

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2023

**VOJTĚCH
TOMAŠÍK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tomašik** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **483988**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza spalování biomasy ve fluidní vrstvě ve vzduchovém a oxyfuel režimu

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of fluidized bed combustion of biomass in air and oxyfuel modes

Pokyny pro vypracování:

- 1) zpracování literární rešerše na téma problematiky oxyfuel spalování se zaměřením na fluidní vrstvu.
- 2) sestavení výpočtu pro bilanci spalovacího procesu ve vzduchovém a oxyfuel režimu.
- 3) sestavení výpočtu pro určení globální stechiometrie (přebytku) kyslíku v obou režimech a koncentrací složek spalin v závislosti na stechiometrii kyslíku, a určení tepelných a fluidačních podmínek.
- 4) provedení experimentu spalování dřevní biomasy ve vzduchovém a oxyfuel režimu při různých stechiometriích okysličovadla, porovnání naměřených hodnot s modelově vypočtenými.
- 5) porovnání emisních faktorů základních plynných polutantů (CO, NO_x, SO₂) mezi jednotlivými režimy experimentů, formulace závěrů.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D. ústav energetiky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza spalování biomasy ve fluidní vrstvě ve vzduchovém a oxyfuel režimu“ vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze, dne 2. 6. 2023

.....

Vojtěch Tomašík

Anotační list

Jméno autora:	Vojtěch Tomašík
Název DP:	Analýza spalování biomasy ve fluidní vrstvě ve vzduchovém a oxyfuel režimu
Anglický název:	Analysis of fluidized bed combustion of biomass in air and oxyfuel modes
Akademický rok:	2022/2023
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí DP:	prof. Ing. Jan Hrdlička, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 67 Počet obrázků: 27 Počet tabulek: 44 Počet příloh: 2
Klíčová slova:	Spalování, oxid uhličitý, CCS technologie, oxyfuel, biomasa, fluidace
Keywords:	Combustion, carbon dioxide, CCS technologies, oxyfuel, biomass, fluidization
Anotace:	Práce se zabývá oxyfuel spalováním se zaměřením na fluidní vrstvu. Práce obsahuje rešerši na CCS technologie, primárně oxyfuel spalování. Na rešerši navazuje výpočetní model určený k porovnání vzduchového a oxyfuel spalování. V poslední části bylo provedeno experimentální měření obou spalovacím režimů.
Abstract:	This thesis deals with oxyfuel combustion focusing on fluidized bed. Part of the thesis is a literature research on CCS technologies, focusing on oxyfuel combustion. The second part of the thesis follows the stoichiometric calculations used to compare air and oxyfuel combustion. The last part is about experimental combustion in both modes.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Janu Hrdličkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracovávání této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	3
2	CCS technologie	5
2.1	Post-combustion	6
2.2	Pre-combustion	10
3	Oxyfuel spalování.....	14
3.1	Plynná paliva.....	16
3.2	Pevná paliva.....	17
3.3	Vznik polutantů	20
3.4	Pilotní projekty	21
3.5	Fluidace a fluidní spalování	22
4	Výpočet spalování ve vzduchovém a oxyfuel režimu	24
4.1	Stechiometrie	24
4.1.1	Vzduchové spalování.....	24
4.1.2	Oxyfuel spalování	28
4.1.3	Porovnání režimů	30
4.1.4	Vliv přebytku oxidantů na měrný objem spalin.....	32
4.1.5	Vliv přebytku oxidantů na složení spalin	33
4.1.6	Vliv přísátého vzduchu v oxyfuel režimu na obsah CO ₂ ve spalinách.....	36
4.2	Recirkulace spalin a adiabatická teplota plamene	37
4.3	Fluidační rychlosti.....	40
4.3.1	Vzduchové spalování.....	40
4.3.2	Oxyfuel spalování	41
4.3.3	Vypočtené hodnoty.....	41
5	Měření spalování ve vzduchovém a oxyfuel režimu	42
5.1	Metodika měření.....	44
5.2	Naměřené hodnoty	48
5.2.1	Tok paliva	48
5.2.2	Koncentrace kyslíku ve spalinách	48
5.2.3	Teploty fluidní vrstvy.....	48
5.2.4	Toky médií.....	50
5.2.5	Emise	52

5.3	Výsledky a diskuze	53
5.3.1	Porovnání stechiometrie s modelovými výpočty.....	59
5.3.2	Emise a emisní faktory	60
6	Závěr	62
7	Seznam obrázků.....	64
8	Zdroje.....	65
9	Seznam příloh	67

Seznam symbolů

A [m^2]	Plocha
Ar [-]	Archimedovo číslo
C_D [-]	Koeficient odporu
d [m]	Průměr
EF [kg/kg]	Emisní faktor
g [m/s^2]	Gravitační zrychlení
H [m]	Výška vrstvy
i [J/kg]	Měrná entalpie
I_{np} [J/kg]	Entalpie nechlazeného plamene
M [kg/mol]	Molární hmotnost
m [kg]	Hmotnost
\dot{m} [kg]	Hmotnostní tok
O [Nm^3/kg]	Měrný objem
p [Pa]	Tlak
Q [Nm^3/s]	Objemový tok
R [J/(kg·K)]	Plynová konstanta
r [-]	Recirkulační koeficient
Re [-]	Reynoldsovo číslo
t [°C]	Teplota
u [m/s]	Rychlost
V_m [Nm^3/mol]	Molární objem
Z [-]	Ztráta
α [-]	Přebytek okysličovadla
ε [-]	Mezerovitost
μ [Pa·s]	Dynamická viskozita
ρ [kg/m^3]	Hmotnostní koncentrace, hustota
ϕ [-]	Sféricita
φ [-]	Relativní vlhkost vzduchu
χ_v [-]	Podíl vodní páry ve vzduchu
ω [-]	Objemová koncentrace

Indexy

b	Fluidní vrstva
d	Suchý stav
daf	Suchý stav bez popela
g	Plyn
mf	Mezní fluidační
min	Minimum

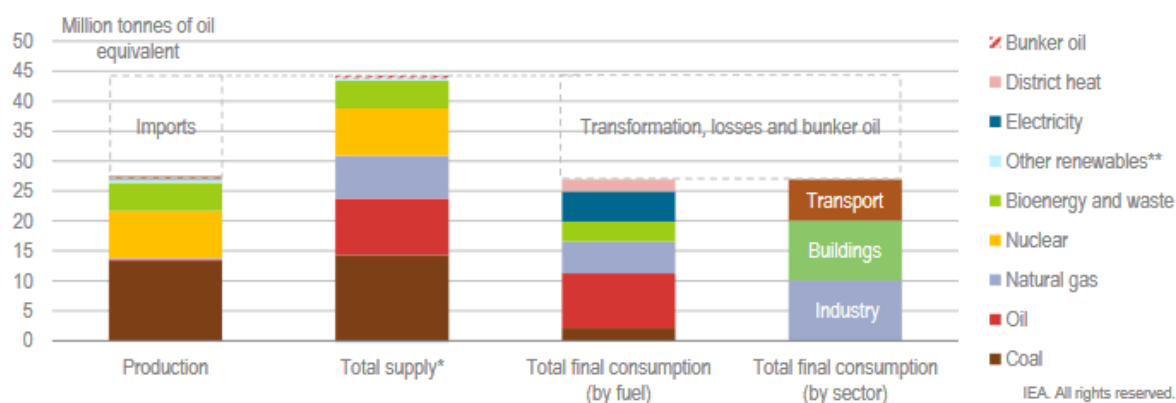
N	Nedokonalé spalování
Ox	Okysličovadlo, oxyfuel
p	Částice fluidní vrstvy, přisátý vzduch
pal	Palivo
r	Recirkulované, původní stav
S	Spaliny
SS	Suché spaliny
SV	Vlhké spaliny
t	Odpovídající teplotě t
V	Vzduch
VS	Suchý vzduch
VV	Vlhký vzduch
α	Odpovídající přebytku α

Zkratky

ASU	Air separation unit
CAP	Chilled ammonia process
CCS	Carbon capture and storage
CFB	Cirkulující fluidní vrstva
IEA	Mezinárodní agentura pro energii
ITMR	Ion transport membrane
PSA	Adsorpce kolísáním tlaku
TOC	Total organic carbon
TSA	Adsorpce kolísáním teploty
VSA	Adsorpce za střídavého vakua

1 Úvod

Fosilní paliva, primárně uhlí, jsou stále dominantním zdrojem pro výrobu elektřiny a tepla v České republice. V roce 2019 byla přibližně polovina domácí produkce energií z uhlí. Třetina konečné energetické spotřeby v témže roce připadla na uhlí, dále v mixu figuruje ropa s 22 %, jádro s 19 % a zemní plyn se 17 %. Více než třetina z této spotřeby připadá na průmysl, zhruba stejný podíl odpovídá obytným budovám a službám, zbylých 26 % pak tvoří doprava. Domácí produkce energie činila 27 Mtoe, z čehož polovina byla z uhlí, následovaná 29 % jaderné energie. V roce 2020 hodnota poklesla na nižších 24 Mtoe, primárně kvůli snížení produkce uhlí. [1]



Obrázek 1: Přehled produkce, dodávek a spotřeby energie v ČR v roce 2019 [1]

V roce 2019 emise skleníkových plynů dosahovaly množství 123 Mt CO₂eq, z toho největší podíl připadá na energetický sektor (76 %). Z těchto 94 Mt oxidu uhličitého vzniklo 51 % při výrobě elektřiny a tepla. [1]

Problematice produkce skleníkových plynů, hlavně CO₂, je v současnosti věnováno mnoho pozornosti. Slibně se mohou jevit metody CCS (carbon capture and storage), při kterých dochází k zachycování produkovaného oxidu uhličitého namísto vypouštění do atmosféry a jeho uskladnění, případně další využití v průmyslu. Toto zachycení se dělí na 3 hlavní skupiny technologií, podle fáze spalování, v které probíhá. Tyto 3 skupiny jsou post-combustion, pre-combustion a oxyfuel spalování. Jak se z označení nabízí, post-combustion technologie probíhají až po spalování. Spalování tedy proběhne běžným způsobem, za spalovací proces je pak zařazena další technologie, která ze spalin odděluje CO₂, který je odváděn, zpracován a uložen. Pre-combustion technologie nabízí odlišný přístup, kdy CO₂ je z paliva odstraňováno ještě před samotným procesem spalování. Samotný proces spalování pak již neprodukuje oxid uhličitý do spalin. Oxyfuel spalování pak nabízí ještě jiný pohled, kdy spalování jako okysličovadlo nevyužívá vzduch, ale kyslík, čímž dochází ke změně složení spalin. Ve spalinách se najednou nenachází vzdušný dusík a tak se ve spalinách teoreticky nachází pouze vodní pára a CO₂. Vodní páru lze zkapalnit snížením teploty, čímž dojde k separaci obou látek. Oxid uhličitý pak lze po dočištění odvádět.

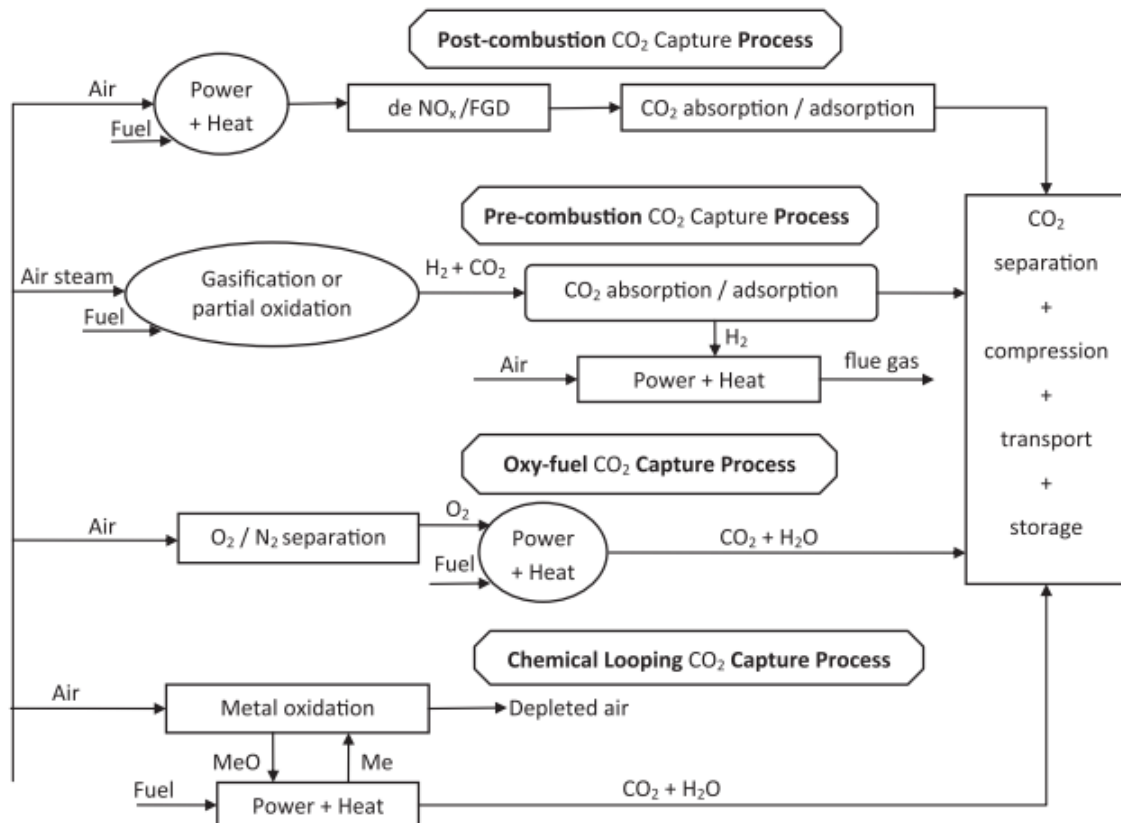
Cílem této práce je zpracovat analýzu spalování v oxyfuel režimu. V rešeršní části se zaměřím na CCS technologie, primárně na oxyfuel spalování. Na technologie a možnosti tohoto spalování, využití na spalování pevných i plyných paliv. Dále pak bude popsán vznik polutantů v tomto režimu. Bude popsána současná situace s existujícími pilotními projekty. Dále se pro výpočetní část bude kapitola rešerše věnovat fluidaci a fluidnímu spalování.

V další části práce bude s využitím literatury sestaven výpočetní model spalování ve vzduchovém i oxyfuel režimu, ve kterém bude poukázáno na odlišnosti těchto dvou spalovacích režimů. Bude zkoumán vliv přebytku na měrné objemy spalin a na složení těchto spalin. Také bude ukázán vliv množství přísátého vzduchu na složení spalin. Bude vypočtena míra potřebné recirkulace spalin, aby teplota nechlazeného plamene byla stejná s kyslíkem jako se vzduchem. Kromě toho bude ukázána odlišnost ve fluidačních podmínkách mezi oběma režimy.

V poslední části práce bude proveden experiment spalování dřevní biomasy ve fluidním kotli ve vzduchovém i oxyfuel režimu. Experiment bude pro oba režimy proveden pro různé stechiometrie okysličovadla. Naměřené hodnoty budou porovnávány s modelově vypočtenými. Z měřených koncentrací budou vypočteny emisní faktory vznikajících polutantů, které budou porovnány mezi jednotlivými experimenty.

2 CCS technologie

Předpokládá se, že emise oxidu uhličitého jsou spojené s problematikou klimatických změn, jelikož jde o hlavní faktor přispívající k těmto změnám. Zachytávání tohoto plynu ze spalin dříve, než bude vypuštěn do atmosféry, má dle zdroje [2] potenciál snížit emise CO_2 z energetiky o 20 %. Existují tři základní přístupy, jakými CO_2 ze spalování odebírat, rozdílem je, zda se opatření týkají primárně spalin, paliva či oksyličovadla. Tyto tři přístupy jsou záchyt ze spalin post-combustion, před spalováním (pre-combustion) a oxyfuel spalování. [3]



Obrázek 2: Varianty CCS technologií [4]

Obrázek 2 graficky znázorňuje typické varianty CCS technologií. Myšlenka oxyfuel spalování je ve využití velmi čistého kyslíku při spalování namísto vzduchu jako oksyličovadla, což má za následek vznik spalin o složení v podstatě jen z CO_2 a H_2O . CO_2 lze ze spalin následně oddělit kondenzací vody. Spalování metodou chemical looping je obdobou oxyfuel spalování. V tomto procesu je oxidačním činidlem pevná látka nesoucí kyslík (obecně MeO). [3] Oxyfuel spalování budou věnovány kapitoly dále, ve kterých bude podrobněji rozebráno, technologie post-combustion a pre-combustion budou představeny zde.

