ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

RADIM
KOCHAN

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kochan** Jméno: **Radim** Osobní číslo: **458434**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**

Studijní program: **Strojírenství**

Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Bilance oxyfuel spalování biomasy ve fluidním kotli

Název bakalářské práce anglicky:

Balance of biomass oxyfuel combustion in fluidized bed

Pokyny pro vypracování:

Porovnejte bilance spalování biomasy pro případ spalování se vzduchem a pro případ spalovaní čistým kyslíkem (oxyfuel spalování).
Práce bude obsahovat
1) Rešerše problematiky spalování ve fluidní vrstvě.
2) Rešerše CCS technologií se zaměřením na oxyfuel spalování.
3) Provedení objemové bilance spalování biomasy pro vzduchové a oxyfuel spalování a porovnání obou bilancí.
4) Porovnání teoretických bilancí s výsledky měření na experimentálním fluidním kotli.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Skopec, ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

Ing. Pavel Skopec podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.04. 2019 Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne……... ……

podpis autora

Anotační list

Jméno autora:	Radim Kochan
Název BP:	Bilance oxyfuel spalování biomasy ve fluidním kotli
Název BP anglicky:	Balance of biomass oxyfuel combustion in fluidized bed
Akademický rok:	2018/2019
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Skopec
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 59 Počet obrázků: 13 Počet tabulek: 18
Klíčová slova:	biomasa, fluidní kotel, oxyfuel spalování, spalování se vzduchem, stechiometrie spalování
Keyword:	biomass, fluidized bed boiler, oxyfuel combustion, air combustion, stoichiometric calculations
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá spalováním biomasy v kotli s bublinkující fluidní vrstvou v oxyfuel a vzduchovém režimu. V první řadě je provedena rešerše na téma biomasy, oxyfuel technologie a fluidního spalování. Následuje stechiometrický výpočet složení a objemů spalin pro oxyfuel i vzduchový režim, který je poté porovnán s experimentálním měřením.
Abstract:	This bachelor thesis deals with oxyfuel and air combustion of biomass in fluidized bed boiler. Firstly, the research on biomass, oxyfuel combustion and fluidized bed boilers is done. Then, stoichiometric calculations are performed for both oxyfuel and air combustion. Comparison of stoichiometric calculations and experimental measurement is also shown for both combustion modes.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlu Skopcovi za odborné konzultace a užitečné rady v průběhu zpracování této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů, indexů a zkratek 9

1 Úvod 11

2 Biomasa 13

2.1 Využití v energetice 13

2.2 Procesy získávání energie z biomasy 14

2.2.1 Termochemické přeměny biomasy 14

2.2.2 Biochemické přeměny biomasy 15

2.2.3 Chemické přeměny biomasy 15

2.3 Druhy biomasy 15

2.3.1 Cíleně pěstovaná biomasa 15

2.3.2 Odpadní biomasa 15

2.3.3 Dělení dle vlastností biomasy 17

2.4 Průmyslové využití biomasy v ČR 17

2.4.1 Energetické centrum Jindřichův Hradec 19

3 Carbon capture and storage 20

3.1 Post-combustion proces 21

3.2 Pre-combustion proces 22

4 Oxyfuel spalování 23

4.1 Zásady oxyfuel spalování 24

4.1.1 Separační jednotka vzduchu 24

4.1.2 Recirkulace spalin 25

4.1.3 Zpracování CO_2 25

4.2 Porovnání zmíněných CCS technologií 27

5 Spalování ve fluidních kotlích 28

5.1 Fluidní vrstva 28

5.1.1 Vznik fluidní vrstvy 28
5.1.2 Nižší teplota spalování 28
5.1.3 Materiál vrstvy 29
5.2 Výhody fluidních kotlů 30
5.2.1 Flexibilita spalovaného paliva 30
5.2.2 Vysoká účinnost spalování 30
5.2.3 Zachycování síry 30
5.2.4 Emise oxidu dusičitého 31
5.3 Kotel s bublinkující fluidní vrstvou 31
5.3.1 Popis kotle s bublinkující fluidní vrstvou 31
5.3.1.1 Příprava a dávkování paliva 32
5.3.1.2 Zpracování vzduchu a spalin 32
5.3.1.3 Zpracování popela a regulace emisí 33
5.3.1.4 Výroba páry 33
5.3.1.5 Spalovací komora 34
5.3.2 Výhody a limity BFB kotlů 34
5.4 Kotel s cirkulující fluidní vrstvou 35
5.4.1 Obecné uspořádání CFB kotle 35
5.4.1.1 Systém distribuce vzduchu 36
5.4.1.2 Tok spalinového plynu 36
5.4.1.3 Tok pevných látek 36
6 Výpočtová část 38
6.1 Složení paliva 38
6.2 Přepočet stavů paliva 38
6.3 Stechiometrie spalování se vzduchem 39
6.4 Stechiometrie spalování v oxyfuel režimu 41
6.4.1 Porovnání stechiometrických výpočtů 43

7 Experimentální část 44
7.1 Popis experimentálního zařízení 44
7.2 Popis experimentu 45
7.3 Spalování se vzduchem 45
7.4 Oxyfuel spalování 47
8 Diskuze výsledků 50
9 Závěr 53
10 Seznam použité literatury 55
11 Seznam obrázků 58
12 Seznam tabulek 59

Seznam použitých symbolů, indexů a zkratek

Carbon Capture and Storage	CCS [1]
obnovitelný zdroj energie	OZE [1]
primární energetický zdroj	PEZ [1]
kombinovaná výroba elektřiny a tepla	KVET [1]
separační jednotka vzduchu	ASU [1]
jednotka selektivní katalytické redukce	SCR [1]
jednotka odsíření spalin	FGD [1]
recirkulace spalin	FGR [1]
kotel s bublinkující fluidní vrstvou	BFB [1]
kotel s cirkulující fluidní vrstvou	CFB [1]
objemová koncentrace	ω [1]
obsah vody v původním stavu	W^r [%]
obsah popela v původním stavu	A^r [%]
obsah popela v suchém stavu	A^d [%]
obsah uhlíku v suchém stavu bez popela	C^{daf} [%]
obsah uhlíku v suchém stavu	C^d [%]
obsah uhlíku v původním stavu	C^r [%]
obsah vodíku v suchém stavu bez popela	H^{daf} [%]
obsah vodíku v suchém stavu	H^d [%]
obsah vodíku v původním stavu	H^r [%]
obsah dusíku v suchém stavu bez popela	N^{daf} [%]
obsah dusíku v suchém stavu	N^d [%]
obsah dusíku v původním stavu	N^r [%]
obsah síry v suchém stavu bez popela	S^{daf} [%]
obsah síry v suchém stavu	S^d [%]
obsah síry v původním stavu	S^r [%]
obsah kyslíku v suchém stavu bez popela	O^{daf} [%]
obsah kyslíku v suchém stavu	O^d [%]
obsah kyslíku v původním stavu	O^r [%]
výhřevnost	Q_i^r [kJ/kg]

minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva	$V_{O_{2,min}}$ $[m_N^3/kg]$
minimální objem suchého vzduchu	$V_{VS_{min}}$ $[m_N^3/kg]$
minimální objem vlhkého vzduchu	$V_{VV_{min}}$ $[m_N^3/kg]$
součinitel množství vodní páry příslušné k 1 m^3 suchého vzduchu	χ_V [1]
objem vodní páry ve vzduchu	$V_{H_2O}^V$ $[m_N^3/kg]$
objem složky i ve spalinách	V_i $[m_N^3/kg]$
minimální objem suchých spalin	$V_{SS_{min}}$ $[m_N^3/kg]$
objem vodní páry ve spalinách	$V_{H_2O}^S$ $[m_N^3/kg]$
minimální objem vlhkých spalin	$V_{SV_{min}}$ $[m_N^3/kg]$
přebytek okysličovadla	α [1]
skutečný objem vlhkých spalin	V_{SV} $[m_N^3/kg]$
součinitel recirkulace spalin	r [1]
průtok recirkulovaných spalin	V_S^r $[m_N^3/hod]$
průtok spalin	V_S $[m_N^3/hod]$
objem nezreagovaného kyslíku	V_{O_2} $[m_N^3/kg]$
naměřená koncentrace kyslíku ve spalinách	$O_{2_{měřené}}$ [%]
objem přiváděného kyslíku	$V_{O_{2,in}}$ $[m_N^3/kg]$
průtok primárního vzduchu	$\dot{V}_{prim}$ $[m_N^3/hod]$
průtok recirkulace	$\dot{V}_{rec}$ $[m_N^3/hod]$
teplota spalování	T [°C]
průtok paliva	$\dot{m}_{palivo}$ $[kg/hod]$
objem přiváděného spalovacího vzduchu	V_{VV} $[m_N^3/kg]$
celkové množství vzniklých spalin	$V_S^{celk.}$ $[m_N^3/kg]$
průtok primárního kyslíku	$\dot{V}_{O_{2,prim}}$ $[m_N^3/hod]$

1 Úvod

Stále více lidí se v dnešní době zabývá problematikou oteplování naši planety a tak existuje řada možností a teorií jak k tomuto problému dochází. Jednou z příčin je únik oxidu uhličitého do atmosféry, který navyšuje skleníkový efekt. To znemožňuje odchod tepelného záření Země atmosférou a odráží se od ní zpět na zemský povrch. Podstatnou část vzniku škodlivých plynů tvoří spalování fosilních paliv, a tak se vyvíjí šetrnější technologie spalování vůči životnímu prostředí a rozvíjí se použití ekologičtějších paliv.

Biomasa, patřící k obnovitelným zdrojům energie, je hmota organického původu, která vzniká díky dopadající sluneční energii. Při jejím spalování dochází také k úniku oxidu uhličitého do ovzduší, ale nenavyšuje skleníkový efekt, jelikož rostliny za svého růstu spotřebují přibližně stejné množství. Průměrná délka života rostlinné biomasy je deset let, přičemž podzemní části rostlin zadržují oxid uhličitý ještě o mnoho déle. Z hlediska snížení množství škodlivého plynu z atmosféry tak představuje velmi výhodný druh paliva.

Jednou z metod snižování emisí oxidu uhličitého ze spalovacích procesů jsou tzv. Carbon Capture and Storage (CCS) technologie. Podstata těchto technologií spočívá v zachycení CO_2, jeho transportu a následného uložení. Mezi CCS technologie patří tři základní procesy zachycování oxidu uhličitého. Jedná se o post-combustion procesy, pre-combustion procesy a oxyfuel spalování. Post-combustion proces spočívá v zachycení CO_2 ze spalin po uskutečnění spalovacího procesu a pre-combustion proces se stará o úpravu paliva před samotným spalováním. Oxyfuel spalování spočívá v dodávce čistého kyslíku do spalovacího procesu namísto vzduchu. Eliminováním dusíku, jakožto hlavního plynu ve spalinách při vzduchem poháněném spalování, lze dosáhnout velmi vysoké koncentrace CO_2 ve spalinách, což znamená jeho účinnější a snadnější zachycení.

V praxi se biomasa často spaluje ve fluidních kotlích, které také mohou být opatřeny oxyfuel technologií. Palivo se spaluje ve fluidní vrstvě, kde dochází k míšení tuhých částic plyny za současného vzájemného styku. Taková vrstva se poté chová jako tekutina a nese její vlastnosti. Fluidní kotle disponují flexibilitou spalovaného paliva, vysokou účinností, nižší teplotou spalování a možností zachycování nežádoucí síry již v ohništi kotle. Mezi dva hlavní typy těchto kotlů patří kotel s bublinkující fluidní vrstvou a kotel s cirkulující fluidní vrstvou.

Cílem této práce je v první řadě zpracování rešerše biomasy jakožto paliva, CCS technologií se zaměřením na oxyfuel spalování a dvou základních typů fluidního kotle s jejich popisem. Následují stechiometrické výpočty pro spalování se vzduchem a pro

oxyfuel spalování. Závěrem jsou teoretické výpočty porovnány s experimentálním měřením spalování biomasy v kotli s bublinkující fluidní vrstvou se vzduchem i v oxyfuel režimu.

2 Biomasa

Biomasa je hmota biologického původu, zahrnující veškerou rostlinnou biomasu vyskytující se v půdě a ve vodě, veškerou živočišnou biomasu a organické odpady. Oproti fosilním palivům je značná výhoda její krátkodobá obnovitelnost. V dnešní době zaujímá značnou část obnovitelných zdrojů na Zemi a proto je stále podrobována dalšímu zkoumání z hlediska jejího energetického využití. V případě spalování se sleduje jak její výhřevnost a efektivita spalování, tak i zplodiny z jejího hoření. V energetice využíváme především cíleně pěstovaných rostlin a odpady ze zemědělské, potravinářské či lesní produkce. Pod pojmem biomasa rostlinného původu, tedy fytomasa, se rozumí převážně dřevo a dřevní odpady, případně další energetické rostliny vhodné ke spalování v různých typech topenišť. Využívat se dá prakticky veškerá rostlinná hmota. Podle typu rostlin se poté budou značně měnit její vlastnosti, začínaje množstvím v sobě obsažené vody a obecně jejich chemické složení. [1] [2]

2.1 Využití v energetice

Oproti fosilním palivům je biomasa výhodnější z pohledu obnovitelnosti. Dá se tedy předpokládat, že v budoucnu nahradí významnou část neobnovitelných zdrojů energie. S tím také souvisí určité nevýhody, jako například spolehlivá a dlouhodobá dodávka potřebného množství, náročnější doprava do míst spotřeby a následné uskladnění. Důležitějším faktorem je ale její příznivý dopad na životní prostředí. Z hlediska obsahu škodlivin ve spalinách patří biomasa do skupiny neutrálních paliv, jelikož přibližně stejné množství CO_2 uvolněné při spalování rostlina navázala z atmosféry při svém růstu. Mezi další výhody použití biomasy jako paliva, mimo zlepšení bilance CO_2 v ovzduší, může patřit omezení závislosti na dovozu fosilních paliv ze zahraničních zemí, využití devastované či přebytečné zemědělské půdy, nebo také vznik nových pracovních míst. [1]

Podle energetického využití biomasy lze toto využití členit na:

- Výrobu teplené energie přímým spalovacím procesem (dřevo, dřevní odpady, sláma)
- Zpracování neboli zušlechtění na kvalitnější paliva (pelety, brikety, bioplyn či bionafta)
- Výrobu elektřiny kombinovanou výrobou elektřiny a tepla

2.2 Procesy získávání energie z biomasy

Zvolený způsob získávání energie z biomasy závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech paliva. Mezi nejpodstatnější vlastnosti patří vlhkost, jelikož množství obsažené vody a sušiny určuje způsob zpracování biomasy i způsob získávání energie. Procesy lze podle množství sušiny rozdělit na mokré a suché. Hraniční podíl sušiny v palivu mezi mokrým procesem a suchým procesem je 50%.

2.2.1 Termochemické přeměny biomasy

Řadí se mezi suché procesy a dělí se do 3 skupin:

- Spalování – Chemická reakce probíhající při vyšších teplotách a za dostatečného přístupu kyslíku. Probíhá u hořlavých složek paliva (C, H, S). Nevyžaduje zvláště speciální úpravu biomasy před samotným spalováním, které obvykle probíhá ve dvou koncepcích:
  - Spalování na roštu
  - Spalování na fluidní vrstvě

  Jedná se o nejjednodušší metodu přeměny paliva v tepelnou energii.

