná kapacita	$\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$
x_{ref}	referenční hodnota koncentrace emisí	mg/m^3
x_{nam}	naměřená hodnota koncentrace emisí	mg/m^3
O_{2ref}	referenční hodnota kyslíku	%
O_{2skut}	skutečná hodnota kyslíku při spalování	%
TZL	tuhé znečišťující látky	
ČSN	Česká technická norma	
EN	Evropská norma	
PM1	prašná částice (particulate matter) menší než $0,1 \mu\text{m}$	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Schéma peletovací linky	13
Obr. 2.1 Schéma zplyňovací komory ZKG s rošty	15
Obr. 2.2 Požadavky dle Směrnice o ekodesignu 2009/125/ES - platné od 1.1.2020.....	19
Obr. 4.1 Schéma regulace kotle	37
Obr. 5.1 Výpočetní síť matematického modelu	38
Obr. 5.2 Teplotní pole ve středové rovině kotle ve °C	39
Obr. 5.3 Rychlostní pole ve středové rovině kotle.....	39
Obr. 5.4 Teplotní pole ve středové rovině kotle ve °C	40
Obr. 5.5 Rychlostní pole ve středové rovině kotle.....	40
Obr. 5.6 Teplotní pole ve středové rovině kotle ve °C	41
Obr. 5.7 Rychlostní pole ve středové rovině kotle.....	41
Obr. 6.1 Software pro ovládání kotle	43
Obr. 6.2 Analyzátor spalín ULTRAMAT 21 a 22	44
Obr. 6.3 Schéma měření TZL	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Průměrné množství referenčních emisí CO	17
Tab. 2.2 Průměrné množství referenčních emisí NO _x	19
Tab. 2.3 Průměrné množství emisí SO ₂	21
Tab. 3.1 Vstupní parametry digestátu.....	22
Tab. 3.2 Hustota složek spalin.....	25
Tab. 3.3 Entalpie jednotlivých složek spalin v závislosti na teplotě.....	27
Tab. 3.4 Entalpie spalin a měrné teplo vzduchu.....	29
Tab. 3.5 Závislost entalpie spalin na teplotě a přebytku vzduchu.....	29
Tab. 3.6 Měrná tepelná kapacita jednotlivých složek spalin v závislosti na teplotě	31
Tab. 3.7 Závislost teploty nechlazeného plamene na vlhkosti paliva	32
Tab. 3.8 Vliv teploty vzduchu na teplotu nechlazeného plamene	33
Tab. 5.1 Srovnání parametrů na výstupu.....	42
Tab. 6.1 Průměrné množství emisí – chlazený rošt.....	47
Tab. 6.2 Průměrné množství emisí – chlazený rošt a chlazené stěny.....	49
Tab. 6.3 Průměrné množství emisí – chlazený rošt a chlazené stěny – digestát řezanka..	51
Tab. 6.4 Průměrné množství emisí – chlazený rošt a chlazené stěny – digestát pelety	53
Tab. 6.5 Průměrné množství emisí – chlazený rošt, chlazené stěny a chlazená klenba....	55
Tab. 6.6 Průměrné množství emisí – regulace kotle – dřevní štěpka	57
Tab. 6.7 Průměrné množství emisí – regulace kotle – seno pelety	59