2.1 Post-combustion

Ze spalin lze CO₂ separovat přímo absorpcí, adsorpcí, přes membránu, popřípadě pomocí chemických reakcí. [5] Objemový podíl CO₂ ve spalinách se pohybuje okolo 12-14 % u uhelných elektráren a 3,2-4,2 % u elektráren spalujících zemní plyn. Výhodou je možnost dovybavení většiny existujících elektráren systémy ke zpracování spalin. Energetickou účinnost takový zásah může ovlivnit i 6-9% snížením. [3], [6]

Adsorpce

U adsorpce využívající změny teploty (Temperature Swing Adsorption, TSA) dochází střídavě k adsorpci a desorpci CO₂. TSA proces zahrnuje několik propojených nádob, které využívají pevného, pohyblivého či fluidního lože. [5] K hlavním požadavkům na adsorbent patří velký specifický povrch a dostatečně vysoká schopnost regenerace. Příkladem adsorbentu vhodného k zachycení CO₂ je aktivní uhlí, oxid hlinitý a zeolity (např. zeolitické molekulové síto 13X). [7] K adsorpci dochází při nižší teplotě, desorpce pak vyžaduje ohřátí. TSA nabízí výhody, mezi které patří malé ovlivnění procesu nečistotami (SO_x, H₂S, NO_x, vodní pára), tyto nečistoty jsou navíc oddělovány při teplotách okolo 160 °C. TSA systémy k provozu vyžadují relativně nízký tlak (<4 bar). Teplota potřebná k adsorpci se pohybuje v rozmezí 40-60 °C, vyšší teplota při desorpci 120-160 °C, postupně je tedy adsorpční kolona provozována za teploty 60 °C, aby došlo k efektivnímu zachycení CO₂, poté dojde k ohřátí na teplotu 120 °C k uvolnění CO₂ (pomocí horkého vzduchu, vodní páry), nakonec k ohřátí na teplotu 160 °C, aby se mohly uvolnit přítomné nečistoty. Vyšší operační teploty by sice mohly vést k větší čistotě produkovaného CO₂, jsou však spojeny se zvýšenou spotřebou energie. K ohřívání je zapotřebí velkých průtoků vzduchu kvůli jeho nízké tepelné kapacitě, což vede k ředění uvolňovaného CO₂. To lze omezit, pokud k zahřívání dochází pomocí vodní páry, ohřívání elektricky pak ředění CO₂ vylučuje úplně. Celkově je ohřívání a chlazení energeticky náročný proces, což logicky vede k růstu operačních nákladů. V elektrárnách, které obvykle disponují dostatečným množstvím využitelného tepla na nízké teplotní hladině, mohou být využitím tohoto tepla náklady spojené s ohříváním adsorbentu výrazně sníženy, nicméně v tuto chvíli tato metoda v průmyslovém měřítku nikde využívána není. [5]

U adsorpce za střídavého tlaku (Pressure Swing Adsorption, PSA) dochází k zachycení CO₂ na povrchu sorbentu za vysokého tlaku, uvolnění probíhá pak za tlaku nízkého. Princip vychází z molekulárních vlastností a afinity CO₂ a N₂ k pevným sorbentům (obvykle molekulární síta). Za vysokého tlaku je CO₂ adsorbován, kdežto N₂ zůstane volně. Když je sorbent nasycený oxidem uhličitým a dusík je oddělen může dojít za nízkého tlaku k regeneraci. Za nízkého tlaku se CO₂ uvolní a celý proces může začít nanovo. Kombinací PSA a TSA lze dosáhnout vyšší čistoty zachycovaného CO₂ (až 99 %). [5]

Adsorpce za střídavého vakua (Vacuum Swing Adsorption, VSA) je proces jednodušší než PSA. Adsorpce probíhá za atmosférického tlaku, desorpce pak pod vakuem. Vysoká účinnost desorpce ve vakuu umožňuje využití pouze jediné nádoby. Ze spalin lze získat CO₂ o koncentraci vyšší než 99 %. U VSA nedochází ke kondenzaci vodní páry, a to díky nízkým

provozním tlakům. Nízké tlaky mají příznivý vliv na životnost adsorbentu. Energetická spotřeba je rovněž nižší než u PSA, energetické nároky jsou až o 50 % menší než u nejjednodušších PSA systémů. PSA i VSA jsou na rozdíl od TSA velmi citlivé na přítomnost nečistot, proto spaliny před samotnou adsorpcí musí být zbaveny NO_x, SO_x a H₂O, což vede k růstu ceny. [5] K PSA a VSA je ještě variantou VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption). Adsorpce probíhá za zvýšeného tlaku (1,5 bar), desorpce pak za vakua. K dosažení požadované čistoty a zachytu CO₂ je proces VPSA dvoustupňový, v prvním stupni je zachyceno více než 95 % CO₂ o relativně nízké čistotě (40-60 %), v druhém stupni je pak CO₂ čištěn na koncentraci 95 %. [5], [8]

Karbonátová smyčka je adsorpcí na bázi chemické reakce. Jde o velmi účinný proces (více než 90 % účinnost zachytu CO₂) využívající vápence jako sorbentu. Proces probíhá podle reverzibilní reakce 5.7 mezi uhličitánem vápenatým a oxidem vápenatým v rozsahu teplot 650 a 900 °C. Systém pracuje na principu duální cirkulující fluidní vrstvy. Proces je řízen jako kontinuální smyčka mezi dvěma fluidními reaktory, v karbonátoru dochází k zachytu CO₂ při teplotě okolo 650 °C, v regenerátoru pak ke kalcinaci sorbentu při teplotě okolo 900 °C. [9]



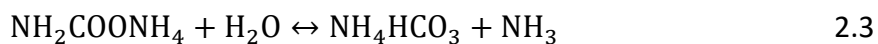
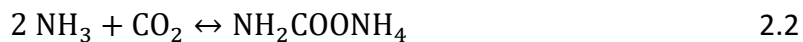
Absorpce

Absorpce také využívá fyzikálních (fysisorpce) či chemických principů (chemisorpce) k zachycení CO₂ ze spalin do kapalného rozpouštědla. Látka, v níž je CO₂ rozpuštěno, je při požadované teplotě a přibližně atmosférickém tlaku oddělena od CO₂ a navrácena do absorpční kolony. Získaný CO₂ dosahuje po tomto oddělení koncentrací až 99 %. Za předpokladu využití odpovídajícího rozpouštědla mohou být pomocí absorpce zpracovány spaliny i s koncentrací CO₂ okolo 20 %. Absorpční procesy se liší použitým druhem adsorbentu (může jít o aminoalkoholy, vodný roztok čpavku, alkálie – např. K₂CO₃, uhličitán sodný či kapalný amoniak). [5]

Aminoalkoholy jsou deriváty amoniaku, jejichž alespoň jeden atom vodíku je nahrazen funkční skupinou alkoholu (např. ethanol). K zachycování CO₂ se nejčastěji uvažuje ethanolamin (MEA), dále pak diglykolamin (DGA), diethanolamin (DEA), diisopropanolamin (DIPA), methylethanolamin (MMEA), triethanolamin (TEA) a dimethylethanolamin (DMMEA). Reakce aminoalkoholů s CO₂ je reversibilní, jelikož vzniklá vazba rychle zaniká ohřátím kapaliny. Ethanolamin bývá považován za vhodný na okamžité průmyslové aplikace k oddělení CO₂ a H₂S. Nicméně MEA vypírka je spojena s vysokou spotřebou energie (uvádí se snížení účinnosti 25-28 %, u retrofitu do již existující elektrárny i více). MEA je rovněž velmi korozivní, korozivnější než ostatní zmiňované aminoalkoholy. Nevratné reakce mezi kyslíkem ve spalinách a roztokem aminoalkoholu vedou k degradaci adsorbentu. [5]

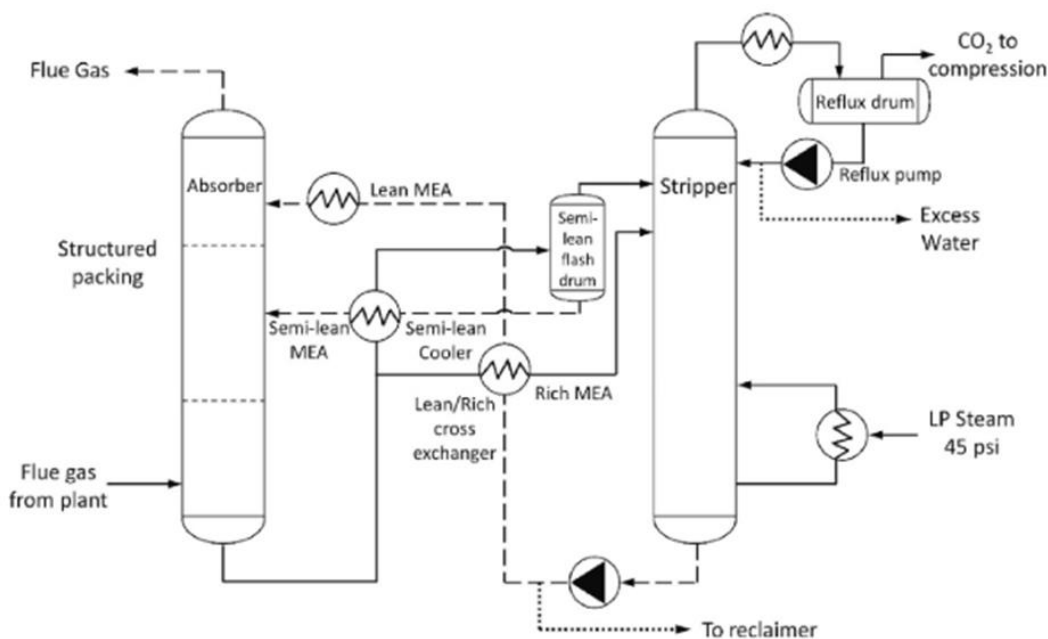
Vodný roztok amoniaku vypadá jako možná alternativa k MEA a aminoalkoholům, jejichž velkou výhodou je relativně nízká cena i komerční dostupnost. Má méně korozivní vlastnosti a nepodléhá tak výrazné degradaci jako MEA. Při reakci oxidu uhličitého s amoniakem vzniká

karbamát, hydrogenuhličitan amonný a uhličitan amonný, jak popisují rovnice 2.2–2.4. Amoniak je velmi volatilní, proto reakce absorpce probíhá při nízké teplotě (15–27 °C). CO₂ je pak odděleno ohřátím roztoku na teplotu v rozmezí 27–92 °C. Uhličitan a hydrogenuhličitan amonný při této zvýšené teplotě uvolní zachycený oxid uhličitý, přičemž dojde k obnovení původního rozpouštědla. Vznik hydrogenuhličitanu je více žádoucí, protože k jeho rozložení stačí méně tepla než pro rozklad uhličitanu amonného. [5]



Účinnost záchytu CO₂ exponenciálně roste s mírným zvyšováním koncentrace amoniaku v roztoku, maximální dosažitelná účinnost je 99 %. Pro vysoké koncentrace účinnost opět klesá, jelikož dochází ke snižování účinnosti absorpce. Amoniak reaguje i s nečistotami NO₂ a SO₂, za vzniku dusičnanu amonného a síranu amonného. (Tyto látky a také samotný uhličitan amonný bývají využívány jako hnojiva, je tedy možné produkty takovéto absorpce přímo odebírat a šetřit část energie potřebnou k regeneraci NH₃, kompresi a skladování CO₂.) V porovnání s jinými absorpčními procesy nabízí amoniak vysokou absorpční kapacitu CO₂ (1,2 kg CO₂/kg NH₃). Nevýhodou jsou ztráty NH₃ jeho odpařováním. [5]

Při procesu s chlazeným amoniakem (chilled ammonia process, CAP) dochází k absorpci za nízkých teplot (0–20 °C, ideálně při teplotě nižší než 10 °C). Nízká teplota redukuje koncentrace vlhkosti, kyselých a volatilních složek. Při CAP dochází k nízkým ztrátám NH₃ (méně než 6 %), nižším než v případě využití vodného roztoku amoniaku bez dochlazování (cca 9 %). Nízké teploty při absorpci i desorpci vedou k nižší energetické náročnosti i degradaci absorbentu. Uvádí se o 50 % menší spotřeba energie v porovnání s MEA procesem. [5]



Obrázek 3: Procesní schéma zachycování CO₂ ze spalin pomocí absorpce [5]

Chemická absorpce s aminoalkoholy je v současnosti nejvyspělejší technologií zachycování CO₂, která již nějakou dobu patří ke komerčně dostupným (Kerr-McGee/AGG Lummus Crest process – KMALC, Fluor Econamine FG Plus process – EFG+, Kansai Mitsubishi Carbon Di-oxide Recovery process – KM-CDR). Než dojde k samotné absorpci, další látky jako SO₂ a NO₂ by měly být ze spalin odstraněny, aby se zabránilo vzniku tepelně stabilních vedlejších produktů. Kromě vysoké energetické náročnosti je problémem degradace spojená s vysokou teplotou a koroze. Co se záchytu CO₂ týče, nabízí dosud MEA nejlepší výsledky. Výzkum však ukazuje, že smíšením MEA s dalšími rozpouštědly lze dosáhnout lepší kinetiky i absorpce většího množství. [5]

Membrány

Relativně novým přístupem je separace pomocí membrány. Směs plynů prochází membránou, přičemž složky této směsi jsou selektivně separovány. Membrána tvoří polopropustnou bariéru, která pomocí difuze odděluje molekuly ze směsi, jelikož je pro některé z nich více propustná než pro jiné. Volba materiálu membrány je pro proces separace velmi důležitá, má totiž zásadní vliv na proveditelnost tohoto procesu. Materiálem může být organická (polymerní) sloučenina, anorganická (uhlík, zeolity, keramika) nebo směs obojího. Různé membrány mají svá pro a proti co se životnosti, ceny i schopnosti zachycovat CO₂ týče. Jejich schopnost zachycovat CO₂ se posuzuje podle jejich propustnosti a selektivity, které závisejí nejen na materiálu, ale i na podmínkách provozu (teplota, tlak, koncentrace CO₂). Propustnost membrány udává měrný objemový průtok daného plynu vztahený na plochu membrány. Selektivita pak kvantitativně určuje relativní prostup jednoho plynu membránou oproti plynům ostatním. [5]

Běžnými materiály pro polymerní membrány jsou acetátová vlákna (CA), polysulfon (PSf), polyethersulfon (PES) a polyimid (PI). Polyimidy nabízejí nejlepší výkon, dobrou teplotně-mechanickou a chemickou stálost a různou propustnost pro CO₂. [5]

V porovnání s polymerními membránami disponují anorganické membrány lepší selektivitou, nižší propustností pro CO₂, ale mnohem lepší chemickou a tepelnou stálostí. Anorganické membrány existují porézní a neporézní. Neporézní se vyznačují dobrou selektivitou molekul plynu. Komplikovanost produkce anorganických membrán s velkou plochou bez vad znamená vysokou cenu této produkce. [5]

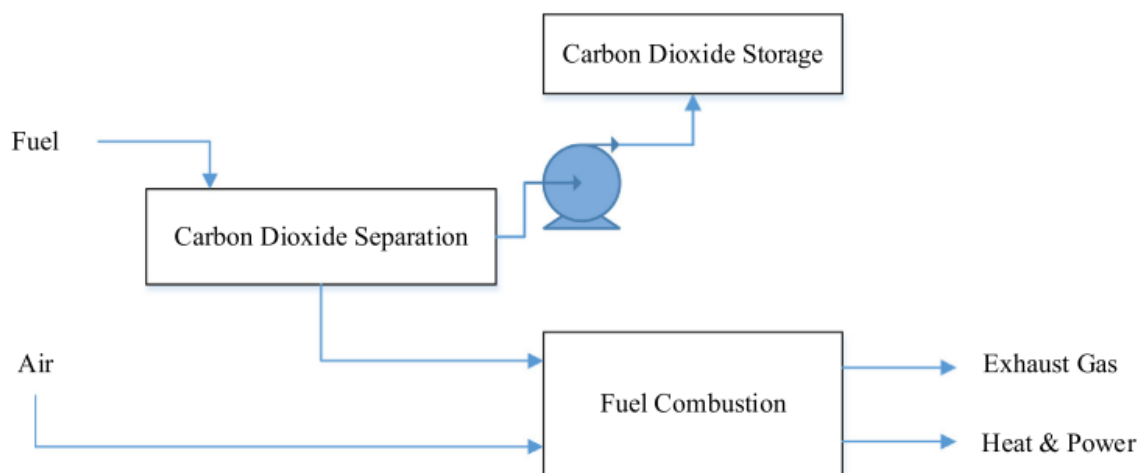
Variantou je kombinace polymerních a anorganických materiálů, kdy na polymerní matici jsou přidány porézní anorganické mikro nebo nanočástice. Tato kombinace vylepšuje fyzikální, tepelné i mechanické vlastnosti a zvyšuje hydrofobii polymerního materiálu. Nicméně výsledný materiál je drahý a křehký, v současné době také není komerčně dostupný. [5]

Záchyt pomocí membrán je jednoduchý a nevyžaduje další chemikálie nebo jejich regeneraci. Nejčastěji uvažované jsou membrány polymerní, popřípadě jejich hybridní

varianty, pro jejich dobrou selektivitu, zpracovatelnost a relativně nízkou cenu. Nicméně jde o postup separace, který je stále v počátečních fázích vývoje a výzkumu. [5]

2.2 Pre-combustion

Při pre-combustion dochází k odebrání oxidu uhličitého z paliva (fosilního nebo biomasy) ještě předtím, než dojde k jeho spálení. Zjednodušené schematické zobrazení procesu je na obrázku 4. Typicky bývá tento způsob záchytu CO₂ spojen se zplyněním původně pevného paliva. [10]

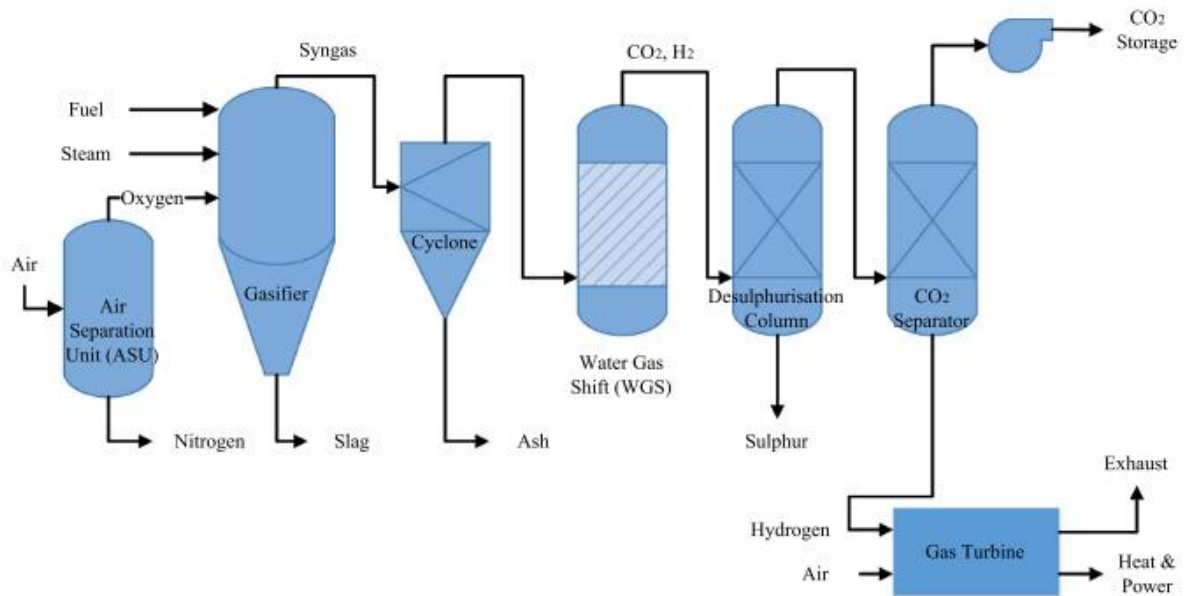


Obrázek 4: Schématické zobrazení pre-combustion CCS [10]

Proces pre-combustion záchytu CO₂ při používání pevného paliva začíná jeho zplyněním (parciální oxidací), přičemž dochází ke vzniku syntézního plynu (syngas), který se skládá z oxidu uhelnatého a vodíku. Zplyňovacím médiem při procesu zplynění je směs vodní páry a kyslíku. Tuhé částice obsažené v plynu jsou odstraněny cyklonem. Syntézní plyn následně projde konverzí vodního plynu (water-gas shift reaction), při které dochází k reakci oxidu uhelnatého s vodní parou za vzniku oxidu uhličitého a vodíku, jak popisuje rovnice 2.5. [10]



Produkt následně prochází odsířením a oddělením CO₂. Pre-combustion tedy generuje plynný vodík jako palivo, které lze využít k výrobě energie (plynový kotel, plynová turbína, palivový článek) s minimálním množstvím vedlejšího produktu SO₂. Procesní diagram je na obrázku 5. V případě elektrárny spalující zemní plyn není CO₂ získáván popsáním procesem zplyňování, ale parním reformingem tohoto plynu a následnou konverzí vodního plynu. [10]



Obrázek 5: Procesní diagram pre-combustion CCS u IGCC [10]

Pre-combustion separace bývá spojena s vyšší koncentrací CO_2 (15-60 % objemu), zvýšeným tlakem (2-7 MPa) a teplotou plynu 200-400 °C. [10]

Typickými technologiemi pro separaci CO_2 při pre-combustion jsou fyzikální absorpce, adsorpce, separace pomocí membrány a kryogenní separace.