- Pyrolýza – Termický rozklad látek bez přístupu kyslíku. Technologie přetváří biomasu ve formě dřeva a jiných odpadních materiálů na látky o vyšší energetické úrovni (plyny, kapaliny).

  Hlavní složky vznikající při pyrolýzním procesu jsou:
  - Tuhý zbytek
  - Pyrolýzní plyn – využíván jako palivo
  - Pyrolýzní olej – také možno využívat jako palivo
  - Pyrolýzní voda – vzniká z vlhkosti obsažené v biomase

- Zplyňování – Vlivem vysoké teploty a působením zplyňovacích látek (O, H) nastává přeměna uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství na výhřevný plyn. Vzniklým produktem je plyn obsahující výhřevné složky (H_2, CO, CH_4 + další C_xH_y), doprovodné složky (CO_2, H_2O a N_2) a znečišťující látky (dehet, sloučeniny síry, prach a další).

2.2.2 Biochemické přeměny biomasy

Řadí se mezi mokré procesy a dělí se do 2 skupin:

- Alkoholové kvašení – Chemická přeměna rostlinných sacharidů na etanol a oxid uhličitý činností kvasinek bez přístupu vzduchu.

- Metanolové kvašení – Uměle vyvolaný proces rozkladu organické látky bez přístupu vzduchu. Výroba bioplynu z městských či komunálních odpadů.

2.2.3 Chemické přeměny biomasy

Esterifikace surových bioolejů.

- Esterifikace – Chemická reakce organických kyslíkatých kyselin a alkoholu, přičemž vzniká ester.
    - Výroba etylalkoholu: brambory, cukrová řepa, obilí
    - Výroba metylesterů a olejů: řepka olejná (bionafta), slunečnice, len [3] [4] [5]

2.3 Druhy biomasy

Biomasu je možné třídit do několika základních kategorií. Hmota rostlin obecně je zastoupena pojmem fytomasa a dřevní biomasa (speciálně stromy) je značena pojmem dendromasa. Hlavní skupinu biomasy pro energetické účely tvoří energeticky využitelná biomasa, kterou můžeme dělit na cíleně pěstovanou k tomuto účelu a na odpadní biomasu.

2.3.1 Cíleně pěstovaná biomasa

Do této skupiny patří především rychle rostoucí dřeviny a rostliny bylinného charakteru. Požadované vlastnosti pro takové rostliny jsou hlavně rychlý a snadný výsev, krátké vegetační období, případně možnost využití i mimo energetické účely. Příklady rostlin pro danou skupinu cíleně pěstované biomasy najdeme v Tabulce 1.

2.3.2 Odpadní biomasa

Odpadní biomasa je tvořena zbytky, vedlejšími produkty a odpadem ze zpracování primárních zdrojů rostlinné či živočišné biomasy. Typy odpadní biomasy můžeme vidět v Tabulce 2.

Tabulka 1: Příklady rostlin pro dané skupiny cíleně pěstované biomasy [5]

Rychle rostoucí dřeviny	• Topol • Vrba • Olše
Rostliny bylinného charakteru	○ Šťovík ○ Ostřík ○ Konopí
Travní porosty	• Sloní tráva • Trvalé travní porosty • Chrastice
Obiloviny	○ Pšenice ○ Žito ○ Ječmen
Olejnaté rostliny	• Řepka olejná • Slunečnice • Len
Škrobo-cukernaté rostliny	○ Brambory ○ Cukrová řepa ○ Cukrová třtina

Tabulka 2: Příklady odpadní biomasy [5]

Z rostlinné výroby	• Zbytky ze zemědělské výroby a údržby krajin • Kukuřičná a řepková sláma • Odpady ze sadů a vinic
Z živočišné výroby	○ Exkrementy hospodářských zvířat ○ Zbytky krmiv
Z těžby a zpracování dřeva	• Větve • Kůra • Piliny
BRKO	○ Zbytky potravin ○ Papírové obaly
BRPO	• Odpady z jatek • Odpady z výroben cukru a papíru
Splašky z kanalizací	○ Komunální odpadní voda

2.3.3 Dělení dle vlastností biomasy

- Suchá – lze přímo spalovat (např. dřevní biomasa)
- Vlhká – nelze spalovat přímo, k výrobě bioplynu (např. tekuté odpady)
- Speciální – k získávání energetických látek jako je bionafta a líh (např. olejniny či škrobové plodiny) [1] [5]

2.4 Průmyslové využití biomasy v ČR

V roce 2017 tvořily obnovitelné zdroje energie v České republice 14,8% podílu na hrubé konečné spotřebě energie. Tímto už splňuje požadovaný procentuální podíl v rámci EU pro rok 2020, který byl 13%. Do roku 2030 je stanoveno zvýšení tohoto cíle až na 20,8%, což znamená, že využívání OZE, tedy i biomasy, pro energetické účely nadále poroste.

Biomasa, podle celkové získané energie z daného obnovitelného zdroje pro rok 2017, tvoří 65,39% podílu na energii ze všech OZE, což vidíme v Tabulce 3. Značnou část tohoto množství, konkrétně 40,18%, však tvoří domácnosti, které biomasu používají k výrobě tepelné energie k vlastní spotřebě.

Tabulka 3: Celková energie z biomasy v roce 2017 [6]

	Energie z OZE celkem [GJ]	Odhad podílu na PEZ [%]	Podíl na energii z OZE [%]
Biomasa mimo domácnosti	47 584 709	2,66	25,21
Biomasa v domácnostech	75 817 912	4,24	40,18

V následující Tabulce 4 a Tabulce 5 můžeme vidět výrobu elektřiny a tepla z biomasy pro rok 2017 a její podíl na dané energii v rámci OZE. Největší zastoupení má výroba tepelné energie v domácnostech a následně mimo domácnosti, jako například v teplárnách. Nejvíce používané palivo v těchto průmyslových závodech je dřevní štěpka, která vzniká jako odpad při zpracování dřeva či jeho cíleným drcením. Z biomasy můžeme také získávat elektrickou energii a to především jejím spoluspalováním s uhlím v elektrárnách, které disponují kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. Její podíl na celkové výrobě elektřiny ze všech zdrojů je však pouze 2,54%. [6]

Tabulka 4: Výroba elektřiny z biomasy v roce 2017 [6]

	Hrubá výroba elektřiny [MWh]	Podíl na elektřině z OZE [%]
Biomasa celkem	**2 213 397**	**23,59**
Palivové dříví	56	0,00
Dřevní štěpka	1 133 382	12,08
Celulózové výluhy	704 460	7,51
Neaglom. rostlinné materiály	96 495	1,03
Pelety a brikety	274 765	2,93
Ostatní biomasa	0	0,00
Kapalná biopaliva	4 240	0,05

Tabulka 5: Výroba tepla z biomasy v roce 2017 [6]

	Hrubá výroba tepla [GJ]	Podíl na teple z OZE [%]
Biomasa celkem	**78 803 611**	**85,76**
Biomasa mimo domácnosti	**21 940 177**	**23,88**
Palivové dříví	673 578	0,73
Dřevní štěpka	11 464 006	12,48
Celulózové výluhy	8 103 959	8,82
Neaglom. rostlinné materiály	635 728	0,69
Pelety a brikety	1 056 281	1,15
Ostatní biomasa	0	0,00
Kapalná biopaliva	6 624	0,01
Biomasa domácnosti	**56 863 434**	**61,88**

Obrázek 1: Dřevní štěpka [7]

2.4.1 Energetické centrum Jindřichův Hradec

Energetické centrum Jindřichův Hradec je součástí Skupiny ČEZ. Průmyslový závod disponuje technologií KVET z obnovitelných zdrojů energie. V současné době se zde nachází dva kotle na biomasu, jeden parní a jeden horkovodní, a kondenzační odběrová turbína pro zajištění výroby elektrické energie. Jejich technické parametry vidíme v Tabulce 6. Používané palivo je slisované balíky slámy a sena s obsahem vody do 16%. V Tabulce 7 můžeme vidět množství energií, které tento průmyslový závod dodá za jeden rok. [8]

Tabulka 6: Technické parametry technologií [8]

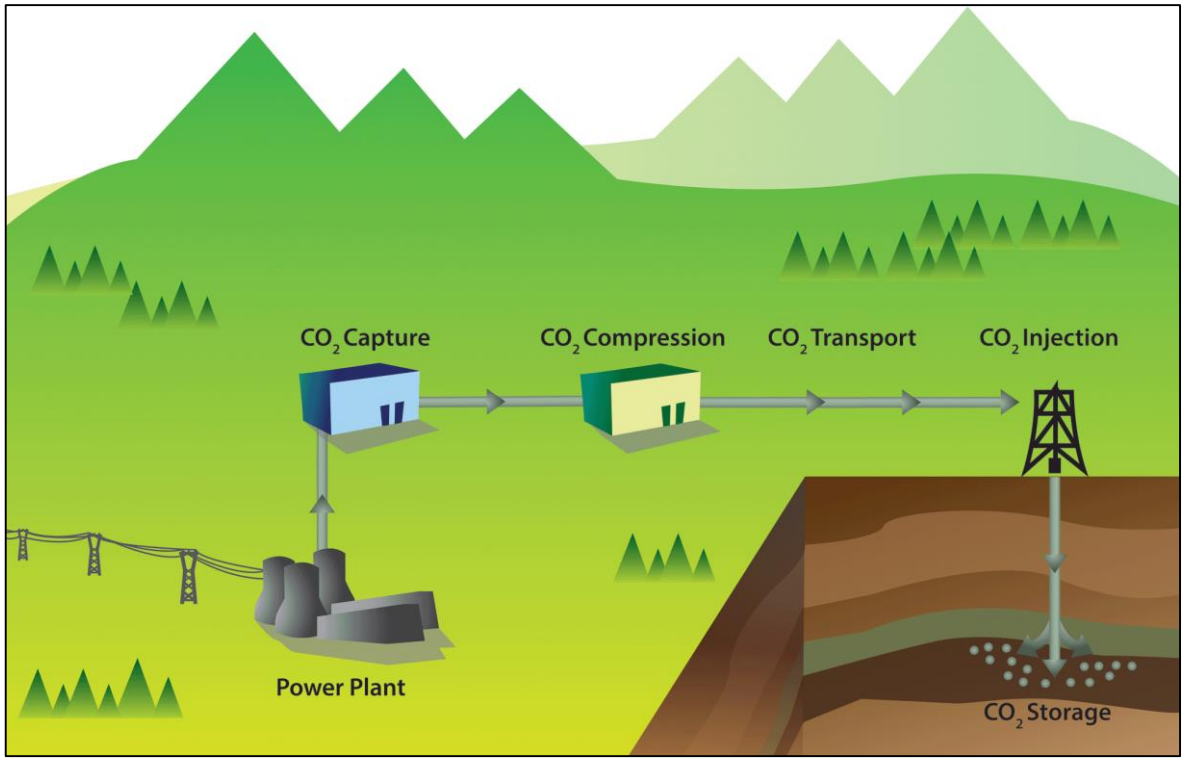
	Parní kotel	**Horkovodní kotel**
Výkon [MW]	19,25	10
Tlak [MPa]	4	1,2
Teplota [°C]	400	130
Účinnost [%]	90	89
	Kondenzační odběrová turbína	
Výkon [MW]	5,6	
Tlak vstupní páry [MPa]	3,8	

Tabulka 7: Množství dodaných energií za rok [8]

Dodané teplo [GJ/rok]	120 000
Dodaná elektrická energie [MWh/rok]	40 000

3 Carbon capture and storage

Výroba energie spalováním jak fosilních paliv, tak biomasy i dalších paliv je doprovázena vznikem škodlivých emisí. Právě produkce škodlivých látek a skleníkových plynů a jejich vypouštění do atmosféry je aktuálním problémem a současný výzkum se výrazně zaměřuje právě na redukci těchto látek. CCS technologie (Carbon Capture and Storage, nebo Carbon Capture and Sequestration) jsou jednou z hlavních možností, jak předcházet úniku oxidu uhličitého ze stacionárních zdrojů do atmosféry. Jak již napovídá název CCS, hlavní úkol těchto technologií je zachycení CO_2 a jeho následné uložení, namísto vypouštění do atmosféry.



Obrázek 2: Elektrárna (zdroj CO2) – Zachycení CO2 – Stlačení CO2 – Transport – Hlubinné uložení [9]

Existují tři hlavní procesy zachycování CO_2 přidružené k odlišným druhům spalování:

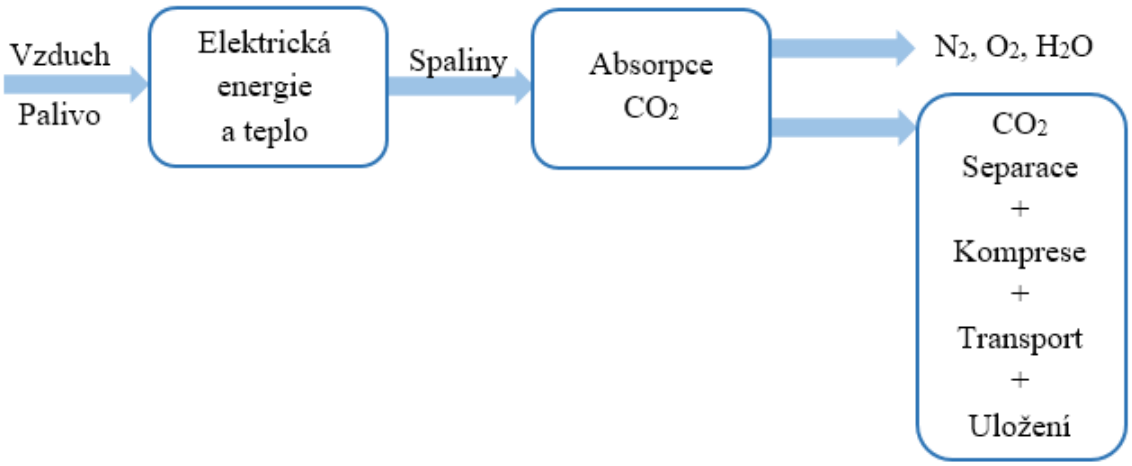
- Post-combustion proces
- Pre-combustion proces
- Oxyfuel spalování

3.1 Post-combustion proces

Tato technologie je brána jako nejvhodnější ze tří zmíněných pro dovybavení již existujících elektráren. V překladu tzv. “po-spalovací“ proces odstraňuje CO_2 ze spalin po uskutečnění spalovacího procesu. Jelikož se CO_2 ve spalinách vyskytuje v relativně nízké koncentraci (do 15%), zvyšuje se spotřeba energie a dalších nákladů potřebných k záchytu CO_2 v separační jednotce. Výběr, jakým způsobem se bude vzniklý oxid uhličitý absorbovat, závisí na jeho parciálním tlaku ve spalinách. Nejčastěji používanou metodou je použití chemické absorpce. Tato absorpce probíhá při vyšších teplotách a je založena na procesu použití amoniových kapalných látek, jako jsou například:

- MEA (monoethanolamine) – preferované u velmi nízkých parciálních tlaků CO_2
- MDEA (methyldiethanolamine) – preferovaný pro mírně vyšší parciální tlaky CO_2, jednodušší regenerace látky

Objem absorpce aminů se navyšuje s parciálním tlakem CO_2. Jelikož zpětné uvolnění CO_2 z absorbentu nastává převážně při zvýšení teploty a při vyšších tlacích, je regenerace těchto absorbentů poměrně náročná na spotřebu energie, která roste s klesajícím parciálním tlakem CO_2. Ve spalinách se také vyskytují nečistoty typu SO_X, NO_X, prachu a kyslíku, které způsobují degradaci absorbentu. [10] [11] [12]



Obrázek 3: Schéma Post-combustion procesu

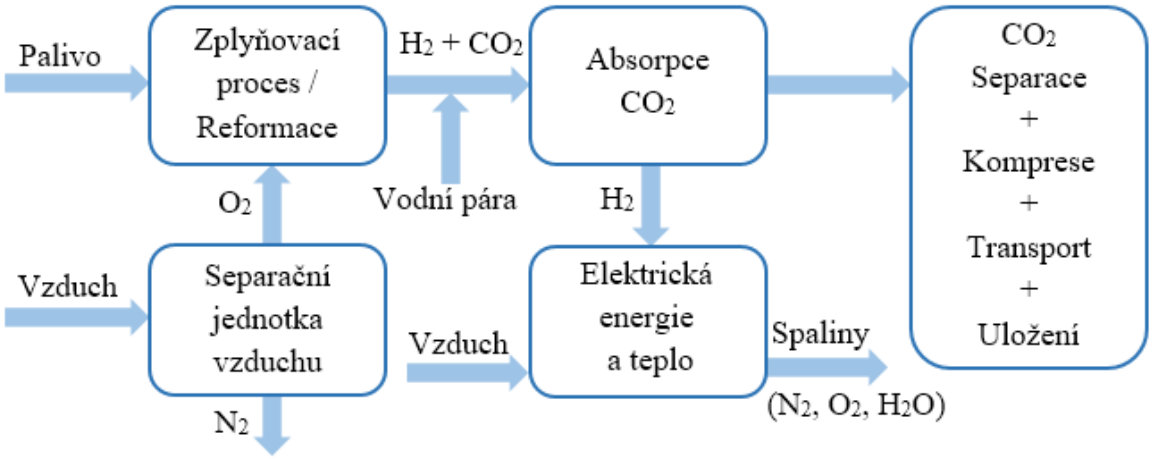
3.2 Pre-combustion proces

V tomto tzv. “před-spalovacím“ procesu dochází k úpravě paliva před samotným spalovacím procesem. Pro pevná paliva, jako jsou uhlí a biomasa, předúprava zahrnuje zplyňovací proces probíhající ve zplyňovacím zařízení při nízké dodávce kyslíku a zvýšeném tlaku. Výsledkem je syntetický plyn, který primárně tvoří CO a H_2, bez dalších znečišťujících plynných látek (Rovnice 1). Vzniklý syntetický plyn následně podstoupí chemickou reakci s vodní párou (tzv. water-gas shift reaction), čímž vzniká další H_2 a CO je přeměněn na CO_2 (Rovnice 2).

$Palivo \xrightarrow{Zplyňovací\ proces} CO + H_2$	(1)
$CO + H_2O \xrightarrow{water-gas\ shift} H_2 + CO_2$	(2)

Vysoká koncentrace CO_2 ve spalinách (>20%) napomáhá k separaci oxidu uhličitého a následnému získání spalin bohatých na vodík. K separaci se v tomto případě využívá převážně fyzikální absorpce, která probíhá při nižších teplotách než chemická absorpce a při vyšším parciálním tlaku CO_2 ve spalinách (nad 800kPa). Jelikož rozpouštění a následné uvolnění CO_2 nastává díky změnám tlaku, není potřeba tepelné energie k regeneraci absorbentu. To znamená nižší množství požadované energie pro tento proces, než pro proces post-combustion. V případě dodávaného paliva ve formě zemního plynu, který tvoří převážně CH_4, může dojít k jeho reformaci na syntetický plyn, který bude tvořen H_2 a CO (Rovnice 3). Zbylý proces je shodný s již výše popsaným pro pevná paliva. [10] [11] [12]

$CH_4 + H_2O \xrightarrow{reformace} CO + 3H_2$	(3)



Obrázek 4: Schéma Pre-combustion procesu

4 Oxyfuel spalování

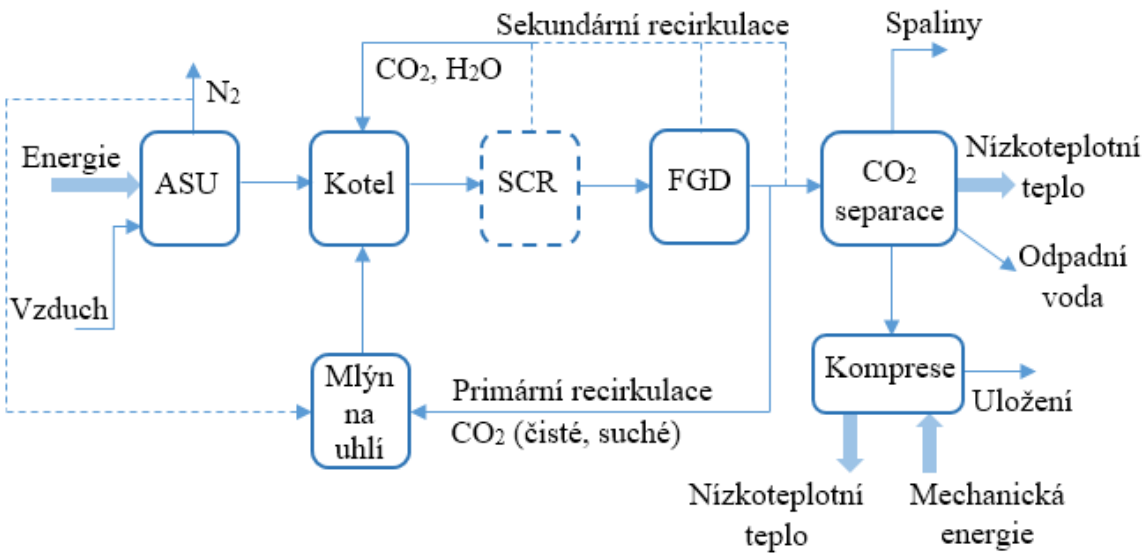
Jak již bylo zmíněno, oxyfuel spalování spadá do CCS technologií. V technické praxi popisuje spalovací systém, kde koncentrace plynného kyslíku v okysličovadle pro spalování paliva nabývá vyšších hodnot než přibližně 21%, což je koncentrace kyslíku v ovzduší. Hodnota této koncentrace může dosáhnout i 100% a v takovém případě mluvíme o úplných oxyfuel podmínkách. Jestliže se koncentrace plynného kyslíku pohybuje v rozmezí 21 – 100%, jedná se o kyslíkem obohacené spalovací systémy. V praxi se 100% koncentrace kyslíku v okysličovadle velmi těžko dosahuje, což znamená, že tato hodnota je v průmyslovém měřítku ekonomicky nepříznivá. Skutečné koncentrace, které se v praxi dosahují, jsou okolo 95 – 97%. Zbytek tvoří N_2 a Ar.

Oxyfuel spalování používá kyslík jako okysličovadlo a vysoký stupeň recirkulace spalin. Eliminováním N_2 ze spalovacího vzduchu, primárního plynu ve spalinách při vzduchem poháněném spalování, získáme vysokou koncentraci CO_2 ve spalinách. Kromě oxidu uhličitého jsou spaliny dále tvořeny vodními parami a přebytkem kyslíku. Maximální koncentrace CO_2 ve spalinách při použití vzduchu nepřekročí 20%, kdežto při oxyfuel spalování je možné tuto koncentraci zvýšit až na 90% v suchém stavu.

Tabulka 8: Objemové koncentrace látek obsažených v různých typech okysličovadla [14]

	ω_{O_2}	ω_{CO_2}	ω_{N_2}	ω_{Ar}	ω_{H_2O}
Vzduch	0,2062	0,0004	0,7685	0,0092	0,0157
Kyslík 1	1	0	0	0	0
Kyslík 2	0,95	0	0,05	0	0
Vzduch + Kyslík 30	0,3	0,0003	0,6777	0,0081	0,0139
Vzduch + Kyslík 50	0,5	0,0002	0,4841	0,0058	0,0099

V Tabulce 8 můžeme vidět, že při použití vzduchu jako okysličovadla bude N_2 tvořit téměř 77% jeho objemu. Při typickém oxyfuel spalování klesne separací vzduchu objem dusíku v okysličovadle na pouhých 5%. Z toho vyplívá jeden z hlavních důvodů použití vysokého stupně recirkulace spalin, a to konkrétně nahrazení objemu odseparovaného N_2 převážné CO_2 a tudíž poskytnutí dostatečného množství teplonosného média. [13] [14]



Obrázek 5: Schéma elektrárny pracující s oxyfuel spalováním [13]

4.1 Zásady oxyfuel spalování

Oxyfuel spalování se od běžného spalování se vzduchem liší ve třech hlavních bodech:

- Použití separační jednotky vzduchu – ASU (Air Separation Unit)
- Použití jednotky pro zpracovávání spalin
- Použití rozsáhlé recirkulace spalin – FGR (Flue Gas Recirculation)

4.1.1 Separační jednotka vzduchu

Účel separační jednotky vzduchu je dodávat kyslík o požadovaném množství do spalovacího procesu. Tato jednotka je také největší energetickou penalizací v oxyfuel technologii, jelikož vzhledem k výrobě elektřiny redukuje účinnost elektrárny v rozsahu od 7 do 9%. Zařízení musí být v průmyslovém užití schopno produkovat desítky až stovky tun kyslíku za hodinu. Prozatím existuje jediná technologie schopná dodávat kyslík do oxyfuel spalovacího procesu v takovém množství, tzv. jednotka kryogenní destilace. Proces spočívá v separaci čistých plynů ze vzduchu pomocí chlazení, po zkapalnění plynů nastává destilace jednotlivých komponent při teplotě varu jim příslušné.

4.1.2 Recirkulace spalin

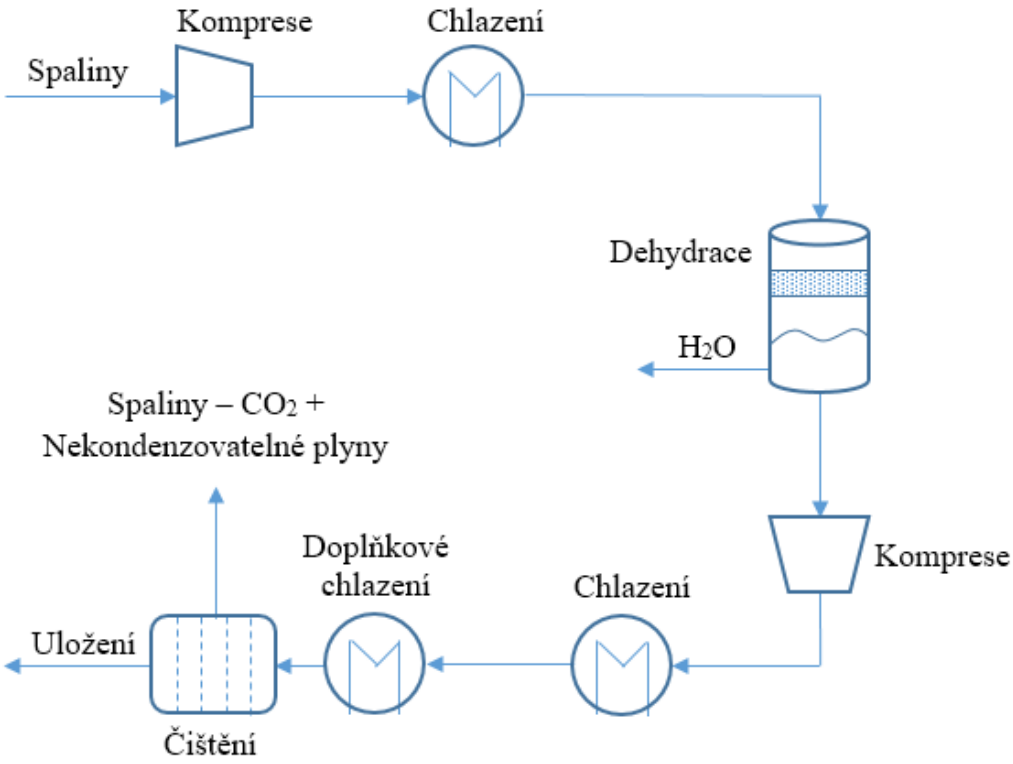
Recirkulace spalin při oxyfuel spalování je nutná pro snížení teploty v kotli a pro dodání potřebného množství teplonosného média za účelem odvodu tepla vzniklého spalováním paliva. Množství vzniklých spalin je při oxyfuel spalování přibližně o 80% menší než u klasického spalování se vzduchem, což je způsobeno separací N_2 z ASU. Dalším důvodem, proč je recirkulace spalin nezbytná, je zajištění dostatečného množství fluidačního média pro fluidaci vrstvy. Existují dva hlavní způsoby recirkulace spalin:

- Suchá recirkulace – Proces suché recirkulace spalin spočívá v ochlazení spalin pod rosný bod a následné kondenzaci vodních par.
- Mokrá recirkulace – Proces mokré recirkulace spalin spočívá v udržení teploty spalin nad rosným bodem, tedy v ponechání vodních par obsažených ve spalinách

Trať recirkulace spalin musí být teplotně izolována, aby nedocházelo k nechtěné kondenzaci vodních par ve spalinách, zejména při částečném zatížení kotle.

4.1.3 Zpracování CO_2

Systém oxyfuel spalování, jakožto technologie CCS, se také zabývá snížením koncentrací znečišťujících látek ve spalinách, jako jsou například oxidy síry a dusíku. V ideálním případě bude finální CO_2 obsahovat pouze vodní páru a zbytky kyslíku. Jako další krok zpracování oxidu uhličitého je jeho komprese a dehydrace. Komprese plynu je energeticky velmi náročná, a tak se jedná o další významnou penalizaci vzhledem k elektrické účinnosti elektrárny, která tímto klesá o 2 až 3%. [13]



Obrázek 6: Schéma technologie zpracování CO_2 [13]

4.2 Porovnání zmíněných CCS technologií

Tabulka 9: Výhody a nevýhody tří popsaných CCS technologií [10]

Proces zachycení	Aplikace	Výhody	Nevýhody
Post – combustion	Uhelné a plynné elektrárny	Vyspělejší technologie oproti ostatním alternativám; jednoduché vestavění do již existující elektrárny	Nízká koncentrace CO_2 negativně ovlivňuje účinnost zachycení
Pre – combustion	Uhlí zplyňující elektrárny	Vysoká koncentrace CO_2 napomáhá efektivitě zachycení; technologie je plně vyvinuta; možnost dovybavení existujících elektráren	Vysoký kapitál a provozní cena absorpčního systému; vlivem teploty vznikají problémy s přenosem tepla a účinností kvůli použití plynu bohatého na vodík v turbíně
Oxyfuel spalování	Uhelné a plynné elektrárny	Velmi vysoká koncentrace CO_2 podporující účinnost zachycení; poměrně vyspělé technologie separace vzduchu; možnost menších kotlů a dalších zařízení vlivem sníženého množství zacházeného plynu	Kryogenní produkce O_2 je nákladná; problémy s korozí vlivem alkalických absorbentů (vápno, vápenec); vysoký pokles účinnosti a vysoká energetická penalizace

5 Spalování ve fluidních kotlích

Kotel je v podstatě kombinace spalovacího zařízení a tepelného výměníku, kde se palivo spaluje v určitém režimu mísení plynů a pevných látek. Každý typ kotlů využívá odlišný proces kontaktu plynu a pevné látky. Kotle s bublinkující vrstvou využívají režimu bublinkující fluidace, kotle s cirkulující vrstvou využívají režim rychle fluidizující vrstvy ke styku plynu a pevné látky.