Fyzikální absorpce

Fyzikální absorpce (fysisorpce) zahrnuje 2 části, samotnou absorpci a proces oddělení absorbované látky. V první z nich dochází k protiproudému kontaktu mezi plynem a proudem absorbentu, při kterém dochází k fyzickému zachycení CO_2 v proudě. V druhém procesu je látka nasycená oxidem uhličitým zahřívána, aby došlo k její regeneraci a uvolnění oxidu uhličitého, regenerovaný absorbent se vrací zpět do absorpční kolony a proces probíhá znovu. [10]

Obecně lze říct, že vysoký tlak a nízká teplota jsou vhodné pro fyzikální absorpci, nízký tlak a vysoká teplota pro desorpci. Míra absorpce odpovídá Henryho zákonu. Fyzikální absorpce je optimální při vysokém tlaku a nízké teplotě, nízký tlak a vysoká teplota pak odpovídá desorpci. Kapacita absorbentu je tedy závislá na teplotě a optimální bude při nízkých hodnotách, je tedy obvykle nutné výrazně chladit na poměrně nízké teploty, což bude mít negativní dopad na celkovou účinnost. Chemické látky vhodné pro tuto absorpci jsou methanol (Rectisol Process, operační podmínky: tlak 3,6 MPa a teplota -25 °C), DMPEG (Selexol Process, podmínky: tlak 3,59 MPa a teplota 35 °C), methylpyrrolidon (Purisol Process, podmínky: tlak 6,8 MPa a teplota -15—0 °C), morfolin (Morphysorb Process, podmínky: tlak 6,9 MPa, teplota 50 °C) a propylenkarbonát (Fluor Process, podmínky: tlak 2,72—5,78 MPa a teplota 25 °C). [10]

Adsorpce

Procesy využívané k adsorpci jsou obdobné jako u post-combustion (TSA a PSA). U procesu využívajícím změnu teploty dojde k ohřátí nasyceného adsorbentu pomocí horkého vzduchu či vodní páry na teplotu, při které je narušena vazba mezi CO₂ a adsorbentem a dojde k uvolnění CO₂. U procesu se změnou tlaku je stejného efektu dosaženo snížením tlaku. První varianta je preferována v situaci, kdy je koncentrace oxidu uhličitého relativně nízká, druhá v situaci, kdy je parciální tlak CO₂ vysoký. Regenerace adsorbentu není u PSA tak časově náročná jako u TSA. Běžné fyzikální adsorbenty zahrnují aktivní uhlí, zeolity, molekulární síta, křemičité membrány a MOF (metal-organic framework), typickým chemickým adsorbentem je pak oxid vápenatý. [10]

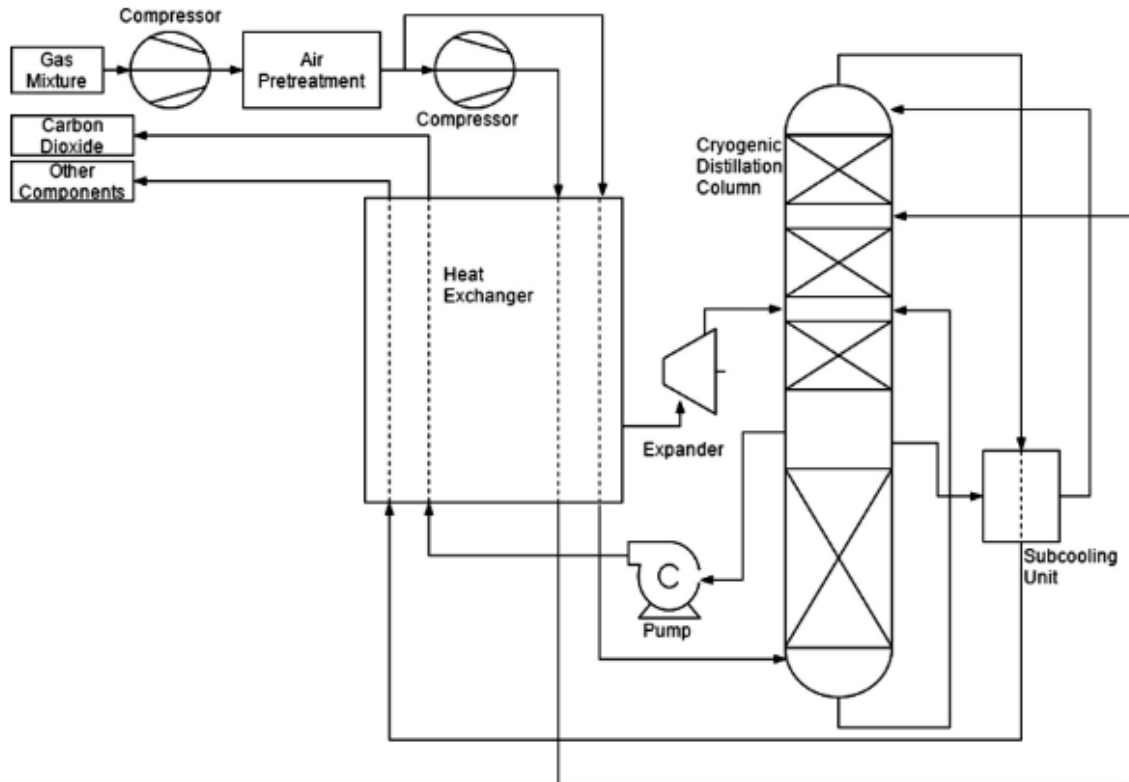
Membrány

Separace pomocí membrán u pre-combustion využívá obdobných principů jako v případě post-combustion. V případě difuze oxid uhličitý difunduje membránou v míře, která odpovídá gradientu parciálních tlaků na obou stranách membrány. Využití separace membránou se jeví výhodnější při zachytu CO₂ před spalováním nebo při jeho oddělování ze zemního plynu, jelikož při těchto procesech bude parciální tlak oxidu uhličitého výrazně vyšší než v případě post-combustion, které je energeticky nevýhodnější, protože je spojeno s prací potřebnou ke stlačení plynu k dosažení požadované míry zachytu CO₂ (carbon capture ratio). [10]

Kryogenická separace

Tento postup zahrnuje sérii chladících a kompresních operací při teplotě nižší, než je teplota okolí, a za vysokého tlaku (je však možné proces provádět i za atmosférického tlaku). Technologie produkuje velmi čistý kapalný oxid uhličitý a lze ji využít pro pre-combustion proces s velkou koncentrací CO₂. Produkce již kapalného CO₂ nabízí ideální podmínky pro jeho následnou přepravu. [10]

Jde o vyspělou technologii, je však spojena s jistými omezeními. Z důvodu průběhu za velmi nízké teploty (a případně i vysokého tlaku) jde o energeticky velmi náročný proces, uvádí se 6-10 MJ/kg_{CO2} (porovnání s ostatními technologiemi nabízí Tabulka 1), a tedy i provozní náklady jsou vysoké. Vlhkost navíc může vést ke vzniku hydrátu, který může zamezit průchodu potrubími a vést k výrazné tlakové ztrátě i bezpečnostnímu riziku. Proto musí být obsah vody před procesem separace odstraněn, což je další operace vedoucí k navýšení nákladů na provoz. Vznikající led by se navíc mohl akumulovat na teplosměnných plochách výměníku tepla a snižovat tak jeho účinnost. [10] Typické schéma kryogenické separace je na obrázku 6.



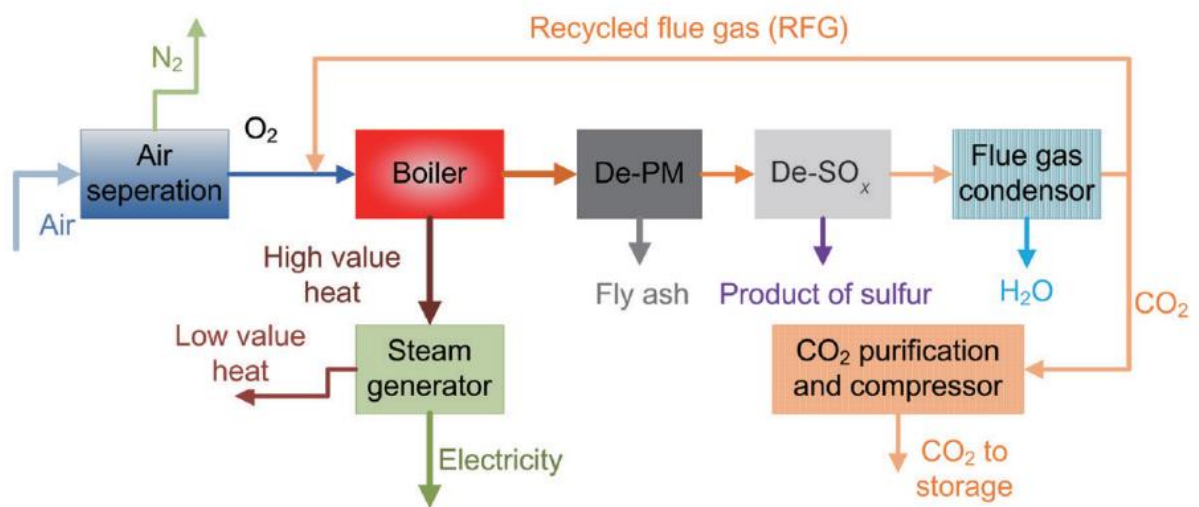
Obrázek 6: Schéma jednotky kryogenické separace [10]

Tabulka 1: Energetická náročnost technologií separace CO₂ [10]

	Fyzikální absorpce	Adsorpce	Membránová technologie	Kryogenická separace
Energetická náročnost [MJ/kg _{CO2}]	4,0-6,0	2,0-3,0	0,5-6,0	6,0-10,0

3 Oxyfuel spalování

Běžně se při spalování využívá jako okysličovadla vzduchu, ten se skládá přibližně ze 79 % objemu z dusíku a jen z 21 % z kyslíku. Daných 79 % dusíku nemá na spalování přímo vliv a jedná se o balastní složku, která následně kotel opouští víceméně nezměněná se spalinami. Variantou je oxyfuel spalování. Při něm vypadává tento obsah dusíku, jako okysličovadlo je totiž využíván pouze čistý kyslík. Teoreticky by spalováním uhlovodíkového paliva s kyslíkem měla produktem být směs CO_2 a H_2O . Nicméně malé množství dalších látek se ve spalinách obvykle vyskytuje, ať už jde přímo o nečistoty v použitém palivu, produkty jejich oxidace, nečistoty v dodávaném kyslíku, nebo o produkty nedokonalého zoxidování paliva. V praxi bude třetí nejvýznamnější složkou v proudu spalin přebytek kyslíku nevyužitý ke spalování. [11], [12]



Obrázek 7: Schématický diagram oxyfuel spalování [13]

Oxyfuel spalování lze využít u konvenčních systémů s jistými modifikacemi. Nepřítomnost dusíku vede ke změnám charakteristik spalování oproti spalování se vzduchem. Spalování paliva v prostředí čistého kyslíku vede k nárůstu teploty spalování. Z tohoto důvodu musí být značná část spalin (CO_2 , H_2O) recirkulována do spalovací komory. Recirkulovaný proud vstupuje do kotle spolu s kyslíkem a slouží ke korigování teplot spalovacího procesu a v případě fluidního spalování také k udržení dostatečného průtoku spalovací komorou. Aby nedocházelo k akumulaci SO_2 způsobené recirkulací spalin, recirkulace by primárně měla vycházet až z odsířeného proudu spalin (hlavně v případě uhlí s vyšším obsahem síry), čímž dojde ke snížení nebezpečí koroze způsobené touto akumulací. Zatímco ve vzduchovém režimu se koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách pohybuje okolo 15 %, v případě oxyfuel může tato koncentrace dosahovat i hodnoty 90 % suchých spalin. Oproti tomu dusík, který v případě vzduchu v suchých spalinách tvoří nějakých 80 %, bude v oxyfuel režimu silně potlačen, jelikož jeho primárním zdrojem je spalovací vzduch. Vznik oxidů síry je v oxyfuel režimu stejně jako se vzduchem závislý na obsahu síry v palivu. Vznik oxidů dusíku termickým a promptním mechanismem z dusíku ve spalovacím vzduchu je v principu vyloučen a jejich

vznik je tak možný jen z dusíku v palivu. Pro separaci a zpracování separovaného oxidu uhličitého je dále zapotřebí k tomu určených zařízení. Způsoby čištění spalin, odebírání pevných částic a oxidů síry mohou být pro oxyfuel spalování stejné jako v případě spalování se vzduchem (elektrostatické odlučování, selektivní katalytická redukce, odsíření FGD). Oxyfuel spalování lze retrofitem doplnit do stávajících systémů. [12]

Obrázek 7 zobrazuje jednoduché procesní schéma oxyfuel spalování. Ze vzduchu dochází k oddělování kyslíku, který je dodáván do kotle. Proud spalin je nejprve očištěn od pevných částic, následně je odsířen. Poté kondenzací vodní páry dojde k jejímu oddělení od oxidu uhličitého. Část oxidu uhličitého je recirkulována zpět do kotle. K recirkulaci může docházet buď před kondenzací, nebo až za ní, v závislosti na tom, kdy k ní dochází, je metoda recirkulace mokrá či suchá. Po odstranění vodní páry a nečistot může být čistý CO₂ stlačen a skladován. [13]

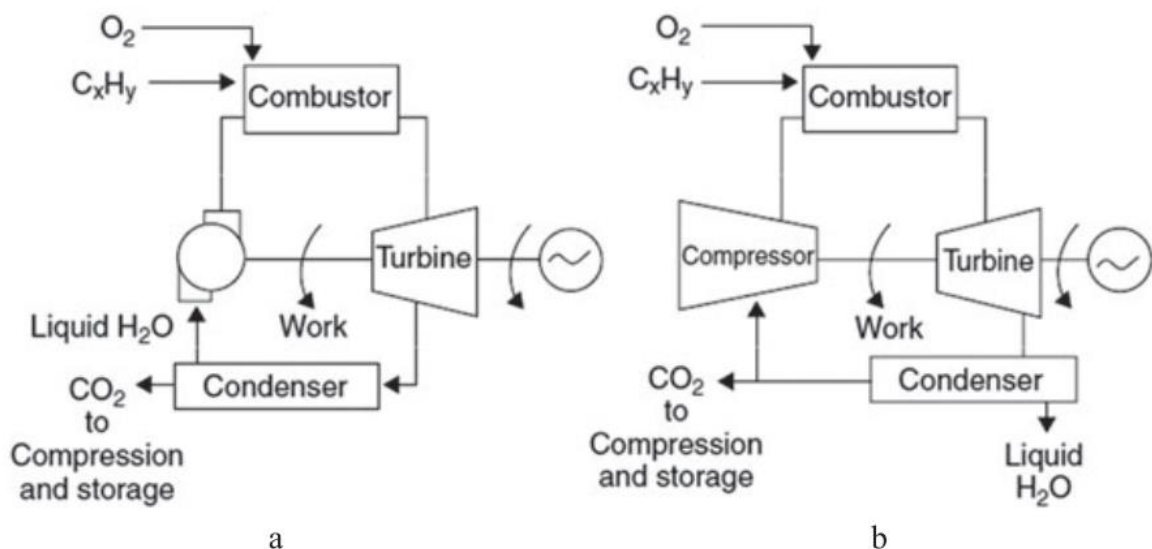
Kyslík k oxyfuel spalování je třeba nejprve vyrobit, aby mohl být do systému dodáván. Běžným způsobem získávání kyslíku v průmyslu je využití jednotky na separaci kyslíku ze vzduchu (Air Separation Unit, ASU). Tento postup nicméně typicky vyžaduje dodatečnou energii potřebnou k separaci. Typická je separace kryogenickou destilací, kdy je vzduch nejprve ochlazen na teplotu, při které dojde k jeho zkapalnění. Na základě rozdílné teploty varu dílčích složek jsou pak čisté plyny postupně oddestilovány z původní směsi. [12]

Alternativou ke kryogenické separaci je využití Ion Transport Membrane reaktoru (ITMR). Tento koncept využívá speciální keramické membrány, která je propustná pro kyslík. Ionty propouštějící membrána v ITMR odděluje kyslík ze vzduchu, který je na jedné straně membrány. V některých případech pak kyslík na druhé straně přímo může okysličovat hořící palivo za přítomnosti recirkulovaného obsahu CO₂. V takovém případě oba procesy, separace kyslíku i spalování, probíhají současně v jedné jednotce. ITMR tím pádem umožňuje kompaktnější design. [12], [14] Nicméně je využití těchto membrán spojeno s jistými provozními omezeními, které je třeba řešit. Jejich provoz probíhá při relativně vysoké teplotě (1000 K a více) a závisí na rozdílu chemického potenciálu O₂, který uskutečňuje separační proces. Membrány jsou obvykle kombinací anorganických sloučenin se specifickou krystalickou mřížkou (perovskit, fluorit). [14]

Využití kryogenické ASU pro úpravu již stojícího systému na oxyfuel režim znamená spotřebu části produkované energie na energeticky náročnou produkci kyslíku, a tedy snížení celkové účinnosti, uvádí se, že i 15 % generované energie může být spotřebováno na výrobu kyslíku. [12] Pro výrobu kyslíku v ITMR je postačující část tepla uvolňovaného při spalování k tomu, aby byla udržována potřebná teplota, při které je membrána pro kyslík propustná, další energii dodávat netřeba. [12] Jednotky separující vzduch kryogenickou destilací jsou nevhodnější pro velké kotle na uhlí, které vyžadují velké množství čistého kyslíku. Kryogenická separace spotřebuje okolo 0,24 kWh/kg_{O₂} na kyslík o čistotě 95 %. Požadovaná čistota pro oxyfuel spalování se pohybuje okolo 85-98 %. [12]

3.1 Plynná paliva

Část spalin musí být recirkulována ke zředění kyslíku za účelem korigování teploty spalování. Konfigurace se bude lišit podle toho, jakou složkou spalin bude toto ředění realizováno. Do spalovací turbíny se může recirkulovat voda nebo oxid uhličitý. Obrázek 8 zobrazuje 2 varianty schématu spalování plynného paliva, přičemž na obrázku 8a je schéma, ve kterém dochází ke spalování čistého uhlovodíku s kyslíkem za vysokého tlaku. Vodní pára je recirkulována a má za úkol snižovat maximální teplotu spalování. Tato recirkulovaná pára a pára vznikající při spalování paliva expanduje v turbíně spolu s produkovaným CO_2 , na výstupu z turbíny jsou oba plyny ochlazeny, čímž dojde k oddělení H_2O od CO_2 kondenzací páry. Voda je pak opětovně recirkulována a oxid uhličitý stlačen ke skladování. U obrázku 8b dochází ke spalování uhlovodíku s kyslíkem také za vysokého tlaku. Nicméně recirkulován ke snižování teploty je oxid uhličitý, nikoli voda. Produkty spalování expandují v turbíně za generování energie. Separace následně probíhá zchlazením spalin, voda kondenzuje a je odebírána. Spalovacím procesem produkovaný CO_2 je odebírán, stlačen a skladován, zbytek je recirkulován. [12]



Obrázek 8: Schéma oxyfuel spalování s recirkulací H_2O (a) a recirkulací CO_2 (b) [12]

Spalovací turbína pro oxyfuel spalování pracuje lehce odlišně než při spalování se vzduchem. Směs kyslíku a oxidu uhličitého, jež zde funguje jako okysličovadlo, má odlišné vlastnosti v porovnání se vzduchem, což mění dynamiku a kinetiku spalovacího procesu. K dosažení podobné teploty je zapotřebí větší koncentrace kyslíku ve směsi O_2/CO_2 , než je koncentrace O_2 ve vzduchu ([12] uvádí 27 % objemu kyslíku pro oxyfuel, oproti 21 % ve vzduchu). Takže je třeba více kyslíku v okysličovadle k tomu, aby plamen byl stabilní za teploty odpovídající spalování se vzduchem. Existuje rovněž nemalý rozsah podílu recirkulovaných spalin, při kterém je dosahováno srovnatelného konvektivního přenosu tepla ve srovnání se spalováním se vzduchem. K retrofitu do existujících systémů je třeba nastavit poměr dodávaného kyslíku a recirkulovaného oxidu uhličitého tak, aby byl zachován přenos tepla a

stabilita plamene. Stejné nároky musí být brány v potaz i v případě návrhu nové elektrárny. [12], [15]

Aby bylo předejito případným problémům s přílišným nárůstem teploty hoření při využití oxyfuel spalování v plynových turbínách je třeba promíchání reaktantů před vstupem do spalovacího prostoru. Tímto směrem se rovněž ubírá výzkum. Využití takto předmíchané směsi v plynových turbínách ovšem komplikuje stabilita plamene, respektive jeho nestabilita. [12] Autoři [16] zkoušeli experimentálně zjistit optimální poměr kyslíku a paliva (methanu) k získání stabilního plamene, nicméně dospěli k závěru, že spalování se vzduchem nabízí nejlepší rozsah stability v porovnání se všemi zkoumanými poměry. Nejlepší rozsah stability (79-82 % spalování se vzduchem) získali při 36 % obsahu kyslíku ve směsi.

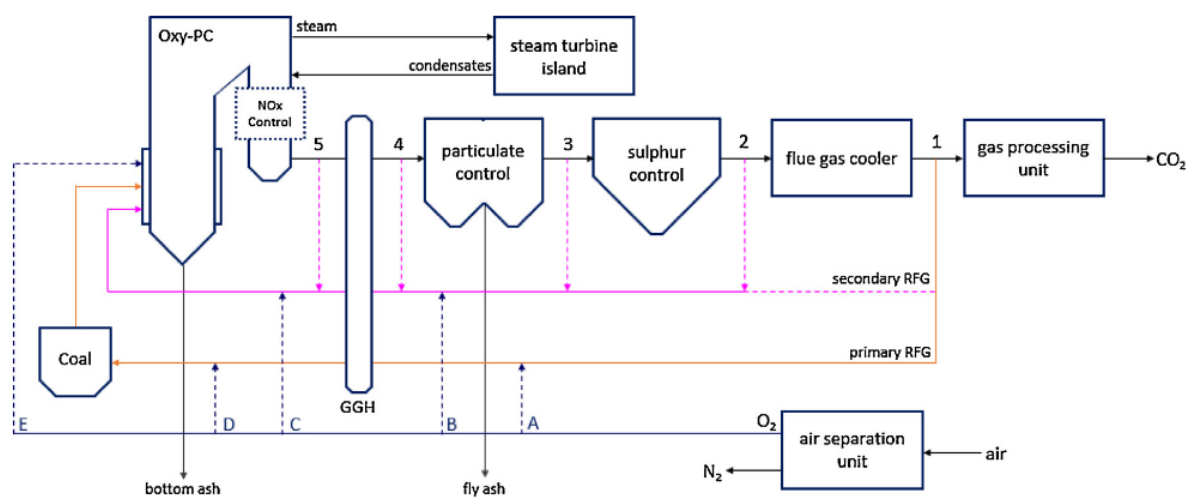
3.2 Pevná paliva

Dominantní postavení má mezi pevnými palivy uhlí a i přes postupný odklon od fosilních paliv je v blízké budoucnosti stále pravděpodobná výroba části energie v uhelných elektrárnách. V roce 2020 bylo v rámci Evropské unie jen na výrobu elektřiny a tepla dodáno 72 milionů tun černého a 226 milionů tun hnědého uhlí. [17] Nízká cena a relativně hojné zásoby z uhlí dělají palivo, které, ač je fosilní, se stále v nejbližší budoucnosti k výrobě elektřiny nejspíš do nějaké míry využívat bude. [12]

Na demonstrační jednotce o výkonu 0,5 MW_{th} spalující hnědé uhlí Kaß et al. [18] pozorovali vliv složení oxidantů na průběh spalování. Výsledky ukazují, že složení ovlivňuje čas a rychlost spalování. Rychlost spalování se v případě oxyfuel výrazně odlišuje od spalování se vzduchem. Při spalování při teplotě vyšší než 1100 K i přes stejnou koncentraci O₂ vede nahrazení vzdušného dusíku oxidem uhličitým ke značnému snížení doby hoření. [12]

Hodně pozornosti se dostává oxyfuel spalování v práškových kotlích z důvodu jejich dominantního postavení v energetickém sektoru. Hlavním způsobem řízení oxyfuel spalování je, jak se kyslík a recirkulované spaliny dostávají do spalovací komory. Obrázek 9 znázorňuje různé možnosti rozložení s naznačením možných umístění proudů vzduchu a recirkulace spalin. Důležitou roli hraje snaha snížit spotřebu kyslíku a zároveň snaha o udržení dokonalého spalování bez zvyšování obsahu CO a nespáleného uhlíku v popelu, to může být do jisté míry korigováno tím, jak kyslík a spaliny zavedeme do kotle. Možné způsoby zahrnují dodávání kyslíku již předem smíchaného s recirkulovanými spalinami nebo dodávání čistého kyslíku přímo k hořáku. Distribuce kyslíku na vstupu do spalovací komory také silně ovlivňuje produkci oxidů dusíku. V které fázi jsou spaliny odebírány pro recirkulaci, se volí podle obsahu síry a vody v palivu a podle obsahu oxidů síry a vodní páry ve spalinách. Množství oxidů síry, které mohou zůstat v recirkulovaných spalinách, budou limitována tak, aby například v potrubí kotle nedocházelo k problémům. Optimální konfigurace bere v potaz jak obsah síry/SO_x, tak i nejvyšší dosažitelnou účinnost. Suché spaliny při spalování uhlí se z 80-90 % skládají z CO₂. [12], [13], [19]

Udržení stabilního plamene při stejných podmínkách je v oxyfuel spalování komplikovanější z důvodu nižší teploty plamene, pomalejšího šíření plamene a zpomaleného zapalování částic uhlí v prostředí o vyšším obsahu CO_2 . Toto je dáno vlastnostmi oxidu uhličitého, který má větší tepelnou kapacitu než dusík ve vzduchu, vyšší hustotu. Difuze kyslíku v CO_2 je nižší než v N_2 . Vysoké koncentrace oxidu uhličitého a páry znamenají vyšší míru radiace. [20] V návrhu oxyfuel systému je tedy klíčové dodat plamenu dostatečné množství kyslíku, aby bylo dosaženo správné aerodynamické stability. [13], [19] Chen et al. [15] ukázali na experimentu se spalováním uhlí, že plamen při oxyfuel spalování s optimálním obsahem kyslíku v okysličovadle může dosahovat velmi podobné distribuce teplot plamene jako konvenční systém spalující uhlí se vzduchem. Bylo pozorováno, že vznícení částic, adiabatická teplota plamene a devolatilizace ve směsi O_2 a CO_2 s 30 % (obj.) kyslíku jsou velmi podobné situaci v prostředí vzduchu. Vznícení a stabilita plamene jsou výrazně závislé na obsahu kyslíku a jsou citlivé na změny objemového toku. [12]



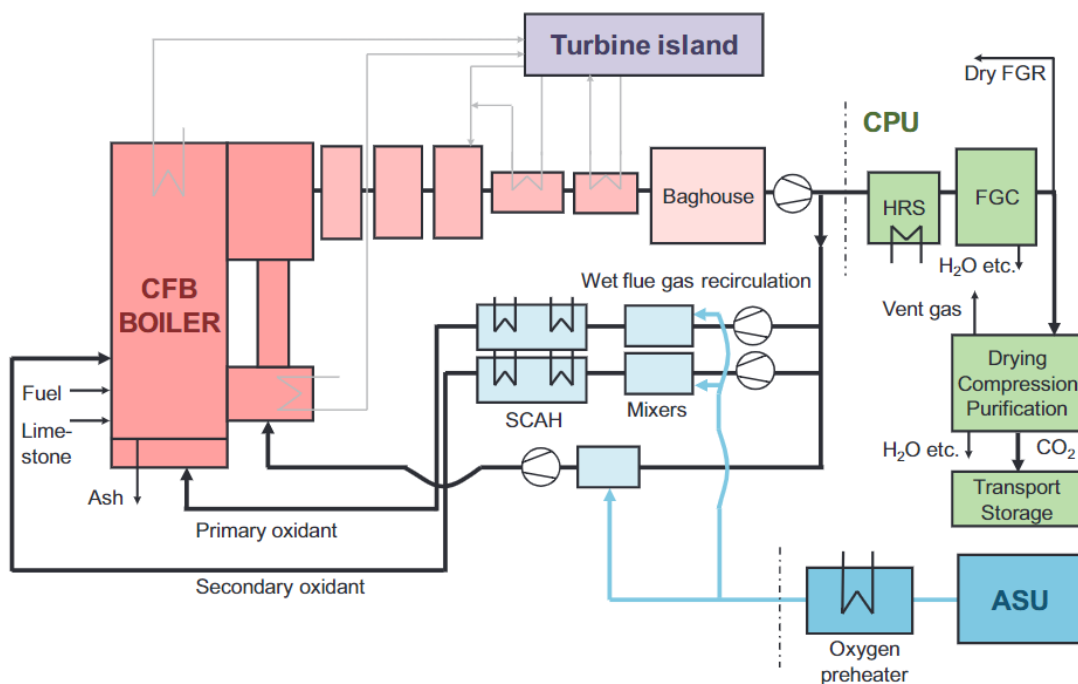
Obrázek 9: Rozložení oxyfuel spalování v uhelné elektrárně s práškovým kotlem a zachytem CO_2 [19]

Zplynění uhlí či jiného pevného paliva za produkce syngasu, je další z uvažovaných způsobů pro oxyfuel spalování. Palivo je nejprve zplyněno, produkt je následně čištěn od nečistot a nežádoucích vedlejších produktů. Takto zpracované palivo lze dále spalovat s kyslíkem, jak bylo popsáno v kapitole o plynných palivech. [12]

Kotle s cirkulující fluidní vrstvou (CFB) jsou v současnosti častou alternativou práškových kotlů. Jejich výhodou je dobré míchání v celém objemu spalovací komory a schopnost vyrovnávat teploty díky velkému množství cirkulujícího materiálu. Teploty se obvykle pohybují v rozmezí 850-900 °C, tedy níže než v případě práškového ohniště. Vznikající SO_x lze rovněž odebírat přímo ve spalovací komoře přidáváním vápence, což může být dostačující odsíření, neobsahuje-li původní palivo příliš velké množství síry. Při oxyfuel spalování v kotli s cirkulující fluidní vrstvou (Oxy-CFB) je kyslík míchán s recirkulovanými spaliny. Tato směs pak funguje jako fluidační médium namísto vzduchu. Množství dodávaného kyslíku je regulováno změnou poměru kyslíku a spalin. Díky promíchávání ve spalovací komoře a další rekuperaci tepla

cirkulujícím fluidním materiálem lze mít vyšší koncentraci kyslíku na vstupu, nižší množství recirkulovaných spalin a celkově menší kotel. [19]

Na obrázku 10 je vyobrazeno zjednodušené schéma oxyfuel kotle s cirkulující fluidní vrstvou. Hlavní parametry spalování jsou závislé na množství kyslíku a recirkulovaných spalin a na způsobu jejich distribuce do kotle. Pokud je třeba, aby kotel mohl pracovat v oxyfuel i konvenčním módu, podíl kyslíku se volí tak, aby termodynamické vlastnosti v obou variantách odpovídaly. V takových případech se pohybuje obsah kyslíku obvykle mezi 20 a 30 %. Pokud má kotel pracovat pouze v oxyfuel režimu a není třeba, aby byl schopen pracovat v režimu se vzduchem, může být recirkulováno menší množství spalin, a tedy podíl kyslíku je větší (30-50 %), což povede k nižším průtokům a zmenšení potřebného zařízení (přílišné zmenšení by na druhou stranu mohlo mít za následek výraznější snížení průtoku pevných částic, snížení tepelné akumulační kapacity a zvýšení teplotních gradientů). Zmenšení průřezu ale zároveň znamená zmenšení výhřevné plochy stěn. Výhřevná plocha lze zvětšit vnitřními výměníky tepla a zavěšenými přehřívačky, i toto řešení má samozřejmě omezení a to jak hustě je možno výměníky umístit, aby ještě jejich využití bylo efektivní. [19]



Obrázek 10: Diagram oxy-CFB s recirkulací mokrých spalin za filtrem pevných částic a s recirkulací suchých spalin za kondenzační jednotkou [19]

Fluidační médium může být do spalovací komory přiváděno odspodu, stejně tak i v různých místech ve stěnách. Pokud je fluidačním médiem vzduch, je podíl kyslíku pevně daných 21 %, v oxy-CFB nám možnost nastavení podílu kyslíku a spalin umožňuje nastavit odlišný poměr v různých místech. To znamená další možnost jak řídit spalování a optimalizovat výkon pro různá paliva či změny průtoků. [19]

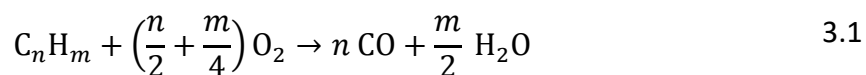
V konvenčních CFB musí být teplota dostatečně vysoká, aby mohly všechny spalovací reakce proběhnout, zároveň dostatečně nízká, aby nedocházelo ke spékání částic materiálu fluidní vrstvy. Teplota by rovněž měla vést k co nejnižším emisím SO₂ a NO_x, teplota se tedy obvykle pohybuje okolo 850-900 °C. Tyto parametry platí i v případě oxyfuel spalování. Odsíření vápenatými sorbenty z důvodu vysokých koncentrací CO₂ a H₂O může vyžadovat další optimalizaci teploty. [19]

Ve fluidním ohništi lze spalovat široké spektrum různých paliv, včetně biomasy. Aplikace s vyšší koncentrací kyslíku umožňuje spalovat i paliva s velkým obsahem vody a nízkou výhřevností. [19]

3.3 Vznik polutantů

Produkty dokonalého spalování paliva jsou typicky oxid uhličitý, vodní pára a oxid siřičitý (pokud palivo obsahuje síru). CO₂ je konečným produktem při oxidaci uhlíku a vodní pára je částečně produktem oxidace vodíku a částečně vlhkost paliva a okysličovadla. Dokonalé spalování předpokládá dokonalé vyhoření složek hořlaviny (C, H, S) obsažených v palivu. Tento model je ovšem pouze teoretický, reálně dochází ke spalování nedokonalému, při kterém palivo vyhoří částečně, vzniká mechanický a chemický nedopal. [21]

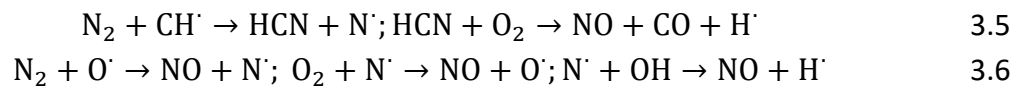
Oxid uhelnatý vzniká parciální oxidací uhlíku v palivu (5.7). Příčinou vzniku může být příliš nízký přebytek okysličovadla, jeho nevhodná distribuce, špatná příprava spalovací směsi či příliš nízká spalovací teplota (CO nestihne vyhořet). Problematický při oxyfuel spalování může být vysoký obsah oxidu uhličitého spojený s jeho recirkulací, jelikož reakcí s uhlíkem z paliva dochází ke vzniku oxidu uhelnatého podle Boudouardovy rovnice (5.7). Kromě toho CO₂ reaguje s vodíkovým radikálem (3.3) a také dochází k jeho disociaci teplotou (5.7). [22]



Uhlík v jiné formě než v podobě oxidu uhličitého a uhelnatého ve spalinách se nazývá TOC (total organic carbon). Jde o produkt rozkladu uhlovodíků na menší části, aniž by došlo k jejich oxidaci. Oxidace TOC probíhá výrazně rychleji než oxidace CO, proto bývá ve spalinách obvykle řádově více oxidu uhelnatého a TOC se ve spalinách vyskytuje spíše v situacích s velmi nízkým přebytkem okysličovadla. Dalším produktem nedokonalého spalování uhlíku jsou saze. Jde v principu o pevné částice uhlíku z paliva, které vznikají při výrazném nedostatku kyslíku a vysokých teplotách.