5.1 Fluidní vrstva

V různých průmyslových pochodech je potřeba uskutečnit vzájemné působení tuhých částic a kapalin nebo plynů. Částice se pohybují v zařízení, ve kterém probíhá vzájemné působení částic a plynů nebo kapalin. Jejich pohyb závisí na druhu použitého zařízení. V tomto případě mluvíme o pohybu, při kterém se částice v zařízení mísí z důvodu účinnějšího styku s protékajícími plyny. Při zvláštních a přesně vymezených podmínkách je možné uskutečnit míšení částic plyny nebo kapalinami za současného vzájemného styku. Tato vrstva částic se následně chová jako tekutina, a proto nese název fluidní vrstva. Plyny či kapaliny, které protékají touto vrstvou, se nazývají fluidační tekutiny. [15] [16]

5.1.1 Vznik fluidní vrstvy

Fluidní vrstva vzniká vzestupným prouděním fluidačního média tak, že zrna paliva, které se postupným vyhoříváním zmenšují, a zrna popílku vzniklého z již spáleného paliva jsou náporem relativní rychlosti vynášeny do určité výšky. Tato výška se nazývá výška fluidizující vrstvy. Vlivem rozšiřujícího se průřezu spalovací komory klesá rychlost vzduchu na hodnotu rychlosti vznosu. Tímto se také zabraňuje úletu menších zrn paliva a popílku z fluidního lože. Změna stavu nehybné vrstvy ve fluidní vrstvu se nazývá práh fluidace a veličiny charakterizující tuto změnu se nazývají prahové veličiny. Rychlost vzduchu, při které je dosažen práh fluidace, se nazývá prahová rychlost fluidace.

5.1.2 Nižší teplota spalování

V ohništi zůstávají po spálení tuhé zbytky ve formě sypkého popílku, které se nesmí spékat. Musí mít tedy maximální teplotu nižší, než je teplota měknutí popelovin. V opačném případě by se zrna spojovala, lože by se zaškvárovalo a nefluidizovalo. Nízká teplota se dosahuje čtyřmi základními způsoby:

- Použití paliv s nízkou výhřevností
- Bez ohřevu vzduchu, případně na nízké teploty
- Odvod potřebného tepla z fluidizované vrstvy
- Recirkulace spalin – Využívá se také v případě nedostačujícího množství spalovacího vzduchu k vytvoření fluidní vrstvy. Spalovací vzduch se totiž často dělí na primární (přiváděný pod vrstvu) a sekundární (přiváděný do nebo nad fluidizující vrstvu), jelikož přebytek vzduchu daný optimálním spalováním nemusí odpovídat optimálním poměrům fluidizace. [15] [16]

5.1.3 Materiál vrstvy

Kotel s fluidní vrstvou je typ parního generátoru, kde je palivo spalováno ve fluidním stavu. Ohniště fluidního kotle obsahuje masu zrnitých pevných látek obecně v rozmezí velikostí od 0,1 do 0,3 mm, nebo od 0,25 do 1,0 mm, záleží na typu fluidního kotle. Tyto pevné látky se nazývají materiál vrstvy a mohou být tvořeny:

- Písek nebo štěrk – pro kotle spalující paliva s nízkým obsahem popelovin
- Popel z uhlí – pro kotle spalující uhlí s vysokým či středním obsahem popelovin

Někdy se také využívá kombinace několika typů materiálu vrstvy. Velikost částic paliva, především u druhů s nízkým obsahem popelovin, nemusí být vždy hlavním důvodem při výběru velikosti materiálu vrstvy, jelikož palivo tvoří minimální podíl (1 až 3%) celkového složení materiálu vrstvy v kotli s fluidní vrstvou. Nicméně u paliv s vysokým obsahem popelovin má charakteristika paliva významný vliv na složení i velikost materiálu vrstvy.

Teplota spalování se u fluidních kotlů udržuje v rozmezí od 800 do 900 °C odváděním tepla ze spalovacího prostoru pomocí spalin či absorpcí tepla do potrubí zabudovaného v ohništi.

Existují dva základní typy fluidních kotlů:

- Kotel s bublinkující fluidní vrstvou – BFB
- Kotel s cirkulující fluidní vrstvou – CFB

5.2 Výhody fluidních kotlů

Fluidní kotle mají řadu jedinečných vlastností, které je činí atraktivnější než jiné typy kotlů spalujících pevná paliva.

5.2.1 Flexibilita spalovaného paliva

Jedna z hlavních příznivých vlastností fluidních kotlů je různorodost paliv vhodných ke spalování. Mohou spalovat různé druhy paliv bez výrazných ztrát na výkonu. Částice paliva činí méně než 1 až 3% hmotnostního objemu všech pevných látek ve vrstvě. Zbylé množství jsou nespalitelné částice, jako například sorbenty, popel nebo písek. Speciální hydrodynamické podmínky v ohništi fluidního kotle umožňují perfektní mísení plynů a pevných látek. Díky tomu jsou částice paliva přidávaného do ohniště rychle rozptýleny do velké masy pevných látek ve vrstvě, které je rychle ohřejí nad jejich zápalnou teplotu bez jakýchkoliv výrazných poklesů teplot pevných látek ve vrstvě. Tato vlastnost ohniště fluidního kotle v ideálním případě umožňuje spalování jakéhokoliv paliva bez podpory jiným lépe spalitelným palivem.

5.2.2 Vysoká účinnost spalování

Účinnost spalování se u BFB kotlů pohybuje v rozmezí od 90 do 98% a u CFB kotlů v rozmezí od 97,5 do 99,5%. Hlavní vlastnosti napomáhající k tak vysoké účinnosti spalování jsou:

- Lepší mísení plynů a pevných látek ve vrstvě
- Vyšší rychlost spalování (zvláště pro hrubší částice)

5.2.3 Zachycování síry

Na rozdíl od jiných kotlů, fluidní kotle mohou absorbovat oxid siřičitý, který vznikne během spalování, již v samotném ohništi kotle. Nízká teplota spalování (800 až 900°C) umožňuje přidávání vápence do spalovacího procesu, který absorbuje síru bez nutnosti použití přídavných zařízení. Produktem je pevný síran vápenatý odcházející z kotle spolu s popelem.

5.2.4 Emise oxidu dusičitého

Nízká emise NO_2 je také jedna z hlavních příznivých vlastností jak BFB tak CFB kotlů. Teplota spalování ve fluidních kotlích je příliš nízká k tomu, aby dusík obsažený ve vzduchu zoxidoval na oxid dusičitý. Vznikají tedy jen NO_X z oxidace dusíku v palivu, ale i ty lze vhodnými úpravami spalovacího procesu snižovat. [17]

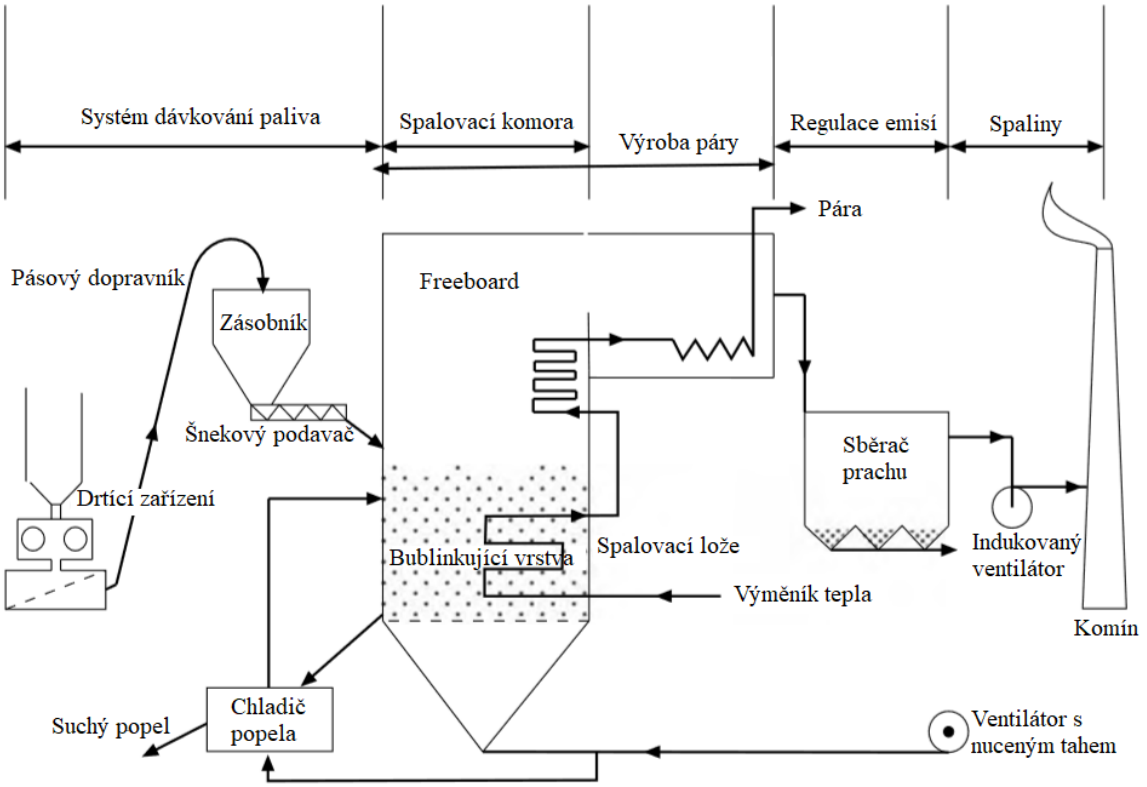
5.3 Kotel s bublinkující fluidní vrstvou

Kotle s bublinkující fluidní vrstvou (BFB) jsou pravděpodobně největší aplikací fluidních vrstev. Typický BFB kotel se skládá z ohniště a sekce konvekční výměny tepla. Ohniště tvoří bublinkující vrstva pevných látek a freeboard, což je volný prostor nacházející se nad vrstvou. Konvekční sekce je velmi podobná jakémukoliv konvekčnímu kotli. Kotlům s bublinkující fluidní vrstvou se také říká stacionární. Pokud ohniště BFB kotle pracuje pod atmosférickým tlakem, jedná se o spalování v atmosférické fluidní vrstvě. Pokud ohniště BFB kotle pracuje pod zvýšeným tlakem, jedná se o spalování v přetlakové fluidní vrstvě.

5.3.1 Popis kotle s bublinkující fluidní vrstvou

BFB kotel je možné rozdělit do několika subsystémů:

- Příprava, transport a kontrola dodávaného množství paliva
- Spalování
- Zpracování vzduchu a spalin
- Zpracování popela a regulace emisí
- Výroba páry



Obrázek 7: Možné uspořádání typického BFB kotle [17]

5.3.1.1 Příprava a dávkování paliva

Pevná paliva, jako například uhlí, jsou nejdříve drceny v drtícím zařízení na velikosti menší než 10 mm a následně transportovány do kotle. Požadovaná velikost, na kterou se palivo drtí, není pevná a závisí na mnoha faktorech včetně provozních zkušeností ve specifické elektrárně. Nadrcené palivo je přemístěno pásovým dopravníkem do zásobníků, odkud padá do měřícího zařízení, což může být například šnekový podavač. Palivo z podavače je buďto rozprašováno nad vrstvou nebo pneumaticky vstřikováno skrze spodní část vrstvy. Při použití biomasy se výhradně využívá systémů dávkující palivo nad vrstvu, jelikož tyto paliva, zvláště při zvýšené vlhkosti, mají sklon k ucpávání. Pro tento účel existují například speciální typy dvojitého šnekového podavače.

Kotle vyžadující zachycování síry musí navíc obsahovat zařízení pro drcení vápence, jeho transport a podávací zařízení. Sorbenty jsou obecně drceny na jemnější velikosti (< 6 mm) a následně pneumaticky dopravovány a vstřikovány do vrstvy.

5.3.1.2 Zpracování vzduchu a spalin

Spalovací vzduch se někdy předehřívá v ohříváku vzduchu. Primární vzduch vstupuje do vrstvy přes rošt nazývaný distributor, který napomáhá distribuovat vzduch

rovnoměrně napříč celou vrstvou a zabraňuje propadu pevných látek. Sekundární vzduch, pokud se používá, vstupuje do ohniště přes boční stěny těsně nad hladinu vrstvy, nebo výše ve freeboardu.

Spaliny vznikající v loži stoupají do freeboardu a následně opouští spalovací komoru z vrchní části. Poté spaliny prochází konvekční sekcí, která může zahrnovat řady potrubí, přehřívák, ohřívák, ekonomizér či ohřívák vzduchu. Nakonec jsou spaliny vypuštěny do atmosféry přes komín.

Kotle produkují dva odpadní produkty: spaliny a tuhé znečišťující látky. Tuhé znečišťující látky zahrnují popel z paliva a použité sorbenty. Spaliny by potenciálně mohly značně znečišťovat ovzduší, ale tyto systémy jsou navrhovány se speciálními ochranami proti znečišťování.

5.3.1.3 Zpracování popela a regulace emisí

Popel vznikající během spalování se akumuluje v loži, přičemž jemnější částečky jsou unášeny spolu se spalinami. Hrubé částice popela jsou jednoduše odváděny z lože otevřením odpadního ventilu. Následně jsou hrubé částice popela přivedeny do bubnového rotačního chladiče, v jehož stěnách cirkuluje voda a ochlazuje tyto částice. Jemnější částečky popela, známé jako popílek, se zachycují nejčastěji v cyklonovém odlučovači, případně v elektrostatickém odlučovači.

Nízké teploty spalování (800 až 900°C) vytváří příznivé podmínky pro redukování emisí NO_X a oxidu siřičitého, a tak jsou spaliny opouštějící BFB kotel se vstřikem vápence relativně čisté od škodlivých plynů, jako jsou SO_2 a NO_X. V důsledku toho není u těchto kotlů potřeba aplikovat jednotky, jako jsou například SCR a FGD.