Dalšími znečišťujícími látkami, které při spalování vznikají, jsou oxidy dusíku NO_x, primárně oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂), dále pak i N₂O. Poslední zmíněný ovšem není

v současnosti z hlediska emisních limitů sledován. Při spalování vzniká primárně oxid dusnatý. Pro vzduchové spalování jsou známy 3 typické mechanismy vzniku oxidů dusíku, termický, promptní a z palivového dusíku. Při promptním (Fenimorově) mechanismu dochází k reakci mezi vzdušným dusíkem a uhlovodíkovými radikály v místě s nedostatkem okysličovadla (3.5). Při termickém mechanismu vzniku podle Zeldoviče dochází k reakci mezi molekulou dusíku a kyslíkovým radikálem (3.6). Při palivovém mechanismu dochází k oxidaci dusíkatých složek paliva. První 2 mechanismy probíhají díky dusíku obsaženému ve spalovacím vzduchu, jejich význam při oxyfuel spalování, u kterého je okysličovadlem velmi čistý kyslík, bude zanedbatelný. Navíc termický vznik NO_x je kvůli vysoké aktivační energii a teplotní závislosti relevantní až při teplotách nad $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Relevantní teploty, při kterých dochází k promptnímu vzniku NO_x , se pohybují ještě výše ($1300\text{-}1400\text{ }^\circ\text{C}$). Tyto vysoké teploty znamenají, že jsou mechanismy málo významné pro fluidní spalování, které běžně probíhá při nižších teplotách. Vznik palivových NO_x je slabě závislý na teplotě a dochází k němu již při teplotách nad $900\text{ }^\circ\text{C}$. Jejich vznik lze omezit především snížením koncentrace kyslíku v zóně hoření. K další oxidaci NO na NO_2 dochází až při nízkých teplotách ($<100\text{ }^\circ\text{C}$) za přítomnosti kyslíku. [23]



Spalováním síry obsažené v palivu vznikají oxidy síry, primárně SO_2 (například oxidace pyritu 3.7). Obsah SO_3 nepřesahuje 5 % celkového množství oxidů síry ve spalinách. [24] Oxidace síry na SO_2 probíhá rychle s vysokou konverzí. SO_3 pak vzniká další oxidací oxidu siřičitého.



Případné další znečišťující látky ve spalinách, jakými jsou sloučeniny chloru a fluoru, vychází ze složení paliva. Pokud popelovina pevného paliva obsahuje chloridy či fluoridy, uvolňují se do spalin v podobě HCl a HF .

3.4 Pilotní projekty

Za dobu vývoje technologie oxyfuel již proběhlo množství testování a projektů v různých měřítkách. Příkladem je německá Schwarze Pumpe, která je již vyřazena z provozu. Tento $30 \text{ MW}_{\text{th}}$ projekt má za sebou okolo $13\,000 \text{ h}$ provozu v oxyfuel režimu mezi roky 2008 a 2014. Zařízení je navrženo pro flexibilní provoz vhodný k testování různých komponent k oxyfuel spalování. Schwarze Pumpe je vybavena jedním práškovým hořákem, dvěma přehříváky a pěti ekonomizéry. [19]

Francouzský Lacq Pilot Plant se stejným výkonem $30 \text{ MW}_{\text{th}}$ je elektrárna spalující plyn, která byla retrofitována na oxyfuel spalování. I toto zařízení je již vyřazeno z provozu. Tento

projekt poskytl množství informací o zachytu, transportu a skladování oxidu uhličitého. Za dobu 11 000 hodin provozu zachytil a uložil téměř 51 000 tun CO₂ do vyčerpaného ložiska zemního plynu. Šlo o první zařízení, které v takto velkém měřítku zachytávalo CO₂ z oxyfuel elektrárny a při tlaku 27 bar jej v plynném stavu transportovalo potrubím do 27 km vzdáleného ložiska. [19]

Španělský CIUDEN CCS Technology Development Plant se skládá z 30 MW_{th} oxy-CFB a 20 MW_{th} oxy-PC zařízení. Hlavním cílem je demonstrovat provoz oxy-CFB. Může operovat buď ve flexibilním provozu se vzduchem 14,5 MW_{th} a s kyslíkem 15-20 MW_{th}, nebo čistě v oxyfuel režimu s velkou koncentrací kyslíku 20-30 MW_{th}. Dnes je již toto zařízení rovněž odstaveno. [19]

Australský Callide Oxyfuel Project je první a největší oxy-PC elektrárna produkující 30 MW_e. Před vyřazením z provozu pracovala 11 000 hodin, dodávala elektřinu a zachytávala CO₂ v provozu skutečné elektrárny. [19]

3.5 Fluidace a fluidní spalování

Fluidace je proces, při kterém proudící médium vytváří suspenzi spolu s částicemi pevné látky. Vrstva, která tímto způsobem vzniká, se nazývá fluidní vrstva. Je spojena s výrazným promícháváním celého objemu. Hlavní výhodou je výrazná plocha kontaktu mezi částicemi a proudícím médiem. Díky tomu ve fluidní vrstvě dochází k intenzivnímu přenosu tepla i hmoty, což vede k rovnoměrnému rozložení teploty ve vrstvě, přívodu reagentů i odvodu produktů spalování. Existence fluidní vrstvy je podmíněna rozsahem rychlostí fluidačního média. Aby k fluidaci vůbec mohlo docházet, musí být rychlost proudění mimo vrstvu vyšší, než je prahová rychlost fluidace. Při zvyšování rychlosti dochází k expanzi fluidní vrstvy, mezery mezi částicemi se zvětšují, čímž nabývá vrstva na objemu, a to až do dosažení úletové rychlosti částic. Po dosažení této rychlosti dochází k úletu částic.

Na částici obtékanou fluidačním médiem ve vrstvě působí gravitační, vztlaková a odporová síla. Pouze poslední zmiňovaná je závislá na rychlosti, se zvyšováním rychlosti síla roste. Rychlost, při které dochází k rovnováze sil, je zmiňovaná prahová rychlost fluidace, jejímž dosažením nastává fluidace. Soustava částic ve vzhledu pak tvoří fluidní vrstvu.

Plně rozvinutá fluidní vrstva se vlastnostmi podobá kapalině. Stejně jako kapalina udržuje vodorovnou hladinu i v případě, že by došlo k naklonění reaktoru s fluidní vrstvou. Také při propojení dvou reaktorů dojde k vyrovnání hladin mezi oběma reaktory.

Pro spalování se stacionární fluidní vrstvou je typická menší expanze (výška) fluidní vrstvy s jasně zřetelnou hladinou nad fluidním roštem. Pro stacionární vrstvu je důležité, aby byla udržována rychlost vyšší než mezní, ale zároveň nižší než úletová. Roštem, který sestává z trubkových přívodů umístěných ve spodní části kotle, přichází do kotle fluidační médium. U vzduchového spalování je tímto médiem vzduch spolu s recirkulovanými spalinami, je-li

využíváno recirkulace. Pro režim oxyfuel spalování sestává médium z kyslíku a recirkulovaných spalin. Typickým způsobem regulace teploty ve fluidní vrstvě je míra recirkulace. Pokud by fluidním médiem byl pouze kyslík, dosahovalo by se enormně vysokých teplot. Balastní dusík, obsažený v nemalém množství ve vzduchu, odvádí při konvenčním spalování značnou část tepla. Při oxyfuel spalování je tedy kvůli absenci dusíku recirkulace nezbytná. Druhou funkcí vzdušného dusíku, kterou u oxyfuel režimu musejí zastávat recirkulované spaliny, je zajištění dostatečného objemového toku. Pokud by byl objemový tok příliš malý, nebylo by možno dosáhnout a následně udržet fluidační rychlost.

Při zvyšování rychlosti proudění dojde expanzí fluidní vrstvy k zaplnění celého objemu ohniště, neexistuje již zřetelná horní hladina vrstvy. Je určena odlučovacím cyklonem, ve kterém se vrstva dělí na materiál fluidní vrstvy a spaliny obsahující neodloučenou jemnou frakci popela. Materiál vrstvy se vrací zpět na dno ohniště, spaliny postupují dále do tahu. Popisovaný postup je spalování s cirkulující fluidní vrstvou.

Závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění v oblasti pevného lože popisuje Ergunova rovnice 5.7. Po překročení prahové rychlosti tlakovou ztrátu popisuje rovnice 5.7. Zavedením bezrozměrných kritérií Archimedova (3.10) a Reynoldsova (5.7) čísla a úpravami lze rovnici upravit do podoby 5.7. Odtud lze se znalostí parametrů fluidní vrstvy (mezerovitost, kulovitost částic, průměr částic a hustota) vypočítat prahovou rychlost fluidace jako nezáporný kořen kvadratické rovnice.

Mezerovitost ε je část celkového objemu vrstvy, která připadá na prázdný prostor. Lze ji přibližně spočítat vztahem 5.7, ve kterém ρ_p je hustota částic jako takových a ρ_b je objemová hmotnost celé vrstvy. Sféricita (kulovitost) ϕ udává podobnost částic vrstvy s kulovým tvarem (pro kouli platí $\phi = 1$).

$$\Delta p_b = \frac{150 \cdot H \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu}{\varepsilon^3 \cdot \phi^2 \cdot d_m^2} \cdot u + \frac{1,75 \cdot H \cdot (1 - \varepsilon) \rho_g}{\varepsilon^3 \cdot \phi \cdot d_m} \cdot u^2 \quad 3.8$$

$$\Delta p_b = \frac{m_b}{A \cdot \rho_p} \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad 3.9$$

$$Ar = \frac{d_m^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad 3.10$$

$$Re_p = \frac{d_m \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \quad 3.11$$

$$\frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \phi} \cdot Re_p^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \phi^2} \cdot Re_p = Ar \quad 3.12$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad 3.13$$

4 Výpočet spalování ve vzduchovém a oxyfuel režimu

V této kapitole bude na základě literatury sestaven výpočetní model vzduchového i oxyfuel spalování pro výpočet stechiometrie (dokonalého i nedokonalého), recirkulace spalin pro dosažení stejné teploty nechlazeného plamene a mezních fluidačních rychlostí pro oba režimy. Rovněž bude zkoumán vliv přebytku okysličovadla na měrný objem spalin a jejich složení. Pozornost bude věnována také tomu, jakým způsobem se projeví množství přísátého vzduchu na koncentraci CO₂ ve spalinách při oxyfuel spalování.

Výpočet je prováděn pro palivo o prvkovém složení uvedeném v tabulce 2. Jedná se o dřevní pelety. Řádek X^r popisuje původní složení paliva, X^d složení v suchém stavu, X^{daf} složení suchého paliva bez popela. Výhřevnost paliva Q_i je v tabulce také uvedena.

Tabulka 2: Složení paliva

	C [%]	H [%]	S [%]	N [%]	O [%]	A [%]	W [%]	Q _i [MJ/kg]
X ^r	46,26	6,26	0,0027	0,27	37,91	1,50	7,80	17,71
X ^d	50,17	6,79	0,0029	0,29	41,11	1,63	-	-
X ^{daf}	51,00	6,90	0,0030	0,30	41,79	-	-	-

4.1 Stechiometrie

4.1.1 Vzduchové spalování

Přestože reálné spalování je podobnější modelu nedokonalého spalování, rozdíl mezi výsledky stechiometrických výpočtů pro dokonalé a nedokonalé spalování se pohybuje v řádu desetin procenta. [21] Stechiometrii nedokonalého spalování lze počítat pouze v případě, kdy je míra nedokonalosti spalování známá. Stechiometrie v této kapitole je počítána nejprve pro dokonalé spalování, poté je nastíněn rozdíl spalování nedokonalého.

Z prvkového složení paliva lze pomocí vztahu 4.1 vypočítat minimální objem kyslíku potřebného pro spálení 1 kg paliva. Jelikož kyslík tvoří 21 % suchého vzduchu, lze z takto zjištěné hodnoty vypočítat minimální objem suchého spalovacího vzduchu pro spálení vydělením 21 % (4.2). Podíl vodní páry χ_v odpovídající 1 Nm³, tedy metru krychlovému, který plyn zaujímá za normálních podmínek (p = 101 325 Pa, t = 0 °C), suchého vzduchu se vypočte jako součinitel ve vztahu 4.3, ve kterém φ je relativní vlhkost vzduchu, p^{''} parciální tlak vodní páry na mezi sytosti a p_c je celkový tlak. Hodnoty těchto parametrů byly vzaty ze skript [21] a jsou uvedeny v Tabulka 3. Minimální objem vlhkého vzduchu se získá vynásobením minimálního množství suchého vzduchu součinitelem podílu vodní páry (4.4). Objem vodní páry v tomto minimálním objemu je dán rozdílem minimálních objemů vlhkého a suchého vzduchu (4.5). [21]

$$O_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.1$$

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O2min}}{0,21} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.2$$

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} [-] \quad 4.3$$

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.4$$

$$O_{H2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VSmin} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.5$$

Tabulka 3: Parametry pro výpočet součinitele χ_v [21]

t_v [°C]	20
φ [%]	70
p'' [MPa]	0,002337
p_c [MPa]	0,1

Pokud by spalování probíhalo čistě jen na základě chemických rovnic, přičemž by docházelo k dokonalému vyhoření paliva s využitím minimálního množství vzduchu, šlo by o spalování stechiometrické. Reálné spalování ovšem probíhá s vyšším množstvím vzduchu než je množství stechiometrické. S minimálním množstvím by totiž oxidáčovací mnohem častěji chybělo v místě s hořlavinou, docházelo by k lokální podstechiometrii (lokálnímu nedostatku kyslíku potřebného k vyhoření paliva), což by vedlo k neúplné oxidaci paliva. Reálné množství spalovacího vzduchu je vyjádřeno poměrem reálného množství a minimálního teoretického množství jako součinitel přebytku spalovacího vzduchu α .

Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu, tedy $\alpha = 1$, se vypočte jako součet jednotlivých složek spalin (4.6), které se do spalin dostanou jako produkty spalování a jako složky spalovacího vzduchu. Objem oxidu uhličitého se spočte vztahem 4.7, do spalin se dostane jednak dokonalým spálením uhlíku a také v malém množství ze vzduchu. Objem oxidu siřičitého je dán vztahem 4.8 a je závislý na obsahu síry v palivu. Výrazný podíl objemu dusíku ve spalinách (4.9) přichází ve spalovacím vzduchu, kterého tvoří 78,05 %, část vzniká také z obsahu dusíku v palivu. Objem argonu a dalších vzácných plynů se do spalin dostává ze spalovacího vzduchu (4.10). Molární objemy plynů vznikajících spalováním jsou uvedeny v Tabulka 4. Objem vody se v minimálním množství vlhkých spalin skládá z vlhkosti spalovacího vzduchu, odpařené vlhkosti paliva a vodní páry, která vzniká spalováním vodíku (4.11). Minimální objem vlhkých spalin je součtem suchých spalin a tohoto objemu vody (4.12).

$$O_{SSmin} = O_{CO2} + O_{SO2} + O_{N2} + O_{Ar} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.6$$

$$O_{CO2} = \frac{V_m^{CO2}}{M^C} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.7$$

$$O_{SO2} = \frac{V_m^{SO2}}{M^S} \cdot S^r \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.8$$

$$O_{N2} = \frac{V_m^{N2}}{2 \cdot M^N} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VSmin} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.9$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VSmin} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.10$$

$$O_{H2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H2O}^V \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.11$$

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H2O}^S \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.12$$

Tabulka 4: Molární objemy plynů

V_m^{CO2}	V_m^{SO2}	V_m^{N2}
[Nm ³ /kmol]	[Nm ³ /kmol]	[Nm ³ /kmol]
22,263	21,890	22,403

Při spalování s přebytkem spalovacího vzduchu ($\alpha > 1$) se objem spalin zvýší o množství vzduchu, které není využito ke spálení paliva a spalovací komorou pouze prochází, jak znázorňuje rovnice 4.13. Pro objemy složek spalin při tomto přebytku platí obdobné vztahy jako v případě minimálních objemů, je ale nutno uvažovat s vyšším množstvím těch, které přicházejí ve spalovacím vzduchu (4.14-4.17). Na objem SO₂ ve spalinách nemá přebytek vzduchu vliv, jelikož se ve vzduchu nenachází a platí vztah 4.8. Také je třeba počítat s množstvím kyslíku, které nebude využito ke spálení paliva a bude se nacházet ve spalinách (4.18). Alternativně lze měrný objem spalin získat i jako součet jednotlivých složek 4.14-4.18.

$$O_{SV} = O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.13$$

$$O_{CO2} = \frac{V_m^{CO2}}{M^C} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \cdot \alpha \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.14$$

$$O_{N2} = \frac{V_m^{N2}}{2 \cdot M^N} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VSmin} \cdot \alpha \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.15$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VSmin} \cdot \alpha \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.16$$

$$O_{H2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H2O}^V \cdot \alpha \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.17$$

$$O_{O2} = (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} \cdot 0,21 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.18$$

Koncentrace jednotlivých složek spalin se vypočtou jako podíl jejich objemu a objemu vlhkých (4.19), respektive suchých (4.20), spalin.

$$\omega_i = \frac{O_i}{O_{SV}} \quad 4.19$$

$$\omega_i = \frac{O_i}{O_{SS}} \quad 4.20$$

Palivo při spalování obvykle nikdy nevyhoří kompletně, což vede ke ztrátám hořlavinou ve spalinách a v tuhých zbytcích. Přesněji než dokonalé spalování vystihuje spalovací proces model nedokonalého spalování. Nedokonalost procesu se vztahuje ke spalování uhlíku. Proces spalování uhlíku na oxid uhelnatý popisuje rovnice 4.21. Ztrátu mechanickým nedopalem (4.22) získáme díky známému obsahu popeloviny, výhřevnosti paliva, poměrného rozdělení tuhých zbytků a obsahu uhlíku ve zbytcích. X_i v tomto vztahu značí poměrné rozdělení tuhých zbytků do jednotlivých podob, C_i potom označuje obsah uhlíku v i -tém zbytku. Pro fluidní spalování se hodnoty X_i pohybují v rozmezích 68-80 % ve škváře, 20-30 % v popílku ve spalinách a 0-2 % v propadu. Pro výpočet je uvažována $X_s = 75$ % a $X_p = 25$ %, $C_s = 10$ % a $C_p = 2$ %. Konstanta 32 700 kJ/kg je v tomto vztahu výhřevnost uhlíku. Ztráta chemickým nedopalem (4.23) závisí na ztrátě v tuhých zbytcích, objemu spalin a teple ztraceném nedokonalým vyhořením hořlaviny, ω_{CO} udává koncentraci oxidu uhelnatého ve spalinách, pro výpočet uvažována hodnota 0,055 %. Ze znalosti ztrát lze vypočítat podíl uhlíku spálený nedokonale na CO (4.24) a podíl uhlíku, který neshořel vůbec (4.25). V těchto vztazích je konstanta 33 828,5 kJ/kg reakční teplo 1 kg uhlíku spáleného na CO₂ a konstanta 10 334 kJ/kg reakční teplo 1 kg uhlíku spáleného na CO. Objem oxidu uhličitého při nedokonalém spalování se potom vypočte stejně jako při dokonalém spalování, jen je třeba snížit obsah o podíly a a b (4.26). Objem oxidu uhelnatého se vypočte jako 4.27. Potřebný objem kyslíku ke spálení paliva bude nižší o podíl potřebný ke spálení mechanického nedopalu a o polovinu podílu potřebného ke spálení uhlíku, který je nedokonale spálen pouze na CO. Kyslík, který bude ve spalinách z důvodu nedokonalého spalování navíc, se vypočte dle rovnice 4.28. Minimální objem suchých spalin při nedokonalém spalování se vypočte jako součet složek (4.29). Minimální objem vlhkých spalin bude tento objem spalin suchých zvýšený o vlhkost spalin (4.30). Objem spalin z 1 kg paliva nedokonale spáleného s přebytkem vzduchu $\alpha > 1$ se vypočte dle rovnice 4.31. Stejným způsobem jako do modelu dokonalého spalování se do modelu nedokonalého promítne použitý přebytek spalovacího vzduchu (4.32, 4.33, 4.15-4.17). Koncentrace složek ve vlhkých i suchých spalinách se spočtou dle 4.19 a 4.20.



$$Z_C = \frac{32\,700 \cdot A^r}{Q_i} \cdot \sum_i \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \quad [-] \quad 4.22$$

$$Z_{CO} = (1 - Z_C) \cdot O_{SV} \cdot \frac{12\,640 \cdot \omega_{CO}}{Q_i} \quad [-] \quad 4.23$$

$$a = \frac{Z_{CO} \cdot Q_i}{(33\,828,5 - 10\,334) \cdot C^r} [-] \quad 4.24$$

$$b = \frac{Z_C \cdot Q_i}{33\,828,5 \cdot C^r} [-] \quad 4.25$$

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.26$$

$$O_{CO}^N = a \cdot \frac{22,4}{12,01} \cdot C^r \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.27$$

$$O_{O_2}^N = \left(\frac{a}{2} + b \right) \cdot \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.28$$

$$O_{SSmin}^N = O_{CO_2}^N + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{CO}^N + O_{O_2}^N \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.29$$

$$O_{SVmin}^N = O_{SSmin}^N + O_{H_2O}^S \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.30$$

$$O_{SV}^N = O_{SVmin}^N + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.31$$

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} \cdot \alpha \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.32$$

$$O_{O_2}^N = \left(\frac{a}{2} + b \right) \cdot \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r + (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} \cdot 0,21 \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.33$$

4.1.2 Oxyfuel spalování

I zde je výpočet stechiometrie nejprve pro dokonalé spalování, poté pro nedokonalé. Pro reálné spalování bude stejně jako u vzduchového spalování docházet k nedopalu. Minimální objem kyslíku potřebný ke spálení 1 kg paliva se spočte ze známého složení paliva identicky jako v případě spalování se vzduchem (4.1). Na rozdíl od vzduchového spalování nejsou s okysličovadlem do spalovací komory přiváděny balastní složky typické pro vzduch (např. 78,05 % N₂). Nicméně lze předpokládat, že, ač technický kyslík používaný při oxyfuel spalování může dosahovat čistoty nad 99 %, bude jeho koncentrace nižší. Čistota kyslíku z výroby pro výpočet byla uvažována 95 %, přičemž zbylých 5 % okysličovadla tvoří dusík (4.34). Další složky obsažené ve vzduchu nejsou kvůli velmi nízké koncentraci v celkovém složení okysličovadla ve výpočtech uvažovány (4.8, 4.35-4.37). Minimální objem vlhkých spalin při dokonalém spálení je pak dán součtem všech složek (4.38).

$$O_{Oxmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,95} \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.34$$

$$O_{CO_2} = \frac{V_m^{CO_2}}{M^C} \cdot C^r \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.35$$

$$O_{N_2} = \frac{V_m^{N_2}}{2 \cdot M^N} \cdot N^r + 0,05 \cdot O_{Oxmin} \left[\frac{Nm^3}{kg} \right] \quad 4.36$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.37$$

$$O_{SVmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{H_2O}^S \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.38$$

Při spalování s přebytkem kyslíku ($\alpha > 1$) bude množství spalin vyšší o tento přebytečný kyslík a o malé množství dusíku přivedeného v oksyličovadle. Na rozdíl od vzduchového režimu nebude mít přebytek vliv na objemy ostatních složek, ve spalinách přibude jako další složka objem kyslíku (4.39) a vzroste množství dusíku (4.40). Objem spalin odpovídající přebytku α se vypočítá vztahem 4.41.

$$O_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot O_{O_2min} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.39$$

$$O_{N_2} = \frac{V_m^{N_2}}{2 \cdot M^N} \cdot N^r + 0,05 \cdot O_{OXmin} \cdot \alpha \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.40$$

$$O_{SV} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{H_2O} + O_{O_2} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.41$$

Koncentrace složek, které se ve spalinách nacházejí, se vypočtou obdobně jako u vzduchového spalování podle vztahu 4.19 pro vlhké spaliny, respektive 4.20 pro suché spaliny.

Stechiometrie nedokonalého spalování při oxyfuel režimu se řeší obdobně jako při spalování vzduchovém. Ze znalosti ztrát nedopalem se vypočte podíl uhlíku v mechanickém (4.25) a chemickém nedopalu (4.24). Množství vznikajícího oxidu uhličitého bude zahrnovat pouze uhlík z paliva 4.42. Ztráty mechanickým a chemickým nedopalem se počítají dle vztahů 4.22 a 4.23 a měrné objemy oxidu uhelnatého a kyslíku ve spalinách budou odpovídat vztahům 4.27 a 4.28. Minimální objem suchých spalin bude opět vypočten jako suma všech složek spalin (4.43) a minimální objem vlhkých spalin bude toto množství zvýšené o vlhkost (4.44). Objem spalin odpovídající přebytku, který bude vznikat nedokonalým spalováním v oxyfuel režimu s kyslíkem o dané čistotě, se vypočte ze vztahu 4.45.

$$O_{CO_2}^N = (1 - a - b) \cdot \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.42$$

$$O_{SSmin}^N = O_{CO_2}^N + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{CO}^N + O_{O_2}^N \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.43$$

$$O_{SVmin}^N = O_{SSmin}^N + O_{H_2O}^S \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.44$$

$$O_{SV}^N = O_{CO_2}^N + O_{N_2} + O_{H_2O} + O_{O_2}^{N,\alpha} + O_{CO}^N + O_{SO_2} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad 4.45$$

4.1.3 Porovnání režimů

Na základě předchozích dvou podkapitol byl sestaven výpočetní model v programu Microsoft Excel, ve kterém byla vypočtena stechiometrie obou režimů. Minimální objem kyslíku závisí na složení paliva a je tedy pro oba režimy stejný. Minimální objem suchého i vlhkého vzduchu pro vzduchové spalování a 95 % kyslíku pro oxyfuel spalování jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Minimální měrné objemy okysličovadel

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
$O_{O_2min} [Nm^3/kg]$	0,9448	0,9448
$O_{V_{Smin}} [Nm^3/kg]$	4,4992	-
$O_{V_{Vmin}} [Nm^3/kg]$	4,5740	-
$O_{H_2O}^{Vmin} [Nm^3/kg]$	0,0748	-
$O_{95\%O_2min} [Nm^3/kg]$	-	0,9946

Minimální měrné objemy suchých i vlhkých spalin a jejich složek shrnuje následující tabulka 6. Z hodnot je dobře patrný nižší objem spalin vznikajících při spalování v oxyfuel. Z výpočtu vychází 4,85x menší objem suchých spalin, respektive 3,10x menší objem spalin vlhkých. To je dáno primárně chybějícím dusíkem ze vzduchu.

Tabulka 6: Minimální měrné objemy spalin a jejich složek

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
$O_{SSmin} [Nm^3/kg]$	4,4140	0,9094
$O_{SVmin} [Nm^3/kg]$	5,2815	1,7020
$O_{CO_2}^{Smin} [Nm^3/kg]$	0,8589	0,8575
$O_{SO_2}^{Smin} [Nm^3/kg]$	0,000018	0,000018
$O_{N_2}^{Smin} [Nm^3/kg]$	3,5138	0,0519
$O_{Ar}^{Smin} [Nm^3/kg]$	0,0414	0,0000
$O_{H_2O}^{Smin} [Nm^3/kg]$	0,8674	0,7926

Přebytek pro oba režimy byl do výpočtu volen tak, aby kyslík v suchých spalin v obou případech tvořil 11 % suchých spalin. V takové situaci je přebytek u oxyfuel spalování 1,85x menší a množství vznikajících spalin suchých 9,01x menší, vlhkých 5,61x menší.

Tabulka 7: Přebytky okysličovadla, měrné objemy spalin a jejich složek při $\omega_{O_2}^{SS} = 11\%$

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
α [-]	2,079	1,120
O_{SS} [Nm ³ /kg]	9,2695	1,0285
O_{SV} [Nm ³ /kg]	10,2177	1,8211
$O_{CO_2^S}$ [Nm ³ /kg]	0,8603	0,8575
$O_{SO_2^S}$ [Nm ³ /kg]	0,000018	0,000018
$O_{N_2^S}$ [Nm ³ /kg]	7,3034	0,0578
O_{Ar^S} [Nm ³ /kg]	0,0861	0,0000
$O_{O_2^S}$ [Nm ³ /kg]	1,0196	0,1131
$O_{H_2O^S}$ [Nm ³ /kg]	0,9482	0,7926

Koncentrace kyslíku v suchých spalinách byla ve výpočtu pro porovnání obou režimů zvolena, koncentrace zbylých složek suchých spalin jsou v tabulce. Znovu je zde vidět hlavní rozdíl v absenci dusíku ze vzduchu v oxyfuel spalování. Ten ve vzduchovém režimu tvoří většinu spalin. V oxyfuel režimu tvoří jen jednotky procent (dáno hlavně čistotou kyslíku), složkou, která v tomto režimu převládá, je zde oxid uhličitý.

Tabulka 8: Koncentrace složek v suchých spalinách

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
$\omega_{O_2}^{SS}$ [%]	11,00	11,00
$\omega_{CO_2}^{SS}$ [%]	9,28	83,38
$\omega_{SO_2}^{SS}$ [%]	0,00	0,00
$\omega_{N_2}^{SS}$ [%]	78,79	5,62
ω_{Ar}^{SS} [%]	0,93	0,00

Koncentrace ostatních složek ve vlhkých spalinách jsou oproti suchým sníženy přítomnou vodní parou. Ta tvoří v oxyfuel režimu výrazný podíl vznikajících spalin.

Tabulka 9: Koncentrace složek ve vlhkých spalinách

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
$\omega_{O_2}^{SV}$ [%]	9,98	6,21
$\omega_{CO_2}^{SV}$ [%]	8,42	47,09
$\omega_{SO_2}^{SV}$ [%]	0,00	0,00
$\omega_{N_2}^{SV}$ [%]	71,48	3,18
ω_{Ar}^{SV} [%]	0,84	0,00
$\omega_{H_2O}^{SV}$ [%]	9,28	43,52

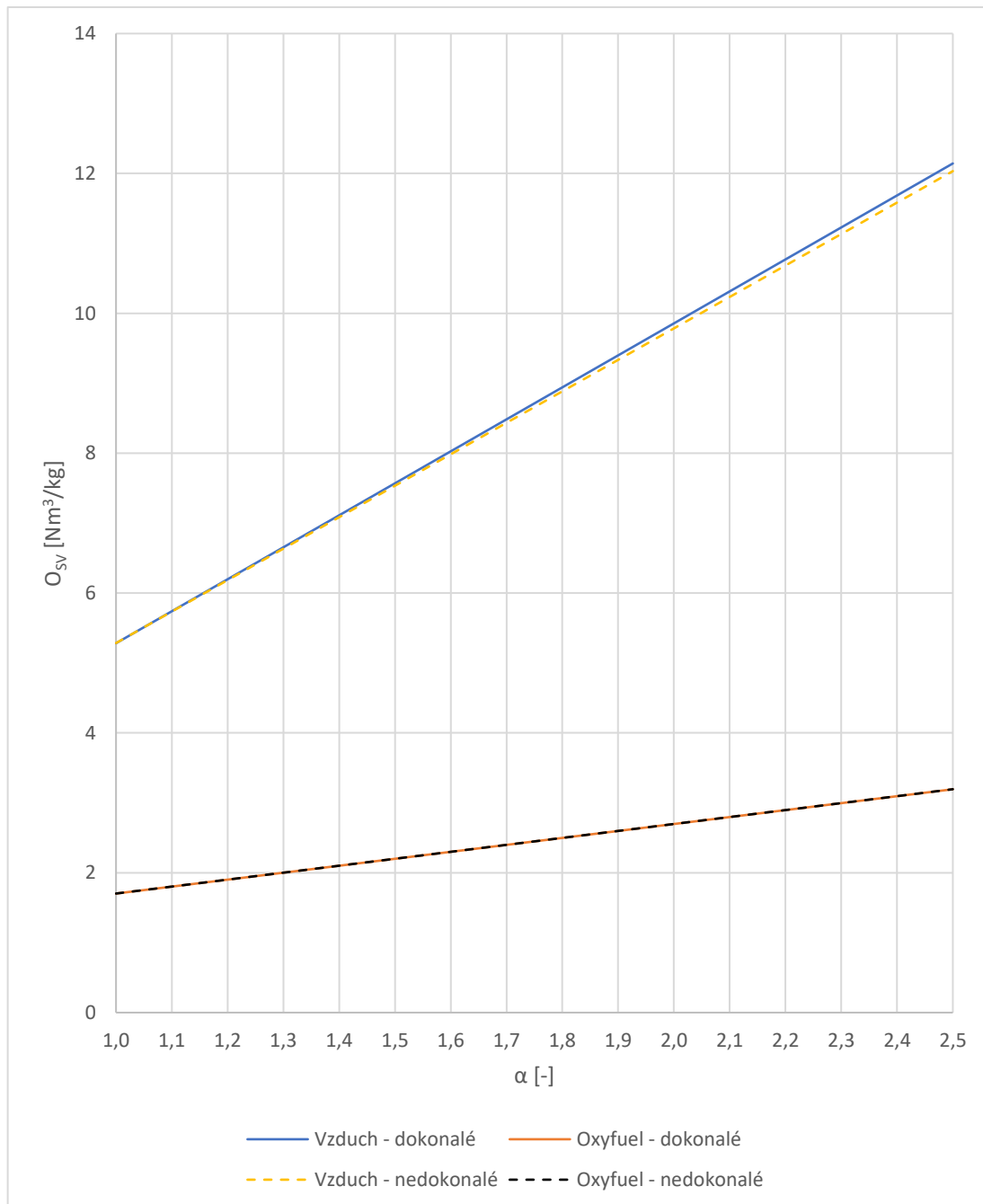
S uvažováním výše zmíněných hodnot pro nedokonalé spalování vychází ztráty v chemickém a mechanickém nedopalu tak, jak je uvedeno v tabulce 10. V tabulce jsou pro tyto ztráty uvedeny podíly a a b , tedy uhlíku vyhořelého nedokonale a uhlíku nevyhořelého. Těmito ztrátami se mění stechiometrie, jelikož část kyslíku původně uvažovaná k oxidaci uhlíku nebude využita a skončí ve spalínách. Tím se zvýší koncentrace kyslíku v suchých spalínách.

Tabulka 10: Odlišnosti nedokonalého spalování způsobené ztrátami nevyhořelou hořlavinou

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
Z_c [-]	0,00119	0,00119
Z_{co} [-]	0,00401	0,00401
a [-]	0,00653	0,00116
b [-]	0,00135	0,00135
$O_{O_2^N}$ [Nm^3/kg]	0,00398	0,00167
α [-]	2,088	1,122
$\omega_{O_2^{SS}}$ [%]	11,04	11,16

4.1.4 Vliv přebytku oxidizovačla na měrný objem spalin

Vzduchové spalování generuje větší množství spalin, primárně z důvodu velkého objemu dusíku ve spalovacím vzduchu. S rostoucím přebytkem oxidizovačla α roste v obou režimech množství spalin. Tento růst bude, opět kvůli balastním složkám ve spalovacím vzduchu, u vzduchového spalování rychlejší. Závislost měrného objemu vlhkých spalin vychází pro vzduchové ze vztahu 4.13 a pro oxyfuel spalování ze vztahu 4.41. Průběh těchto závislostí ukazuje Obrázek 11.



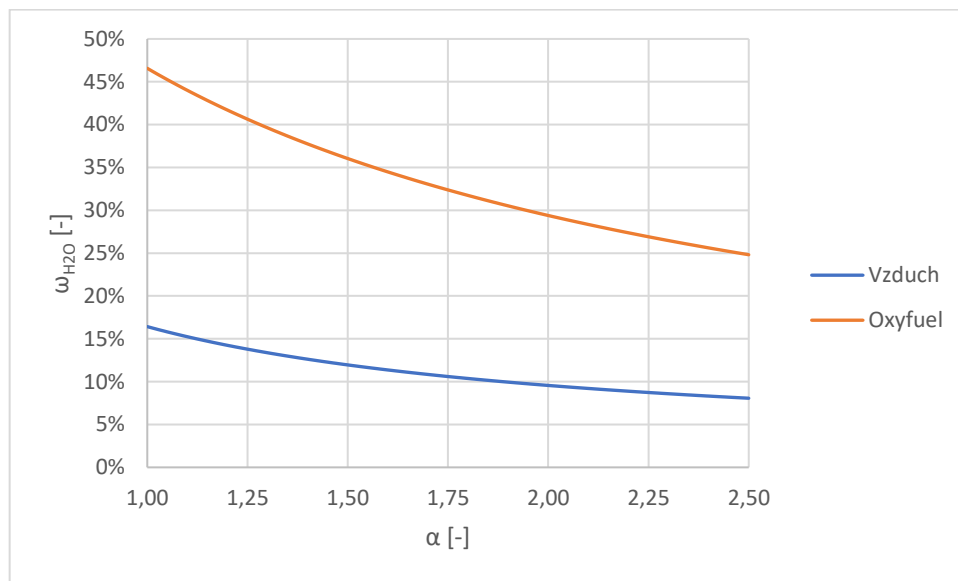
Obrázek 11: Závislost měrného objemu vlhkých spalin na přebytku okysličovadla pro oba režimy

4.1.5 Vliv přebytku okysličovadla na složení spalin

Složení spalin v oxyfuel režimu je ovlivněno absencí dusíku v okysličovadle, dusík, který se ve spalinách vyskytuje, pochází z obsahu v palivu, popřípadě z falešně přísátého vzduchu a z nečistoty okysličovadla (kyslík není 100 % čistý). Toto množství je však velmi malé v porovnání se vzduchovým režimem. Hlavními složkami spalin v oxyfuel režimu spalování jsou CO_2 , vodní pára a kyslík daný spalovacím přebytkem.

Podíl vodní páry ve spalinách je v případě oxyfuel spalování vyšší, to je dáno nižším celkovým objemem spalin, ale srovnatelným měrným objemem vodní páry (ta je nižší o vzdušnou vlhkost). S rostoucím přebytkem α klesá podíl vodní páry ve spalinách v obou režimech, v oxyfuel režimu rychleji (spalovací kyslík neobsahuje vzdušnou vlhkost). Závislost koncentrace vodní páry ve spalinách na α vychází ze vztahu 4.46 a její průběh ukazuje Obrázek 12.

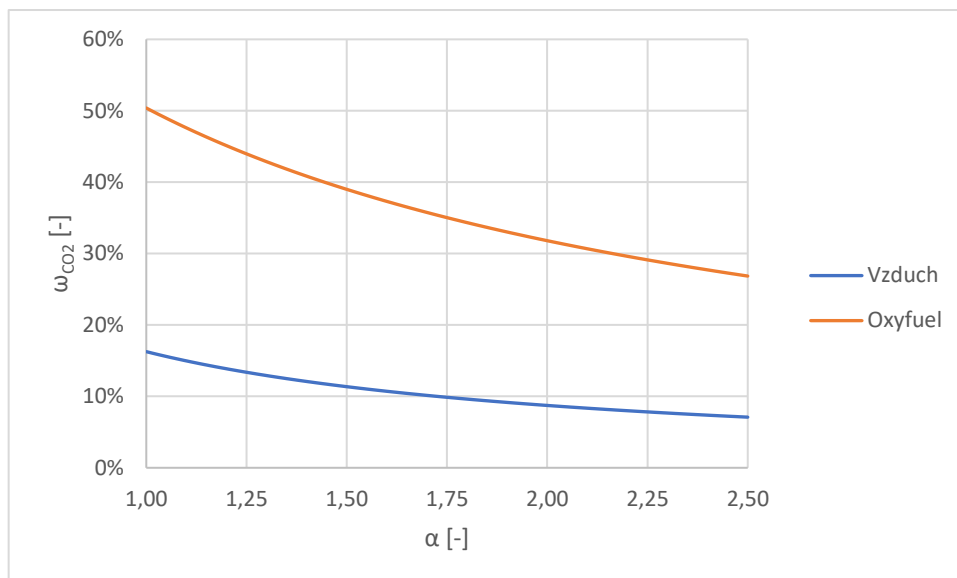
$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SV}} \quad 4.46$$



Obrázek 12: Závislost koncentrace H₂O ve vlhkých spalinách na přebytku okysličovadla

Z obdobných důvodů jako v případě vodní páry je podíl oxidu uhličitého ve spalinách oxyfuel spalování vyšší. Kromě velmi malého množství přicházejícího ve spalovacím vzduchu vzniká CO₂ v obou režimech výhradně spalováním paliva. S rostoucím přebytkem kyslíku v oxyfuel roste množství spalin, ale neroste množství oxidu uhličitého, ve vzduchovém režimu k mírnému nárůstu množství CO₂ docházet bude. V obou případech klesá podíl oxidu uhličitého, v oxyfuel režimu však rychleji. Koncentrace CO₂ ve spalinách se spočte ze vztahu 4.47. Závislost na přebytku okysličovadla je vykreslena na obrázku 13.

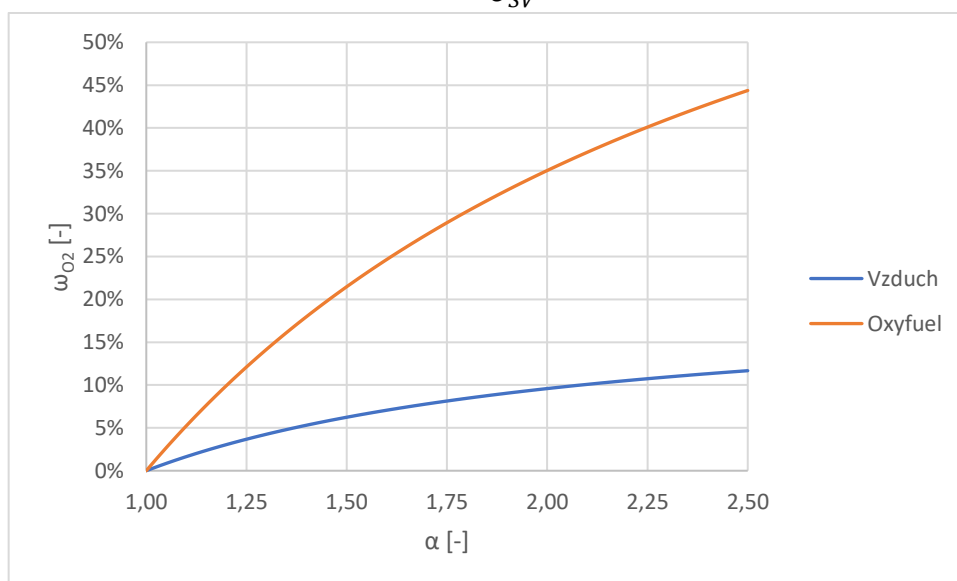
$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV}} \quad 4.47$$



Obrázek 13: Závislost koncentrace CO₂ ve vlhkých spalinách na přebytku okysličovadla

Spaliny by při ideálním stechiometrickém spalování paliva neobsahovaly kyslík ani v jednom režimu spalování. Se zvyšujícím se přebytkem okysličovadla podíl kyslíku ve spalinách roste. Rozdíl mezi vzduchovým a oxyfuel spalováním je ovšem v tom, že kyslík ve spalovacím vzduchu tvoří pouze 21 %, v čistém spalovacím kyslíku je to 100 % (v uvažované situaci je čistota kyslíku pouze 95 %). Proto s rostoucím přebytkem bude podíl kyslíku ve spalinách oxyfuel spalování stoupat významněji než u vzduchového spalování. Koncentrace kyslíku ve spalinách odpovídá podílu v rovnici 4.48 a průběhu závislosti na α (Obrázek 14).

$$\omega_{O_2} = \frac{O_{O_2}}{O_{SV}} \quad 4.48$$



Obrázek 14: Závislost koncentrace O₂ ve vlhkých spalinách na přebytku okysličovadla

4.1.6 Vliv přísátého vzduchu v oxyfuel režimu na obsah CO₂ ve spalínách

Ve výpočtech je uvažován kyslík o čistotě 95 %, zbylých 5 % odpovídá dusíku. Koncentrace CO₂ ve spalínách se s rostoucím podílem vzduchu v okysličovadle snižuje. Pro ilustraci je na obrázku 15 vykreslena závislost koncentrace oxidu uhličitého v suchých i mokřých spalínách na množství vzduchu přísátého do okysličovadla při oxyfuel spalování. Při uvažovaném přebytku kyslíku α byl uvažován zvyšující se podíl přísátého vzduchu v proudu dodávaného okysličovadla ω_{VS}^p , čímž dochází k růstu množství spalin. V objemu spalin tím přibývá ostatních složek a snižuje se podíl CO₂ (rovnice 4.49-4.58).

$$O_{VS}^p = \omega_{VS}^p \cdot \alpha \cdot O_{O2min} \quad 4.49$$

$$O_{CO2} = \frac{V_{CO2}^m}{M^C} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VS}^p \quad 4.50$$

$$O_{N2} = \frac{V_{N2}^m}{2 \cdot M^N} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VS}^p \quad 4.51$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VS}^p \quad 4.52$$

$$O_{O2} = (\alpha - 1) \cdot O_{O2min} + 0,21 \cdot O_{VS}^p \quad 4.53$$

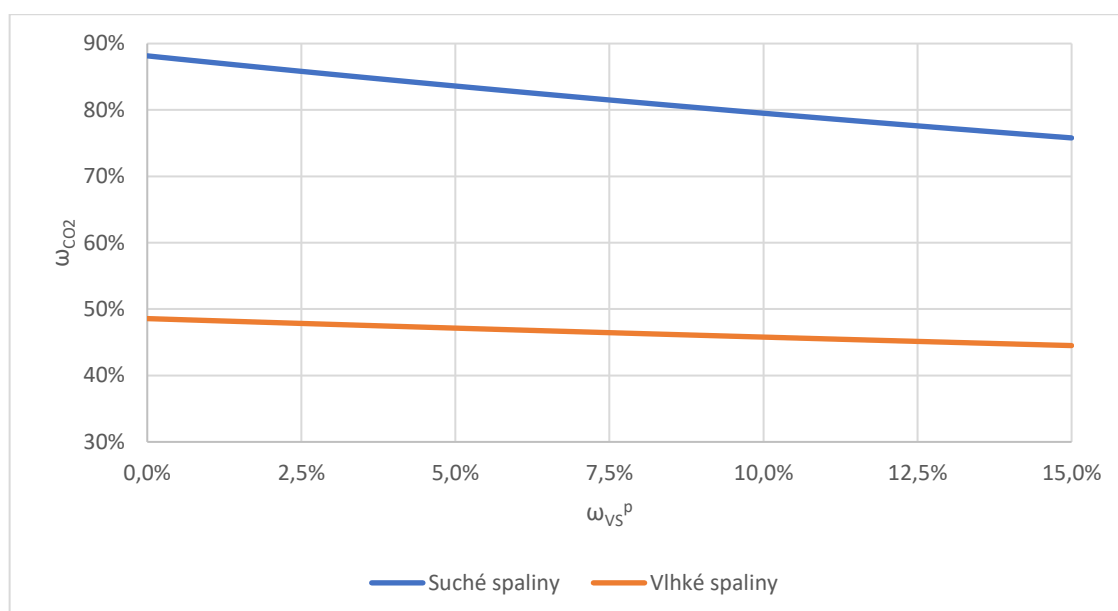
$$O_{H2O} = \frac{22,4}{2 \cdot M^H} \cdot H^r + \frac{22,4}{M^{H2O}} \cdot W^r + (\chi_v - 1) \cdot O_{VS}^p \quad 4.54$$

$$O_{SV} = O_{CO2} + O_{N2} + O_{SO2} + O_{Ar} + O_{O2} + O_{H2O}^S \quad 4.55$$

$$O_{SS} = O_{CO2} + O_{N2} + O_{SO2} + O_{Ar} + O_{O2} \quad 4.56$$

$$\omega_{CO2}^{SV} = \frac{O_{CO2}}{O_{SV}} \quad 4.57$$

$$\omega_{CO2}^{SS} = \frac{O_{CO2}}{O_{SS}} \quad 4.58$$



Obrázek 15: Závislost podílu CO₂ ve spalínách na procentu přísátého vzduchu v okysličovadle

4.2 Recirkulace spalin a adiabatická teplota plamene

Pro dosažení stejné spalovací teploty v oxyfuel a vzduchovém spalování je třeba nastavit správnou míru recirkulace spalin. Jelikož je složení fluidačních médií u obou režimů velmi odlišné, budou bez správného nastavení recirkulace spalin teploty nechlazeného plamene taky výrazně jiné. Spalování v prostředí samotného kyslíku by vedlo k výraznému navýšení teploty nechlazeného plamene. Role dusíku ve vzduchu musí být v oxyfuel režimu plněna recirkulovanými spalinami. Kotle tedy kromě kyslíku prochází i značné množství recirkulovaných spalin. Celkový objem spalin v kotli bude pak součtem spalin recirkulovaných a množství spalin produkovaných spalováním paliva (4.59). Míra recirkulace je dána recirkulačním koeficientem r (4.60). Pro modelový výpočet, pokračující z předchozích podkapitol, je tento koeficient ve vzduchovém režimu uvažován nulový a u oxyfuelu je volen tak, aby se teploty nechlazeného plamene obou případů shodovaly. Teplo uvolněné ve spalovací komoře je dáno součtem výhřevnosti paliva, tepla přivedeného v oksyličovadle a tepla v recirkulovaných spalinách 4.61. Teplo přivedené ve vzduchu při vzduchovém a v kyslíku při oxyfuel spalování se vypočítá podle vztahu 4.62, respektive 4.63. Teplota oksyličovadla je uvažována 25 °C. Teplo přivedené v recirkulovaných spalinách se získá ze vztahu 4.64, uvažovaná teplota spalin je pro výpočet volena 200 °C. V těchto vztazích i_i značí měrné entalpie složek při dané teplotě.

$$O_{S,celkem} = O_{Sr} + O_{SV} \quad 4.59$$

$$O_{Sr} = r \cdot O_{SV} \quad 4.60$$

$$Q_u = Q_i^r + Q_{V/O_2} + Q_{Sr} \quad 4.61$$

$$Q_{VV} = O_{VSmin} \cdot \alpha \cdot i_{VS} + O_V^{H_2O} \cdot \alpha \cdot i_{H_2O} \quad 4.62$$

$$Q_{O_2} = \alpha \cdot O_{O_2min} \cdot i_{O_2} \quad 4.63$$

$$Q_{Sr} = r \cdot (O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} + O_{O_2} \cdot i_{O_2} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}) \quad 4.64$$

Entalpie nechlazeného plamene je pak závislá na teple uvolněném ve spalovací komoře a recirkulačním koeficientu (4.65). Vyjádřením ze vztahů 4.65 a 4.61 je zřejmé, že míra recirkulace pro oxyfuel spalování závisí na výhřevnosti paliva, teple přivedeném ve vzduchu a spalinách a na entalpii nechlazeného plamene. Teplo přivedené v recirkulovaných spalinách ovšem také závisí na míře recirkulace. Pokud však předpokládáme, že platí 4.60, tedy teplo z recirkulovaných spalin je r -krát větší než teplo v produkovaných spalinách o stejné teplotě, lze závislost míry recirkulace vyjádřit jako 4.66. Entalpie nechlazeného plamene závisí na teplotě nechlazeného plamene a tato závislost má obecně tvar $I_{np} = a \cdot t_{np}^2 + b \cdot t_{np} + c$. V případě vzduchového spalování není uvažována žádná recirkulace, lze tedy přímo vypočítat entalpii nechlazeného plamene. Pro konkrétní přebytek oksyličovadla byl sestaven I-t diagram (Obrázek 16) tak, že ze znalosti složení spalin a přebytku byly vypočteny body při známých teplotách, respektive měrných entalpiích složek spalin (4.67-4.69), které byly proloženy křivkou. [21] Z kvadratického předpisu křivky (4.70) byla teplota nechlazeného plamene vypočtena jako nezáporný kořen. Tato teplota má být zachována i pro oxyfuel režim, proto

byla dosazena do předpisu křivky pro toto spalování (4.71). Takto byla získána entalpie nechlazeného plamene a z rovnice 4.66 recirkulační koeficient pro oxyfuel spalování. Vypočtené hodnoty jsou v tabulce 11. Kromě vypočtených hodnot tabulka obsahuje také podíly oksyličovadla ω_{ox} a recirkulovaných spalin ω_{Sr} v celkovém toku fluidačního média, které jsou vypočteny podle vztahů 5.7.