5.3.1.4 Výroba páry

Napájecí voda je pumpována do bubnu přes ekonomizér, kde dochází k jejímu ohřátí. Horká voda následně proudí potrubím do nižší úrovně a poté stoupá stoupacím potrubím, které může tvořit ohrazení ohniště. Potrubí výparníku může u nějakých kotlů procházet skrze bublinkující vrstvu za účelem využití její vysoké účinnosti přenosu tepla. Přehřívák páry může být umístěn ve freeboardu nad vrstvou, případně částečně v konvekční sekci.

5.3.1.5 Spalovací komora

Spalovací komora BFB kotle se obvykle skládá z bublinkující vrstvy a freeboardu nad ní. Tepelná energie uvolněná spálením paliva je rozdělena mezi fluidní vrstvu a freeboard v procentuálním poměru přibližně 88:12. Teplota fluidní vrstvy se typicky udržuje v rozmezí 800 až 900°C odváděním odpovídajícího množství tepla. Výška fluidní vrstvy se typicky pohybuje v rozmezí 0,5 až 1,5 metrů a průměrná velikost pevných částic (materiálu vrstvy) je 1 mm. Velká masa dobře mísitelných rozpálených pevných látek umožňuje BFB kotlům efektivně spalovat i špatně spalitelná paliva. [17]

5.3.2 Výhody a limity BFB kotlů

Tabulka 10: Výhody a nevýhody kotlů s bublinkující fluidní vrstvou [17]

Výhody	○ Schopnost spalovat jakékoliv paliva, včetně uhlí s obsahem popelovin 60 až 70% nebo s obsahem těkavých látek pod 1% ○ Není potřeba drahých strojních zařízení k předúpravě paliva ○ Jsou schopné splňovat poměrně přísné emisní limity bez nutnosti použití drahých post-combustion jednotek
Limity	• Narušení potrubí procházejícího fluidní vrstvou, zvláště při spalování uhlí s vysokým obsahem popelovin • Nevhodné k dovybavení či nahrazení stávajících práškových kotlů z důvodu potřeby značně většího prostoru • Částečné zatěžování BFB kotle je omezené • Požadují velké množství podávacích bodů, což limituje jejich výkon u kotlů menších a středních velikostí

5.4 Kotel s cirkulující fluidní vrstvou

Kotel s cirkulující fluidní vrstvou (CFB) patří do skupiny fluidních kotlů. Jsou využívány převážně od vyšších výkonů (od 100 MW) jako zdroje tepla pro výrobu elektrické energie. Mezi jejich hlavní výhody patří efektivní řízení, vysoká účinnost spalování a nízká produkce škodlivých emisí.

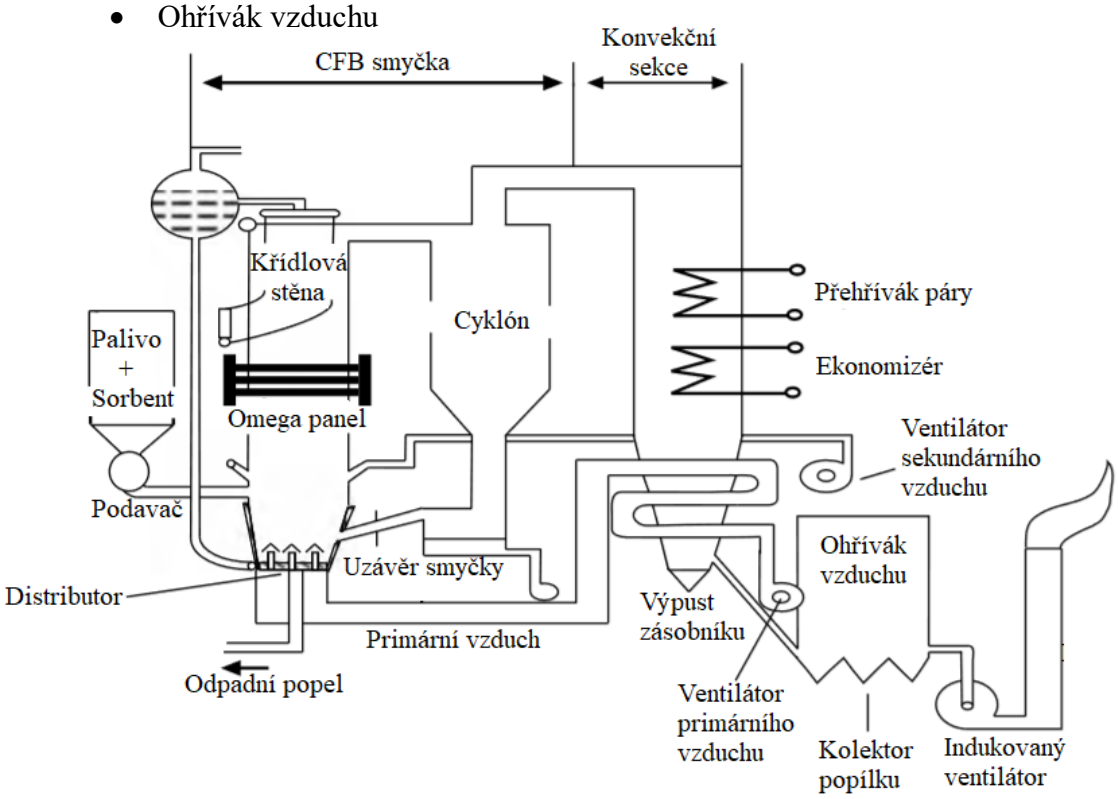
5.4.1 Obecné uspořádání CFB kotle

Kotel s cirkulující fluidní vrstvou může být rozdělen do dvou základních sekcí: CFB smyčka a klasické konvekční výměníkové sekce kotle. CFB smyčka zahrnuje následující položky, tvořící externí systém recirkulace pevných látek:

- Spalovací komora
- Cyklón – určený k separaci tuhých látek z průtoku spalin
- Systém pro recirkulaci pevných látek – tzv. loop seal (uzávěr smyčky)

Konvekční sekce se skládá z:

- Přehřívák páry
- Ohřívák páry
- Ekonomizér
- Ohřívák vzduchu



Obrázek 8: Možné uspořádání typického CFB kotle [17]

5.4.1.1 Systém distribuce vzduchu

Systém distribuce vzduchu, který spotřebovává největší množství energie, je pro CFB kotel velmi důležitý. Typický kotel s cirkulující fluidní vrstvou, jak vidíme na Obrázku 8, využívá tři typy ventilátorů:

- Ventilátor primárního vzduchu
- Ventilátor sekundárního vzduchu
- Ventilátor uzávěru smyčky

Ventilátor primárního vzduchu dodává vzduch o vysokém tlaku (10 až 20 kPa). Vzduch je ohřát v předehříváku vzduchu a následně vstupuje do spodní části pece přes distributor.

Sekundární ventilátor dodává také předehřátý vzduch, ale o nižším tlaku (5 až 15 kPa). Poté je vstřikován do lože několika porty nacházejícími se po obvodu ohniště ve výšce těsně nad spodní zúženou sekcí lože. Sekundární vzduch může být také přiváděn do podavače paliva a zajistit tak hladší průtok paliva.

Ventilátor uzávěru smyčky dodává nejmenší množství vzduchu, ale o nejvyšším tlaku. Vzduch do tohoto prostoru vstupuje napřímo přes distribuční mřížku vzduchu a na rozdíl od primárního a sekundárního vzduchu nebývá předehříván.

5.4.1.2 Tok spalinového plynu

V CFB kotlích se obecně využívá pouze jeden sací ventilátor k nasávání spalin. Tento takzvaný indukovaný ventilátor vytváří v systému podtlak k nasátí spalin z kotle přes veškeré přidružené technologie čištění spalin.

5.4.1.3 Tok pevných látek

Palivo padá ze zásobníku na pásový či jiný typ dopravníku, který následně podává požadované množství paliva do skluzného žlabu. V těch největších CFB kotlích podává skluzný žlab palivo do nakloněného potrubí přilehlého k uzávěru smyčky, kde se palivo mísí se žhavými pevnými látkami, které recirkulují v CFB smyčce, a proto vstupují do lože lépe rozptýlené. U jiných kotlů se palivo podává přímo do nižší sekce lože skrze přední či boční stěnu ohniště.

Sorbenty jsou obecně jemnější než palivo, a proto jsou dopravovány spolu s přidávaným vzduchem a následně vstřikovány skrze několik podávacích bodů. Jelikož

sorbenty reagují poměrně zvolna, není tak kritická jejich pozice vnášení do spalovací komory.

Popel či použité sorbenty jsou z kotle odváděny třemi cestami:

- Odpadní potrubí lože
- Sběrný zásobník popílku za tkaninovým filtrem či elektrostatickým odlučovačem
- Výpust zásobníku v konvekční sekci

Hrubý popel odcházející odpadním potrubím lože je chlazen vzduchem či vodou před jeho likvidací. Popílek se díky jeho nízké teplotě nemusí před likvidací chladit.

Směs paliva, popela a sorbentů cirkuluje přes CFB smyčku. Částice hrubší, než ty které odloučí cyklón, se v cyklónu zachytí a následně se recyklují zpět do spodní části ohniště. Zbylé jemnější částice, jako jsou popel a použité sorbenty vzniklé při spalování či odsíření, se v cyklónu odloučí a následně jsou zachyceny tkaninovým filtrem nebo elektrostatickým odlučovačem. [17]

6 Výpočtová část

Předmětem výpočtové části je určit složení daného paliva, přepočet jeho stavů a následně určit stechiometrii spalování se vzduchem a pro oxyfuel režim.

6.1 Složení paliva

Pro teoretický výpočet byly jako palivo použity dřevní pelety. Složení tohoto paliva, které se získá laboratorním rozborem, je uvedeno v Tabulce 11.

Tabulka 11: Složení dřevních pelet

Dřevní pelety	
$\boldsymbol{W^r}$	7,80 %
$\boldsymbol{A^r}$	1,50 %
$\boldsymbol{C^{daf}}$	51,00 %
$\boldsymbol{H^{daf}}$	6,90 %
$\boldsymbol{N^{daf}}$	0,30 %
$\boldsymbol{S^{daf}}$	0,003 %
$\boldsymbol{Q_i^r}$	16 400 kJ/kg

Jednotlivé indexy znázorňují stav dané složky v palivu. Index r, neboli raw, značí podíl složky v původním stavu. Index d, neboli dry, značí podíl složky v suchém stavu a index daf, neboli dry ash free, značí podíl složky v suchém stavu bez obsahu popela (v hořlavině).

6.2 Přepočet stavů paliva

Pro přepočet prvků paliva ze stavu dry ash free do stavu dry byl použit následující vzorec.

$$C^d = C^{daf} \cdot (1 - A^d) \quad [1] \tag{4}$$

Množství popela v suchém stavu zjistíme díky jeho známému množství ve stavu původním.

$$A^d = A^r \cdot \left(\frac{1}{1 - W^r}\right) \quad [1] \tag{5}$$

Kyslík se ve stavu daf získá odečtením procentuálního podílu složek C, H, N a S od 100%. Pro přepočet složek paliva ze stavu dry do stavu raw byl použit vzorec následující.

$C^r = C^d \cdot (1 - W^r)$ [1]	(6)

Výsledné složení všech prvků paliva ve všech stavech je uvedeno v Tabulce 12.

Tabulka 12: Prvkové složení dřevních pelet

	r [1]	**d [1]**	**daf [1]**
C	0,46257	0,5017	0,510
H	0,06258	0,0679	0,069
N	0,00272	0,003	0,003
S	0,00003	0,00003	0,00003
O	0,37910	0,4112	0,418
A	0,01500	0,0163	-
W	0,07800	-	-

6.3 Stechiometrie spalování se vzduchem

V první řadě je nutné podle následujícího vzorce určit minimální potřebné množství kyslíku k dokonalému spálení 1 kg paliva.

$V_{O_{2,min}} = 22{,}39 \cdot \left(\frac{C^r}{12{,}01} + \frac{H^r}{4{,}032} + \frac{S^r}{32{,}06} - \frac{O^r}{32}\right)$ $= 22{,}39 \cdot \left(\frac{0{,}463}{12{,}01} + \frac{0{,}063}{4{,}032} + \frac{0{,}00003}{32{,}06} - \frac{0{,}379}{32}\right)$ $= 0{,}945\ m_N^3/kg$	(7)

Při uvažování 21% objemu kyslíku ve vzduchu můžeme určit minimální objem suchého vzduchu.

$V_{VS_{min}} = \frac{V_{O_{2,min}}}{0{,}21} = \frac{0{,}945}{0{,}21} = 4{,}498\ m_N^3/kg$	(8)

Objem vlhkého vzduchu dostaneme vynásobením objemu suchého vzduchu a součinitele χ_V, který vyjadřuje množství vodní páry příslušné k 1 m_N^3 suchého vzduchu. Při běžných klimatických podmínkách v ČR je hodnota součinitele $\chi_V = 1{,}016$.

$V_{VV_{min}} = \chi_V \cdot V_{VS_{min}} = 1{,}016 \cdot 4{,}498 = 4{,}570\ m_N^3/kg$	(9)

Poté jsme schopni určit objem vodní páry ve vzduchu, což je rozdíl objemů vzduchu suchého a vzduchu vlhkého.

$V_{H_2O}^{V} = V_{VV_{min}} - V_{VS_{min}} = 4{,}570 - 4{,}498 = 0{,}072\ m_N^3/kg$	(10)

Z následujících vztahů určíme objemy složek spalin, které vznikají spalováním s minimálním objemem dodávaného vzduchu. Jejich součtem poté dostaneme celkový minimální objem suchých spalin.

$V_{CO_2} = \frac{22{,}26}{12{,}01} \cdot C^r + 0{,}0003 \cdot V_{VS_{min}}$ $= \frac{22{,}26}{12{,}01} \cdot 0{,}463 + 0{,}0003 \cdot 4{,}498 = 0{,}859\ m_N^3/kg$	(11)
$V_{SO_2} = \frac{21{,}89}{32{,}06} \cdot S^r = \frac{21{,}89}{32{,}06} \cdot 0{,}00003 = 0{,}00002\ m_N^3/kg$	(12)
$V_{N_2} = \frac{22{,}4}{28{,}016} \cdot N^r + 0{,}7805 \cdot V_{VS_{min}}$ $= \frac{22{,}4}{28{,}016} \cdot 0{,}003 + 0{,}7805 \cdot 4{,}498 = 3{,}513\ m_N^3/kg$	(13)
$V_{Ar} = 0{,}0092 \cdot V_{VS_{min}} = 0{,}0092 \cdot 4{,}498 = 0{,}041\ m_N^3/kg$	(14)
$V_{SS_{min}} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$ $= 0{,}859 + 0{,}00002 + 3{,}513 + 0{,}041 = 4{,}413\ m_N^3/kg$	(15)

Objem vodní páry obsažené ve spalinách lze určit podle následujícího vzorce.

$V_{H_2O}^{S} = \frac{44{,}8}{4{,}032} \cdot H^r + \frac{22{,}4}{18{,}016} \cdot W^r + V_{H_2O}^{V}$ $= \frac{44{,}8}{4{,}032} \cdot 0{,}063 + \frac{22{,}4}{18{,}016} \cdot 0{,}078 + 0{,}072 = 0{,}864\ m_N^3/kg$	(16)

Poté objem vodní páry obsažené ve spalinách sečteme s minimálním objemem suchých spalin a dostaneme minimální objem vlhkých spalin.

$V_{SV_{min}} = V_{H_2O}^{S} + V_{SS_{min}} = 0{,}864 + 4{,}413 = 5{,}278\ m_N^3/kg$	(17)

Pro výpočet skutečného objemu spalin je potřeba určit součinitel přebytku vzduchu α. Ten udává nadbytečné množství vzduchu, o které se přivádí do spalovacího procesu více, než je minimálně potřeba k dobrému vyhoření paliva. Pro tento výpočet je použita hodnota přiváděného primárního vzduchu naměřená při experimentálním měření (viz Tabulka 16).

$$\alpha = \frac{V_{VV}}{V_{VV_{min}}} = \frac{7{,}77}{4{,}57} = 1{,}7\ [1]$$	(18)

Vztah pro výpočet skutečného objemu spalin při spalování s daným přebytkem spalovacího vzduchu poté vypadá následovně.

$$V_{SV} = V_{SV_{min}} + (\alpha - 1) \cdot V_{VV_{min}} = 5{,}278 + (1{,}7 - 1) \cdot 4{,}570 = 8{,}480\ m_N^3/kg$$	(19)

Recirkulace spalin, která se používá především ke snížení teploty spalování, ale také k zajištění dostatečného množství fluidizačního média, je vyjádřena součinitelem recirkulace spalin r a vypočítá se jako podíl průtoku recirkulovaných spalin a průtoku spalin v místě odběru.

$$r = \frac{V_S^r}{V_S}\ [1]$$	(20)

6.4 Stechiometrie spalování v oxyfuel režimu

Postup stechiometrických výpočtů pro oxyfuel spalování je z části podobný jako při spalování se vzduchem. Hlavním rozdílem je to, že nejsou vypočteny objemy suchého a vlhkého vzduchu, jelikož jako okysličovadlo zde není použit vzduch, ale čistý kyslík. Objemy složek spalin a také vodní páry ve spalinách jsou menší právě proto, že se při oxyfuel režimu nepoužívá spalovací vzduch, který se podílí na jejich produkci.

Výpočet minimálního potřebného objemu kyslíku k dokonalému spálení 1 kg paliva je identický tomu pro spalování se vzduchem.

$$V_{O_{2,min}} = 22{,}39 \cdot \left(\frac{C^r}{12{,}01} + \frac{H^r}{4{,}032} + \frac{S^r}{32{,}06} - \frac{O^r}{32}\right) = 22{,}39 \cdot \left(\frac{0{,}463}{12{,}01} + \frac{0{,}063}{4{,}032} + \frac{0{,}00003}{32{,}06} - \frac{0{,}379}{32}\right) = 0{,}945\ m_N^3/kg$$	(21)

Jak již bylo zmíněno, objemy složek spalin, konkrétně oxidu uhličitého a dusíku, jsou menší. V oxyfuel režimu se na jejich produkci podílí pouze CO_2 a N_2 obsažené v palivu, nikoliv ve vzduchu. Minimální objem suchých spalin se opět rovná součtu všech složek spalin.

$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,463 = 0,857\ m_N^3/kg$	(22)
$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,003 = 0,002\ m_N^3/kg$	(23)
$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,00003 = 0,00002 m_N^3/kg$	(24)
$V_{SS_{min}} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{SO_2} = 0,857 + 0,002 + 0,00002 = 0,860\ m_N^3/kg$	(25)

Objem vodní páry ve spalinách je zmenšený o množství vodní páry obsažené ve spalovacím vzduchu, který se nepoužívá.

$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r$ $= \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,063 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,078 = 0,792\ m_N^3/kg$	(26)

Minimální objem vlhkých spalin je dán stejným vztahem jako při spalování se vzduchem, tedy součtem objemu vodní páry obsažené ve spalinách a minimálního objemu suchých spalin.

$V_{SV_{min}} = V_{H_2O}^S + V_{SS_{min}} = 0,792 + 0,860 = 1,652\ m_N^3/kg$	(27)

Pro výpočet skutečného objemu vlhkých spalin je nejprve potřeba určit objem nezreagovaného kyslíku, který se poté přičte k minimálnímu objemu vlhkých spalin. Nezreagovaný kyslík se určí podle následujícího vztahu, kde je celkový objem vstupujícího kyslíku zvětšený o takový přebytek α, aby vycházela stejná koncentrace O_2 v suchých spalinách jako při vzduchovém spalování.

$V_{O_2} = V_{O_{2,in}} - V_{O_{2,min}} = 1,03 - 0,945 = 0,085\ m_N^3/kg$	(28)

Skutečný objem vlhkých spalin je tedy součet minimálního objemu vlhkých spalin a nezreagovaného kyslíku.

$V_{SV} = V_{SV_{min}} + V_{O_2} = 1,652 + 0,085 = 1,737\ m_N^3/kg$	(29)

Součinitel přebytku kyslíku α se u oxyfuel spalování určí jako podíl skutečného objemu vstupujícího kyslíku, což je minimální objem kyslíku potřebného k dokonalému spálení 1 kg paliva a objem kyslíku nespotřebovaného při spalování, a právě minimálního objemu kyslíku potřebného k dokonalému spálení 1 kg paliva.

$\alpha = \frac{V_{O_{2,in}}}{V_{O_{2,min}}} = \frac{V_{O_2} + V_{O_{2,min}}}{V_{O_{2,min}}} = \frac{0{,}085 + 0{,}945}{0{,}945} = 1{,}09\ [1]$	(30)

Součinitel recirkulace spalin se v případě oxyfuel spalování vypočítá stejným způsobem jako u spalování se vzduchem.

$\mathrm{r} = \frac{V_S^r}{V_S}\ [1]$	(31)

6.4.1 Porovnání stechiometrických výpočtů

Porovnání výsledků v Tabulce 13 je založeno na stejné koncentraci O_2 v suchých spalinách. Hlavní rozdíl je v objemu dusíku, kde u vzduchu činí objem N_2 ve spalinách přibližně 40 % celkového objemu spalin a u oxyfuel spalování je objem N_2 ve spalinách téměř zanedbatelný. Z toho vyplívá, že při oxyfuel spalování vzniká přibližně o 80 % méně spalin, než při spalování se vzduchem. Koncentrace CO_2 v suchých spalinách je při oxyfuel spalování přibližně o 80% vyšší. Při porovnání přebytku okysličovadla pro stejnou koncentraci O_2 v suchých spalinách je tento přebytek pro oxyfuel výrazně nižší.

Tabulka 13: Porovnání stechiometrie oxyfuel spalování a spalování se vzduchem

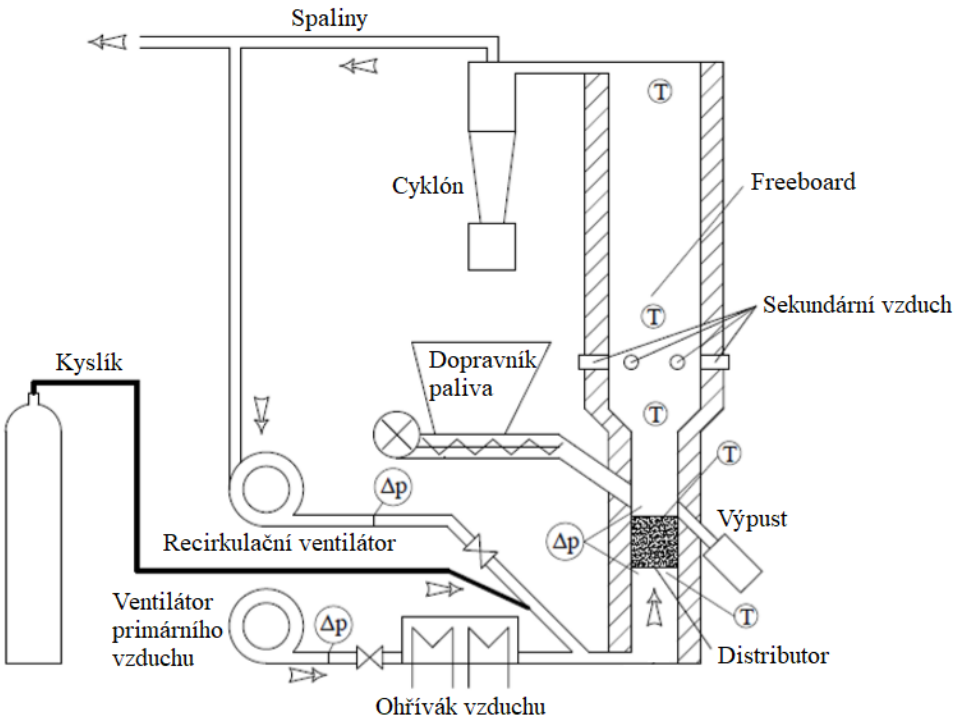
	Oxyfuel spalování	**Spalování se vzduchem**
$\boldsymbol{V_{O_{2,min}}}$ [m^3/kg]	0,945	0,945
$\boldsymbol{V_{VV_{min}}}$ [m^3/kg]	-	4,570
$\boldsymbol{O_2}$ [%]	8,96	8,96
$\boldsymbol{V_{CO_2}}$ [m^3/kg]	0,857	0,859
$\boldsymbol{CO_2}$ [%]	90,77	11,44
$\boldsymbol{V_{N_2}}$ [m^3/kg]	0,002	3,513
$\boldsymbol{V_{SO_2}}$ [m^3/kg]	0,00002	0,00002
$\boldsymbol{V_{SS_{min}}}$ [m^3/kg]	0,860	4,413
$\boldsymbol{V_{H_2O}^S}$ [m^3/kg]	0,792	0,864
$\boldsymbol{V_{SV_{min}}}$ [m^3/kg]	1,652	5,278
$\boldsymbol{V_{SV}}$ [m^3/kg]	1,737	8,480
α [1]	1,09	1,7

7 Experimentální část

Cílem experimentální části je změřit a porovnat množství dodávaného okysličovadla, množství vzniklých spalin a koncentraci CO_2 ve spalinách při spalování se vzduchem a při spalování v oxyfuel režimu. Dále porovnat tyto hodnoty a charakteristické parametry spalování těchto režimů s teoretickým výpočtem jak pro vzduch tak pro oxyfuel.

7.1 Popis experimentálního zařízení

Měření bylo provedeno na laboratorním spalovacím zařízení s výkonem 30 kW, které disponuje spalovací komorou s bublinkující fluidní vrstvou. Primární vzduch je do kotle dopravován ventilátorem přes elektrický ohřev. Palivo je dopravováno šnekovým dopravníkem. Spaliny jsou z kotle vedeny do cyklónu, kde dochází k odloučení tuhých částic, a následně je část vedena do komínu pomocí spalinového ventilátoru a část zpět do spalovací komory přes chladič. Recirkulace spalin zajišťuje především regulaci teploty spalování částečným nahrazením kyslíku ve fluidačním médiu a zároveň zajišťuje jeho dostatečné množství pro fluidaci. V případě oxyfuel spalování není použit ventilátor primárního vzduchu a fluidaci tak zajišťují pouze recirkulované spaliny, do kterých se přivádí čistý kyslík z tlakových láhví. Zjednodušené schéma experimentálního zařízení je znázorněno na Obrázku 9.



Obrázek 9: Schéma laboratorního zařízení [18]

7.2 Popis experimentu

Před samotným měřením je v první řadě potřeba zkalibrovat analyzátor spalin, což je provedeno pomocí kalibračních plynů. Následně začíná předehřev fluidní vrstvy pomocí ohřevu primárního vzduchu. Po dosažení minimální potřebné teploty vrstvy pro vznícení paliva se začne podávat palivo, které je v našem případě dřevní pelety. Palivo je po celou dobu experimentu podáváno kontinuálně (100 g/min). Regulací průtoku primárního vzduchu (kyslíku v případě oxyfuel spalování) a průtoku recirkulace spalin dochází k regulaci teploty, kterou se snažíme držet v rozmezí 820 až 850 °C. Objem kyslíku ve spalinách je regulován stejným způsobem.

Měření probíhalo po dobu 60 minut jak pro spalování se vzduchem, tak pro oxyfuel spalování. Po ustálení teplot byly hodnoty zaznamenávány po 2 vteřinách v programu Labview, který také slouží k řízení spalovacího zařízení. Pro vyhodnocení experimentu byly použity průměrné hodnoty.

Hlavním výstupem tohoto experimentu je změřit množství dodávaného okysličovadla, množství vzniklých spalin a koncentraci CO_2 ve spalinách pro oba režimy. Následuje jejich porovnání mezi sebou a také porovnání s teoretickým výpočtem.

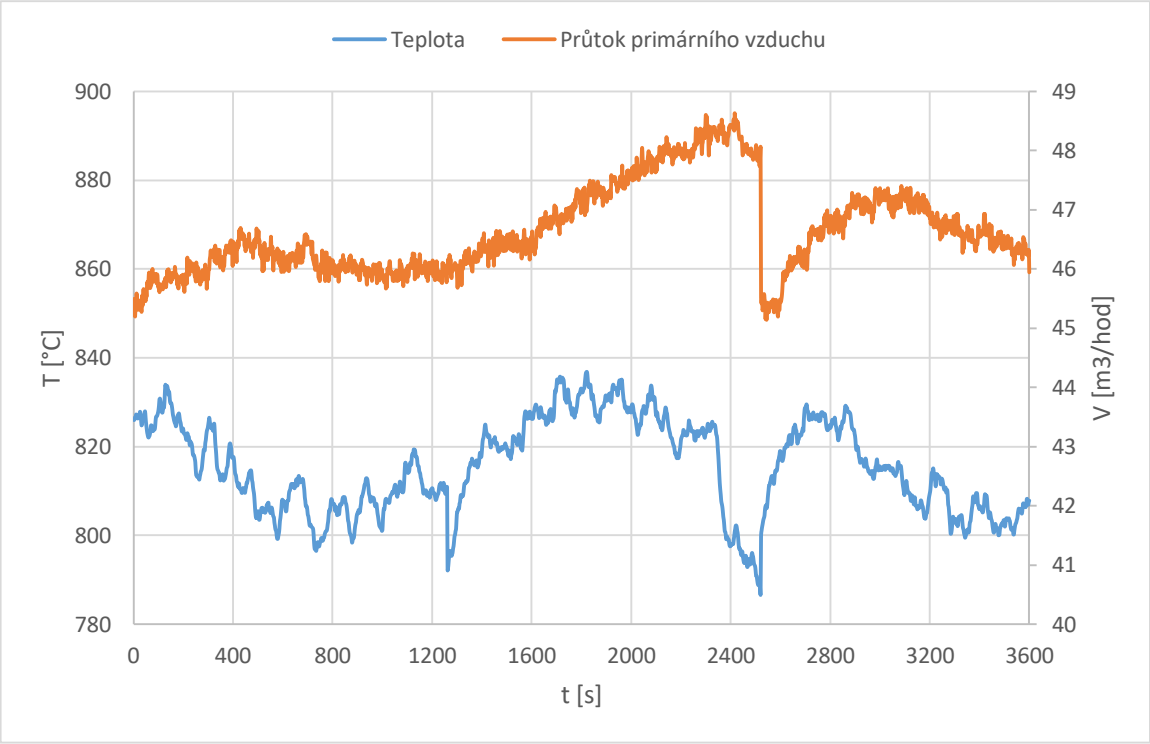
7.3 Spalování se vzduchem

Při měření bylo snahou udržovat teplotu přibližně na 820 °C a koncentraci O_2 ve spalinách do 10 %. Průměrné hodnoty vybraných veličin lze vidět v Tabulce 14.

Tabulka 14: Vybrané naměřené hodnoty pro spalování se vzduchem

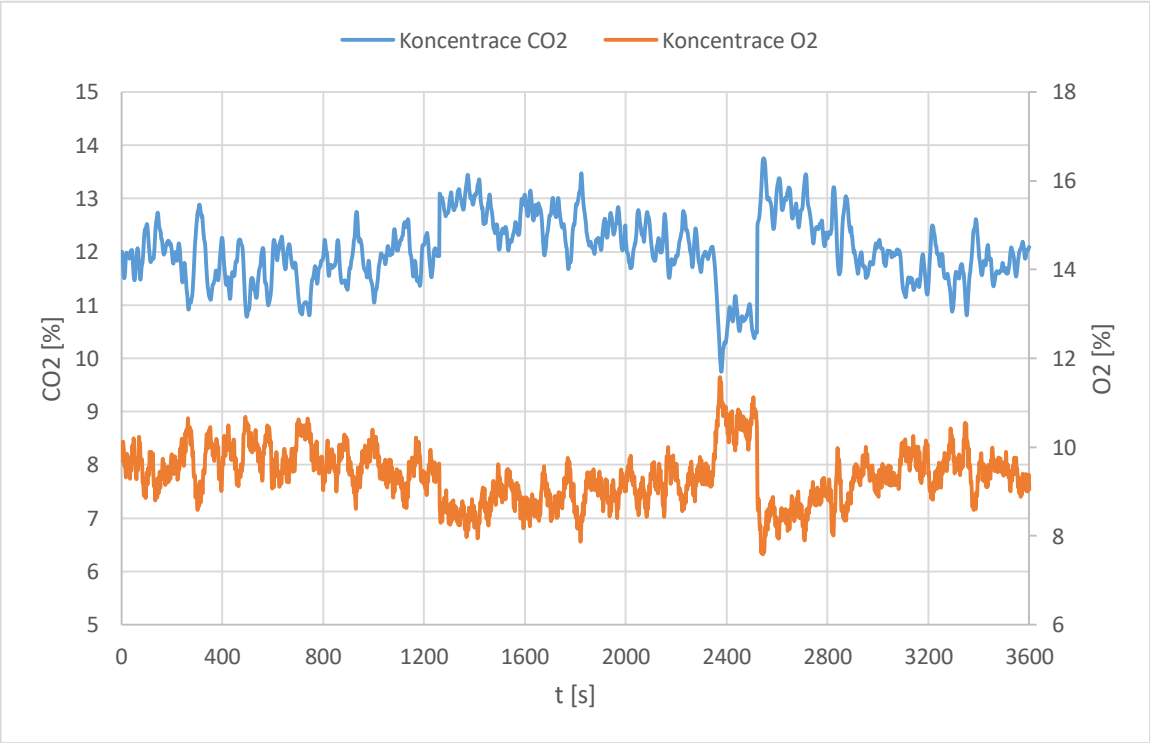
$\dot{V}_{prim}$ [Nm^3/h]	$\dot{V}_{rec}$ [Nm^3/h]	O_2 [%]	CO_2 [%]	T [°C]
46,63	18,12	9,35	12,02	815,35

V následujícím grafu je znázorněn průběh teploty a průtoku primárního spalovacího vzduchu, kterým se společně s recirkulací spalin právě teplota regulovala. V grafu si můžeme všimnout skokového poklesu průtoku primárního spalovacího vzduchu, který byl způsoben doplňováním paliva do zásobníku.



Obrázek 10: Průběh teploty a průtoku primárního vzduchu při spalování se vzduchem

Průběh koncentrace CO_2 ve spalinách společně s koncentrací O_2 ve spalinách je znázorněna v následujícím grafu. S rostoucí koncentrací kyslíku klesá koncentrace oxidu uhličitého a opačně.



Obrázek 11: Průběh koncentrací CO_2 a O_2 ve spalinách při spalování se vzduchem

Se známým průtokem paliva $\dot{m}_{palivo} = 6\ kg/hod$, který byl po celou dobu měření kontinuální, lze určit objem přiváděného primárního vzduchu vztaženého na 1 kg paliva.

$$V_{VV} = \frac{\dot{V}_{prim}}{\dot{m}_{palivo}} = \frac{46{,}63}{6} = 7{,}77\ m_N^3/kg \tag{32}$$

Přebytek vzduchu α je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{V_{VV}}{V_{VV_{min}}} = \frac{7{,}77}{4{,}57} = 1{,}7\ [1] \tag{33}$$

a s tímto přebytkem je vypočtena hodnota objemu vlhkých spalin podle následujícího vztahu.

$$V_{SV} = V_{SV_{min}} \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{VV_{min}} = 5{,}278 \cdot (1{,}7 - 1) \cdot 4{,}57 = 8{,}48\ m_N^3/kg \tag{34}$$

Pro výpočet koncového objemu spalin je nutné určit objem spalin vzniklých v kotli:

$$V_S = V_{SV} \cdot \dot{m}_{palivo} = 8{,}48 \cdot 6 = 50{,}88\ m_N^3/hod \tag{35}$$

a následně je sečíst s objemem recirkulovaných spalin.

$$V_S^{celk.} = V_S + V_S^r = 50{,}88 + 18{,}12 = 69{,}0\ m_N^3/hod \tag{36}$$

Celkový objem vzniklých spalin vztažený na 1 kg paliva.

$$V_S^{celk.} = \frac{V_S^{celk.}}{\dot{m}_{palivo}} = \frac{69{,}0}{6} = 11{,}5\ m_N^3/kg \tag{37}$$

Pro názornost je také určen součinitel recirkulace spalin r podle následujícího vztahu.

$$r = \frac{V_S^r}{V_S} = \frac{18{,}12}{50{,}88} = 0{,}36\ [1] \tag{38}$$

Vypočtené hodnoty jsou v Tabulce 16 porovnány s oxyfuel spalováním.

7.4 Oxyfuel spalování

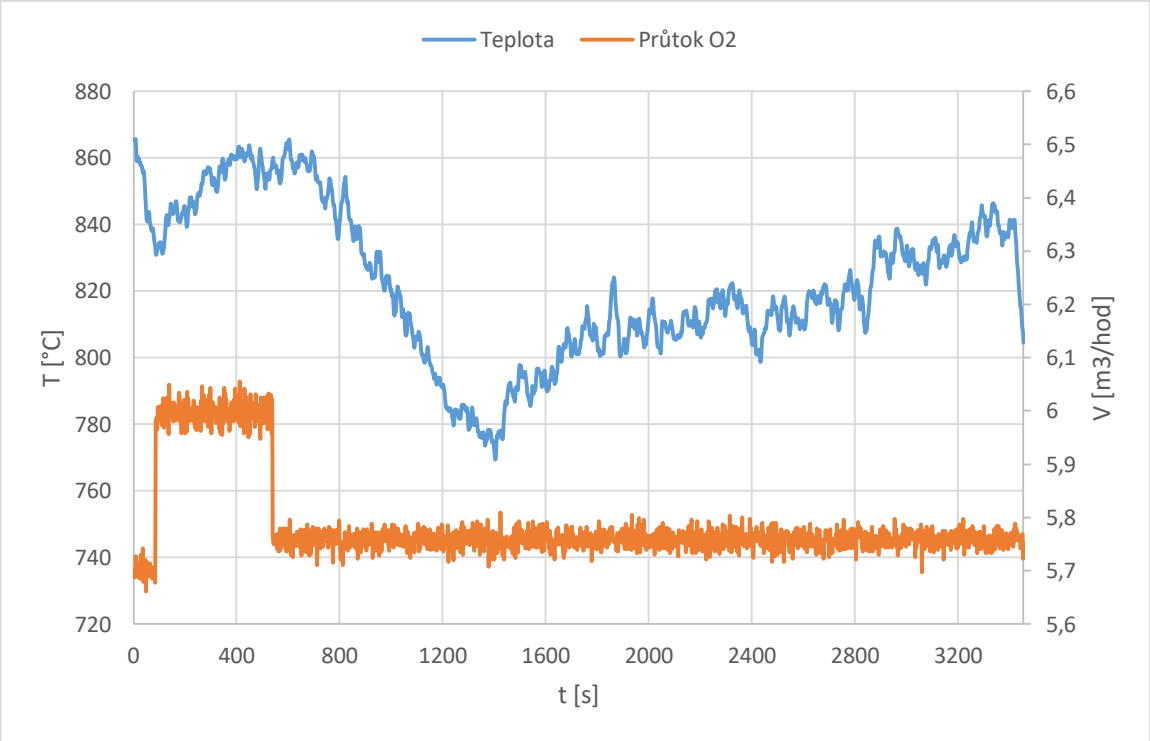
Při oxyfuel spalování byla snaha udržovat teplotu na stejné hodnotě jako u spalování se vzduchem, což je 820 °C. Koncentrace O_2 ve spalinách se udržovala přibližně na 7 % tak,

aby koncentrace CO_2 v suchých spalinách byla alespoň 85 %. Průměrné hodnoty vybraných veličin jsou znázorněny v Tabulce 15.

Tabulka 15: Vybrané naměřené hodnoty pro oxyfuel spalování

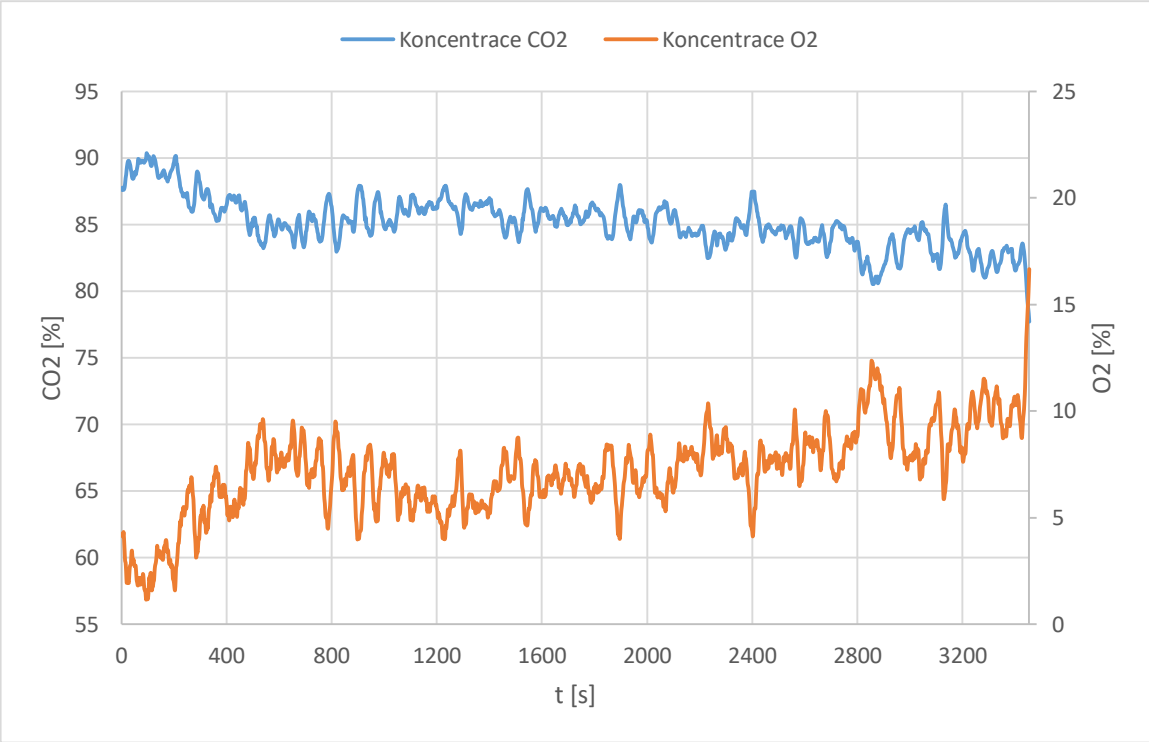
$\dot{V}_{O_{2,prim}}$ [Nm³/h]	$\dot{V}_{rec}$ [Nm³/h]	O_2 [%]	CO_2 [%]	T [°C]
5,79	46,03	7,17	85,14	822,16

V následujícím grafu je znázorněn průběh teploty a průtoku okysličovadla, což je při oxyfuel spalování čistý kyslík.



Obrázek 12: Průběh teploty a průtoku O_2 v oxyfuel režimu

Průběh koncentrace CO_2 a O_2 ve spalinách je zobrazen v následujícím grafu, kde stejně jako u spalování se vzduchem množství oxidu uhličitého ve spalinách klesá s rostoucím přebytkem kyslíku a opačně.



Obrázek 13: Průběh koncentrací CO_2 a O_2 ve spalinách při oxyfuel spalování

Průtok paliva je v tomto případě stejný jako u spalování se vzduchem a tedy $\dot{m}_{palivo} = 6\ kg/hod$. Podle vztahu (39) lze vypočítat objem přiváděného okysličovadla (kyslíku) vztaženého na 1 kg paliva.

$$V_{O_{2,in}} = \frac{\dot{V}_{O_{2,prim}}}{\dot{m}_{palivo}} = \frac{5{,}79}{6} = 0{,}96\ m_N^3/kg \tag{39}$$

Přebytek kyslíku α lze poté vypočíst podle následujícího vztahu.

$$\alpha = \frac{V_{O_{2,in}}}{V_{O_{2,min}}} = \frac{0{,}96}{0{,}945} = 1{,}02\ [1] \tag{40}$$

Odečtením minimálního potřebného množství kyslíku od objemu přiváděného kyslíku dostaneme množství nezreagovaného kyslíku.

$$V_{O_2} = V_{O_{2,in}} - V_{O_{2,min}} = 0{,}96 - 0{,}945 = 0{,}0198\ m_N^3/kg \tag{41}$$

Objem vlhkých spalin vztažených na 1 kg paliva poté vypadá následovně:

$$V_{SV} = V_{SV_{min}} + V_{O_2} = 1{,}652 + 0{,}0198 = 1{,}672\ m_N^3/kg \tag{42}$$

Součtem vlhkých spalin a recirkulovaných spalin dostaneme konečný objem spalin.

$V_S^{celk.} = V_{SV} + V_S^r = 1{,}672 + 7{,}672 = 9{,}34\ m_N^3/kg$	(43)

Pro názornost je také určen součinitel recirkulace spalin r podle následujícího vztahu.

$r = \frac{V_S^r}{V_S} = \frac{V_S^r}{V_{SV} \cdot \dot{m}_{palivo}} = \frac{46{,}03}{1{,}672 \cdot 6} = 4{,}59\ [1]$	(44)

Vypočtené hodnoty jsou v Tabulce 16 porovnány se spalováním se vzduchem.

8 Diskuze výsledků

Cílem experimentální části bylo provést měření spalování biomasy v experimentálním fluidním kotli s bublinkující fluidní vrstvou zaprvé při použití vzduchu jako okysličovadla a zadruhé při použití čistého kyslíku jako okysličovadla. Následně byly vypočteny hodnoty průtoku okysličovadla, objem vzniklých spalin a koncentrace CO_2 a O_2 v suchých spalinách pro oba režimy a na základě těchto hodnot dojde k porovnání spalování se vzduchem a oxyfuel spalování.

U obou režimů spalování je potřeba stejné minimální množství O_2 ke spálení 1 kg paliva. Vzduch obsahuje pouze 21% kyslíku, a tak je zřejmé, že při spalování se vzduchem je nutné přivést výrazně větší množství okysličovadla, než je tomu u oxyfuel spalování, kde je použit čistý kyslík. Z toho vyplívá, že oxyfuel musí mít výrazně vyšší množství recirkulovaných spalin, jelikož chybí N_2 obsažený ve vzduchu, jakožto teplonosné médium, které odvádí teplo z fluidní vrstvy. Absencí dusíku dále dochází k tomu, že se při oxyfuel spalování tvoří menší množství spalin, než je tomu u spalování se vzduchem. Hlavním důvodem, proč se vlastně oxyfuel spalování realizuje, je výrazné zvýšení koncentrace CO_2 ve spalinách, což usnadňuje jeho následné zachycení. Zatímco u spalování se vzduchem tvoří značnou část spalin právě dusík, u oxyfuel spalování tvoří díky přívodu čistého kyslíku a recirkulaci spalin značnou část oxid uhličitý. Navzdory tomu, že se při oxyfuel spalování přivádí čistý kyslík, je koncentrace O_2 v suchých spalinách nižší právě v tomto režimu díky velmi nízkému přebytku okysličovadla. Porovnání konkrétních hodnot je znázorněno v Tabulce 16.

Tabulka 16: Porovnání vypočtených hodnot z experimentálního měření

	Oxyfuel spalování	**Spalování se vzduchem**
Objem okysličovadla $V_{O_{2,in}}$ / V_{VV} [m^3/kg]	0,96	7,77
Přebytek okysličovadla α [1]	1,02	1,70
Objem spalin $V_S^{celk.}$ [m^3/kg]	9,34	11,50
Součinitel recirkulace spalin r [1]	4,59	0,36
Koncentrace CO_2 v suchých spalinách [%]	85,14	12,02
Koncentrace O_2 v suchých spalinách [%]	7,17	9,35

Porovnávání výsledků experimentálního měření a teoretického výpočtu je opět zaměřeno na objem a přebytek okysličovadla, dále na objem vlhkých spalin a koncentraci CO_2 a O_2 v suchých spalinách. Teoretický výpočet byl pro následující porovnání poupraven podle skutečně naměřených přebytků okysličovadla, aby byla zachována jistá podobnost s experimentálním měřením.

V oxyfuel režimu bylo do spalovacího procesu přiváděno téměř stechiometrické množství kyslíku, z čehož vyplívá velmi nízký přebytek okysličovadla. Objem vlhkých spalin je totožný, jelikož byl k teoretickému výpočtu použit právě měřený průtok přiváděného primárního okysličovadla. Výraznější rozdíl mezi teoretickým výpočtem a experimentálním měření nastává u koncentrace CO_2 v suchých spalinách, kde se liší o přibližně 12 %. Tato diference je převážně dána nežádoucím přisáváním vzduchu do kotle. Přisávaný vzduch obsahuje také kyslík, z čehož vyplívá, že měřená koncentrace O_2 v suchých spalinách je vyšší, než koncentrace vypočtená. Porovnání těchto hodnot je znázorněno v Tabulce 17.

Během spalování se vzduchem bylo při experimentu naměřeno menší množství přiváděného okysličovadla, což může být způsobeno větší chybou měření průtoku pomocí clony. Objem vlhkých spalin je opět stejný, jelikož byl k teoretickému výpočtu použit měřený přebytek vzduchu, na čemž se zakládá podobnost teoretického výpočtu a měření, aby bylo porovnávání relevantní. Koncentrace CO_2 i O_2 byla v tomto případě naměřena

mírně vyšší, což je stejně jako při oxyfuel spalování kvůli nežádoucímu přisávání vzduchu do kotle. Porovnání hodnot je znázorněno v Tabulce 18.

Tabulka 17: Porovnání teoretického výpočtu a experimentálního měření oxyfuel spalování

OXYFUEL SPALOVÁNÍ		
	Teoretický výpočet	Experimentální měření
Objem okysličovadla $V_{O_{2,in}}$ [m³/kg]	0,945	0,960
Přebytek kyslíku α [1]	1,02	1,02
Objem vlhkých spalin V_{SV} [m³/kg]	1,672	1,672
Koncentrace CO_2 v suchých spalinách [%]	97,66	85,14
Koncentrace O_2 v suchých spalinách [%]	2,25	7,17

Tabulka 18: Porovnání teoretického výpočtu a experimentálního měření spalování se vzduchem

SPALOVÁNÍ SE VZDUCHEM		
	Teoretický výpočet	Experimentální měření
Objem okysličovadla V_{VV} [m³/kg]	8,241 (4,570)*	7,770
Přebytek vzduchu α [1]	1,7	1,7
Objem vlhkých spalin V_{SV} [m³/kg]	8,480	8,480
Koncentrace CO_2 v suchých spalinách [%]	11,44	12,02
Koncentrace O_2 v suchých spalinách [%]	8,96	9,35

** hodnota minimálního potřebného množství vlhkého vzduchu $V_{VV_{min}}$*

9 Závěr

Cílem této práce bylo v první řadě zpracování rešerše na téma biomasy, CCS technologií s podrobnějším zaměřením na oxyfuel spalování a fluidních kotlů. Následně byly provedeny stechiometrické výpočty složení a objemů spalin pro oxyfuel a vzduchové spalování. Teoretický výpočet obou režimů byl poté porovnán s experimentálním měřením spalování dřevních pelet ve fluidním kotli s bublinkující fluidní vrstvou.

Pro názornost bylo také porovnáno samotné experimentální spalování v oxyfuel a vzduchovém režimu, kde lze pozorovat hned několik signifikantních rozdílů těchto dvou druhů spalování. Například přebytek okysličovadla 1,7 u spalování se vzduchem je výrazně vyšší, než je tomu u oxyfuel spalování, kde činí přebytek okysličovadla pouze 1,02. Při oxyfuel spalování je součinitel recirkulace spalin více než desetinásobný a také koncentrace CO_2 ve spalinách je více než o 70 % vyšší.

Porovnávání teoretických výpočtů a experimentálního měření bylo zaměřeno na objem přiváděného okysličovadla, přebytek okysličovadla, objem vzniklých vlhkých spalin a koncentraci CO_2 a O_2 v suchých spalinách. Největší diference hodnot nastala u koncentrace CO_2 v suchých spalinách při oxyfuel spalování, kde byla naměřena nižší koncentrace přibližně o 12 % oproti výpočtu, zatímco u vzduchového spalování byla naměřena vyšší koncentrace o přibližně 0,5 %. Tato odlišnost naměřené koncentrace od teoretického výpočtu je dána především nežádoucím přisáváním vzduchu do kotle. Přisávaný vzduch obsahuje také kyslík, což poté způsobuje vyšší měřené koncentrace O_2 v suchých spalinách, než vychází z teoretických výpočtů. Nežádoucí vzduch může být přisáván ve spodní části kotle, například přes zásobník paliva, kde se vzduch bude účastnit spalovacího procesu, nebo může k přisávání docházet ve vrchní části kotle, kde se vzduch spalování již neúčastní, a tak přivede do spalin určitou část dusíku i kyslíku.

Dalšími faktory, které můžou mít vliv na 5 % rozdíl koncentrace kyslíku v suchých spalinách při oxyfuel spalování, je rozbor paliva, jeho vlastnosti a podávané množství. Palivo může mít při podávání do kotle například rozdílnou vlhkost, než byla zjištěna při rozboru. V případě nepřesně změřeného množství podávaného paliva činí snížení jeho průtoku o 0,1 kg/s dvojnásobné zvýšení koncentrace O_2 v suchých spalinách. Při porovnání objemů přiváděného okysličovadla si lze všimnout, že v případě oxyfuel režimu je dodáváno téměř stechiometrické množství okysličovadla. V případě vzduchového spalování byl naměřen přibližně o 0,5 m^3 na 1 kg paliva menší objem přiváděného vzduchu než bylo teoreticky vypočteno, což může být způsobeno nepřesným měřením průtoku vzduchu pomocí clony.

Pro podobnost teoretického výpočtu a měření byla u obou režimů spalování použita totožná hodnota přebytku okysličovadla a v případě oxyfuel spalování byl do výpočtů také použit měřený průtok primárního kyslíku, z čehož vyplívá stejná hodnota objemu vzniklých vlhkých spalin.

10 Seznam použité literatury

[1] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy* [online]. Ostrava [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf. Metodická příručka ke studii. VŠB-Technická univerzita Ostrava.

[2] CELJAK, Ivo: Biomasa je nezbytná součást lidského života. *Biom.cz* [online]. 2008-12-22 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z WWW: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-je-nezbytna-soucast-lidskeho-zivota>. ISSN: 1801-2655.

[3] BUDIŠ, Marek. *Energetické využití biomasy* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40314. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.

[4] MOTLÍK, Jan, VÁŇA, Jaroslav: Biomasa pro energii (2) Technologie. *Biom.cz* [online]. 2002-02-06 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z WWW: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energii-2-technologie>. ISSN: 1801-2655.

[5] VOBOŘIL, David. Biomasa - využítí, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. 2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/

[6] BUFKA, Aleš, Jana VEVERKOVÁ a Diana ANDRONIC. *Obnovitelné zdroje energie v roce 2017* [online]. Říjen 2018, 62 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2018/12/Obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2017-new.pdf

[7] TopTopol. In: *TopTopol, Rychle rostoucí dřeviny* [online]. 2013, 24.11.2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: http://toptopol.cz/vynosy-drevni-stepka-2/

[8] *Energetické centrum s.r.o.* [online]. Jindřichův Hradec [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.ecjh.cz/cze/index.html

[9] SMIT, Berend. Carbon Capture and Storage: introductory lecture. *Faraday Discussions* [online]. 2016, **192**, 9-25 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1039/C6FD00148C. ISSN 1359-6640. Dostupné z: http://xlink.rsc.org/?DOI=C6FD00148C

[10] LEUNG, Dennis Y.C., Giorgio CARAMANNA a M. Mercedes MAROTO-VALER. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **39**, 426-443 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.093. ISSN 13640321. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114005450

[11] GIBBINS, Jon a Hannah CHALMERS. Carbon capture and storage. *Energy Policy* [online]. 2008, **36**(12), 4317-4322 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.058. ISSN 03014215. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com /retrieve/pii/S0301421508004436

[12] KANNICHE, Mohamed, René GROS-BONNIVARD, Philippe JAUD, Jose VALLE-MARCOS, Jean-Marc AMANN a Chakib BOUALLOU. Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO2 capture. *Applied Thermal Engineering*[online]. 2010, **30**(1), 53-62 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.05.005. ISSN 13594311. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431109001471

[13] HRDLICKA, Jan, Matěj VODIČKA, Pavel SKOPEC, František HRDLIČKA a Tomáš DLOUHÝ. CO2 Capture by Oxyfuel Combustion. *CO2 Separation, Purification and Conversion to Chemicals and Fuels* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2019, 2019-10-31, 55-78 [cit. 2019-05-19]. Energy, Environment, and Sustainability. DOI: 10.1007/978-981-13-3296-8_5. ISBN 978-981-13-3295-1. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-3296-8_5

[14] SKOPEC, Pavel a Jan HRDLIČKA. SPECIFIC FEATURES OF THE OXYFUEL COMBUSTION CONDITIONS IN A BUBBLING FLUIDIZED BED. *Acta Polytechnica* [online]. 2016, **56**(4), 312-318 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.14311/AP.2016.56.0312. ISSN 1805 - 2363. Dostupné z: https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/3258

[15] BERÁNEK, Jaroslav a Drahomír SOKOL. *Fluidní technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961.

[16] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983.

[17] BASU, Prabir. *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton, 2006. ISBN 978-084-9333-965.

[18] SKOPEC, Pavel, Jan HRDLIČKA a Matěj VODIČKA. *Energie z biomasy ..: Lednice, Česká republika* [online]. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2015, s. 100-105 [cit. 2019-05-19]. ISBN 978-80-214-4775-2.

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Dřevní štěpka [7].....19
Obrázek 2: Elektrárna (zdroj CO2) – Zachycení CO2 – Stlačení CO2 – Transport – Hlubinné uložení [9].....20
Obrázek 3: Schéma Post-combustion procesu.....21
Obrázek 4: Schéma Pre-combustion procesu.....22
Obrázek 5: Schéma elektrárny pracující s oxyfuel spalováním [13].....24
Obrázek 6: Schéma technologie zpracování CO_2 [13].....26
Obrázek 7: Možné uspořádání typického BFB kotle [17].....32
Obrázek 8: Možné uspořádání typického CFB kotle [17].....35
Obrázek 9: Schéma laboratorního zařízení [18].....44
Obrázek 10: Průběh teploty a průtoku primárního vzduchu při spalování se vzduchem.....46
Obrázek 11: Průběh koncentrací CO_2 a O_2 ve spalinách při spalování se vzduchem.....46
Obrázek 12: Průběh teploty a průtoku O_2 v oxyfuel režimu.....48
Obrázek 13: Průběh koncentrací CO_2 a O_2 ve spalinách při oxyfuel spalování.....49

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklady rostlin pro dané skupiny cíleně pěstované biomasy [5] 16
Tabulka 2: Příklady odpadní biomasy [5] 16
Tabulka 3: Celková energie z biomasy v roce 2017 [6] 17
Tabulka 4: Výroba elektřiny z biomasy v roce 2017 [6] 18
Tabulka 5: Výroba tepla z biomasy v roce 2017 [6] 18
Tabulka 6: Technické parametry technologií [8] 19
Tabulka 7: Množství dodaných energií za rok [8] 19
Tabulka 8: Objemové koncentrace látek obsažených v různých typech okysličovadla [14] 23
Tabulka 9: Výhody a nevýhody tří popsaných CCS technologií [10] 27
Tabulka 10: Výhody a nevýhody kotlů s bublinkující fluidní vrstvou [17] 34
Tabulka 11: Složení dřevních pelet 38
Tabulka 12: Prvkové složení dřevních pelet 39
Tabulka 13: Porovnání stechiometrie oxyfuel spalování a spalování se vzduchem 43
Tabulka 14: Vybrané naměřené hodnoty pro spalování se vzduchem 45
Tabulka 15: Vybrané naměřené hodnoty pro oxyfuel spalování 48
Tabulka 16: Porovnání vypočtených hodnot z experimentálního měření 51
Tabulka 17: Porovnání teoretického výpočtu a experimentálního měření oxyfuel spalování 52
Tabulka 18: Porovnání teoretického výpočtu a experimentálního měření spalování se vzduchem 52