$$I_{np} = \frac{Q_u}{1+r} \quad 4.65$$

$$r = \frac{Q_i + Q_{O_2} - I_{np}}{I_{np} - Q_{SV}} \quad 4.66$$

$$I_{Smin}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_{\dot{u}} \cdot A^r \cdot i_{pop}^t \quad 4.67$$

$$I_{Vmin}^t = O_{VSmin} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^v \cdot i_{H_2O}^t \quad 4.68$$

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad 4.69$$

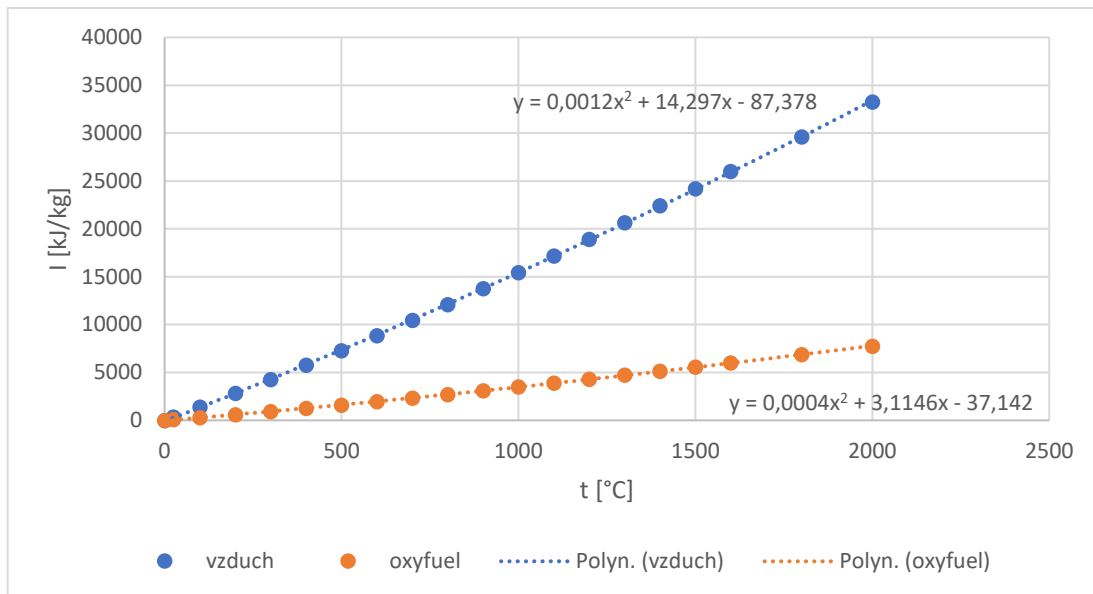
$$I_{np,vzduch} = 0,0012 \cdot t^2 + 14,297 \cdot t - 87,378 \quad 4.70$$

$$I_{np,oxyfuel} = 0,0004 \cdot t^2 + 3,1146 \cdot t - 37,142 \quad 4.71$$

$$\omega_{Sr} = \frac{O_{Sr}}{O_{ox} + O_{Sr}} ; \omega_{ox} = \frac{O_{ox}}{O_{ox} + O_{Sr}} \quad 4.72$$

Tabulka 11: Recirkulace spalin

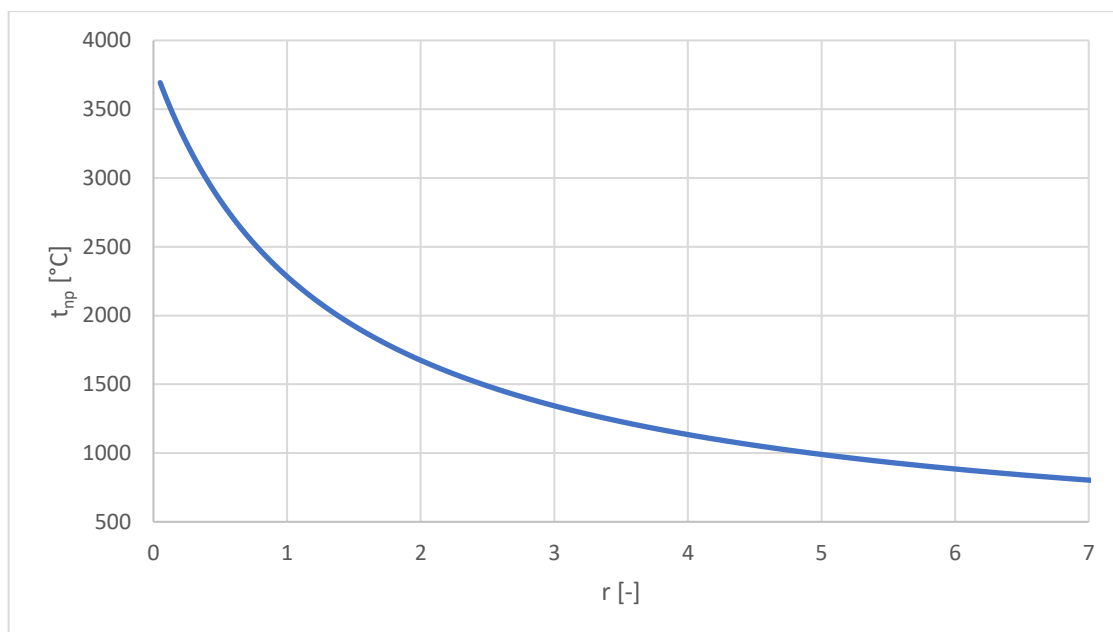
	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
$r [-]$	0,00	3,90
$O_{SV} [Nm^3/kg]$	10,218	1,821
$O_{Sr} [Nm^3/kg]$	0,000	7,105
$O_{S,celkem} [Nm^3/kg]$	10,218	8,926
$Q_i [kJ/kg]$	17 709	17 709
$Q_v [kJ/kg]$	311	-
$Q_{O_2} [kJ/kg]$	-	35
$Q_{Sr} [kJ/kg]$	0	2 314
$Q_u [kJ/kg]$	18 019	20 057
$I_{np} [kJ/kg]$	18 019	4 092
$t_{np} [^\circ C]$	1 154,6	1 154,6
$\omega_{Sr} [\%]$	0	86,45
$\omega_{ox} [\%]$	100	13,55



Obrázek 16: I-t diagram pro oba režimy spalování

Z I-t diagramů pro oba režimy (Obrázek 16) je patrný rozdílný průběh závislostí, kdy pro vzduchové spalování pro stejnou teplotu nechlazeného plamene odpovídá několiknásobně větší měrná entalpie.

Závislost teploty nechlazeného plamene na recirkulačním koeficientu pro oxyfuel spalování vycházející ze vztahů 4.66 a 4.71 je vynesena na obrázku 17.



Obrázek 17: Závislost teploty nechlazeného plamene oxyfuel spalování na recirkulačním koeficientu

4.3 Fluidační rychlosti

Pro vypočtení mezní rychlosti fluidace je zapotřebí znát vlastnosti částic materiálu fluidní vrstvy. Mezi tyto parametry patří hustota částic a jejich střední průměr. Dále je nutno znát sféricitu částic ϕ_p , což je vlastnost, udávající jak moc částice odpovídají kulovému tvaru. A v neposlední řadě je třeba znát mezerovitost ε , tedy část celkového objemu fluidní vrstvy připadající na prázdný prostor. Ta je spočtena vztahem 5.7 ze známé objemové hmotnosti vrstvy a hustoty částic. Uvažovaným materiálem fluidní vrstvy je LWA 0-2. Jde o lehké kamenivo z expandovaného jílu, jehož složení se může mírně lišit. Typické složení je SiO₂ 55±5 %, Al₂O₃ 24±5 %, Fe₂O₃ 14±5 %, CaO 5±5 % a další prvky 2±2 %. Uvažované hodnoty uvádí Tabulka 12. [25]

Tabulka 12: Parametry fluidní vrstvy

ρ_p	1088	kg/m ³
ρ_b	570	kg/m ³
ε	0,4761	-
d_p	0,00107	m
ϕ_p	0,85	-

4.3.1 Vzduchové spalování

Fluidačním médiem při vzduchovém spalování je vlhký vzduch. K využití Ergunovy rovnice (4.73) ke zjištění mezní rychlosti fluidace je zapotřebí u tohoto média znát hustotu a dynamickou viskozitu. Tyto termodynamické vlastnosti byly získány z knihovny Coolprop při teplotě 850 °C a tlaku 0,1 MPa (Tabulka 13). Re_p v Ergunově rovnici odpovídá Reynoldsovu číslu pro částice, které se vypočte dle rovnice 4.74. Ar pak odpovídá Archimedovu číslu (4.75). Jedinou neznámou tak v rovnici zůstává prahová rychlost fluidace u_{mf} , která se vypočte jako nezáporný kořen kvadratické rovnice. Druhá důležitá rychlost z pohledu fluidace je rychlost úletová, která se vypočte ze vztahu 4.76. C_D je koeficient odporu.

$$\frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \phi_p} \cdot Re_p^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \phi_p^2} \cdot Re_p = Ar \quad 4.73$$

$$Re_p = \frac{d_m \cdot u_{mf} \cdot \rho_{VV}}{\mu_{VV}} \quad 4.74$$

$$Ar = \frac{d_m^3 \cdot \rho_{VV} \cdot (\rho_p - \rho_{VV}) \cdot g}{\mu_{VV}^2} \quad 4.75$$

$$u_t = \frac{(4 \cdot d_p \cdot \rho_p - \rho_{VV}) \cdot g}{3 \cdot \rho_{VV} \cdot C_D} \quad 4.76$$

Tabulka 13: Hustota a dynamická viskozita vlhkého vzduchu

ρ_{VV}	0,30817	kg/m ³
μ_{VV}	4,6608 · 10 ⁻⁵	Pa · s

4.3.2 Oxyfuel spalování

Fluidační médium je při uvažovaném oxyfuel spalování tvořeno dílem dodávaným kyslíkem (13,6 %) a dílem recirkulovanými spalinami (86,4 %), jak uvádí Tabulka 11. K výpočtu prahové rychlosti fluidace je opět využita Ergunova rovnice (4.73). Hustoty a dynamické viskozity složek fluidačního média byly odečteny z knihovny Coolprop pro 850 °C a 1 MPa a z nich byly získány hodnoty pro tuto směs (Tabulka 14). Reynoldsovo (4.77) a Archimedovo číslo (4.78) je určeno ze znalosti těchto vlastností. Mezní rychlost je pak opět získána jako nezáporný kořen kvadratické rovnice. Úletová rychlost je pak vypočtena podle rovnice 4.76.

$$Re_p = \frac{d_m \cdot u_{mf} \cdot \rho_{ox}}{\mu_{ox}} \quad 4.77$$

$$Ar = \frac{d_m^3 \cdot \rho_{ox} \cdot (\rho_p - \rho_{ox}) \cdot g}{\mu_{ox}^2} \quad 4.78$$

Tabulka 14: Hustota a dynamická viskozita fluidačního média při oxyfuel spalování

ρ_{ox}	0,33717 kg/m ³
μ_{ox}	4,533 · 10 ⁻⁵ Pa · s

4.3.3 Vypočtené hodnoty

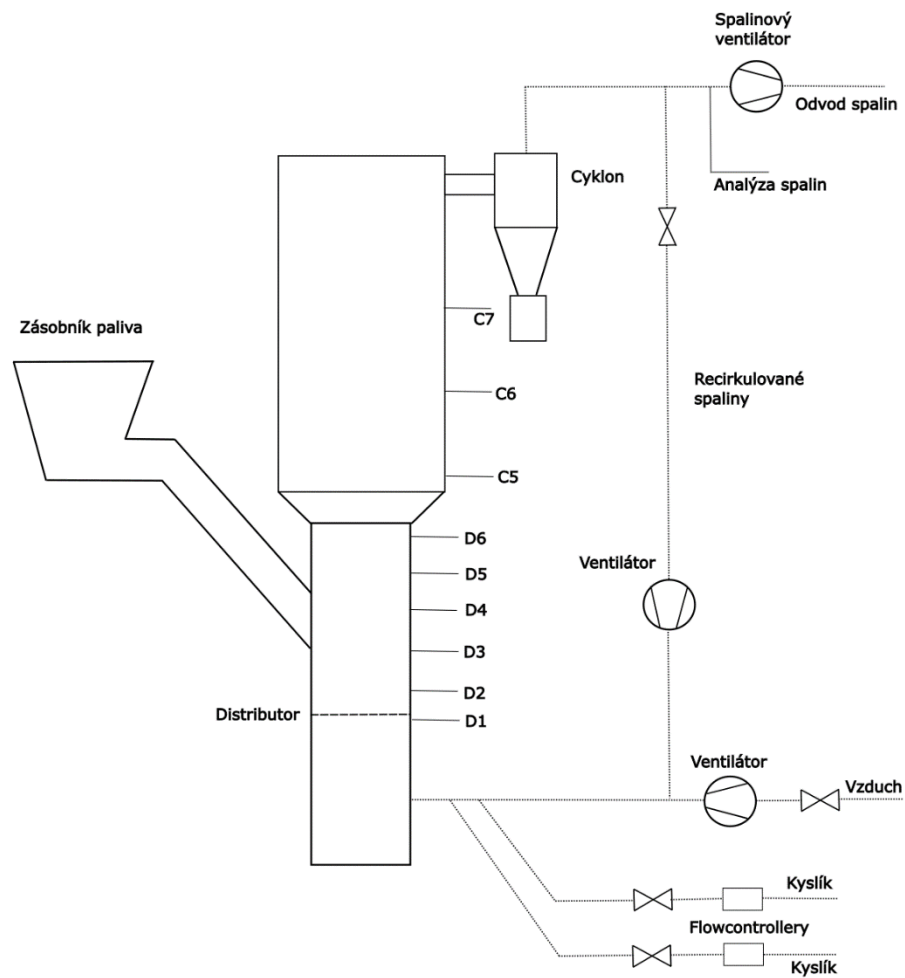
Z výše uvedených vztahů byly vypočteny prahové rychlosti fluidace pro oba režimy. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 15. Z hodnot je patrné, že mezní rychlost vychází pro oxyfuel o něco vyšší (přibližně o 3 %).

Tabulka 15: Vypočtené prahové rychlosti fluidace

	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
$Re_p [-]$	1,780	2,048
$Ar [-]$	1 854	2 145
$C_D [-]$	0,68	0,68
$u_{mf} [m/s]$	0,2504	0,2574
$u_t [m/s]$	8,5231	8,1483

5 Měření spalování ve vzduchovém a oxyfuel režimu

Měření probíhalo v halových laboratořích ČVUT v Praze na Julisce. Všechny režimy byly nastavovány na experimentálním zařízení MiniFluid. Zařízení je na fotografii na obrázku 19, jeho zjednodušené schéma ukazuje obrázek 18. Jde o fluidní kotel o výkonu 30 kW. Lze v něm spalovat biomasu i uhlí. Kotel lze provozovat jak ve vzduchovém, tak i v čistém oxyfuel režimu. Spalovací komora má rozměry 225 x 150 mm, v její spodní části se nachází 25 kloboučkových trysek. Výška zařízení je 2,8 m.



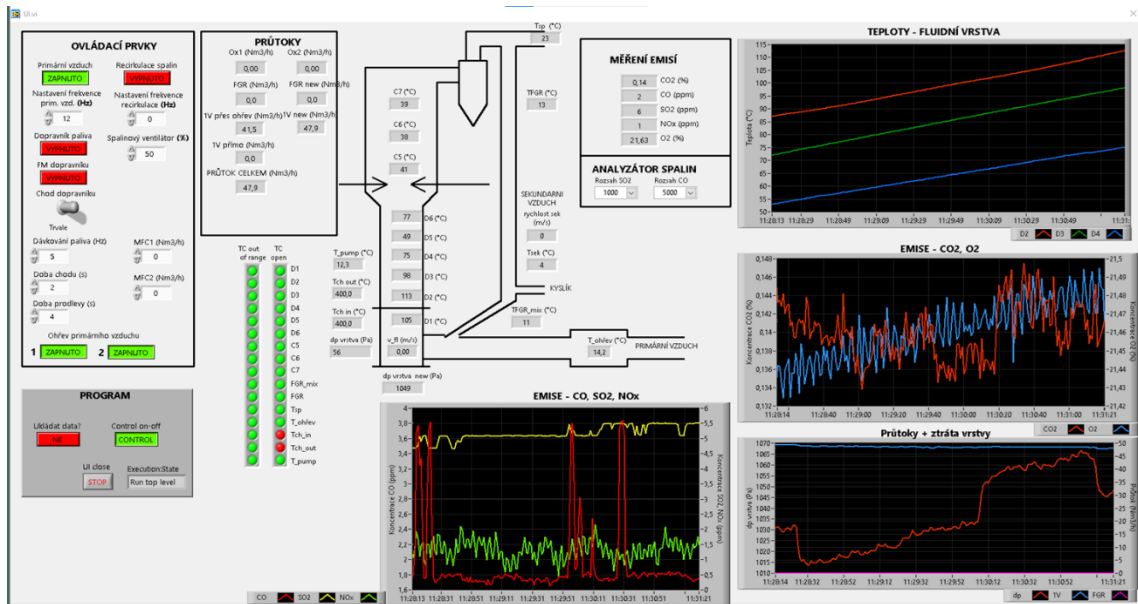
Obrázek 18: Schéma fluidního kotle MiniFluid



Obrázek 19: Fluidní kotel MiniFluid

Spalování je řízeno programem v přítomném počítači, přičemž ovládacími prvky jsou nastavení frekvence primárního vzduchu, frekvence recirkulovaných spalin a frekvence dávkování paliva. Průtoky vzduchu, recirkulovaných spalin, kyslíku a také celkový průtok jsou kontinuálně měřeny a řízeny pomocí flowcontrollerů MFC 8626 Bürkert. Pro oxyfuel režim je uzavřen přívod primárního vzduchu a do recirkulovaných spalin je přiváděn kyslík. Dávkování paliva je řízeno frekvenčním měničem. Palivo je ze zásobníku přepravováno pomocí šneku, dále pak podavačem dodáváno do spalovací komory.

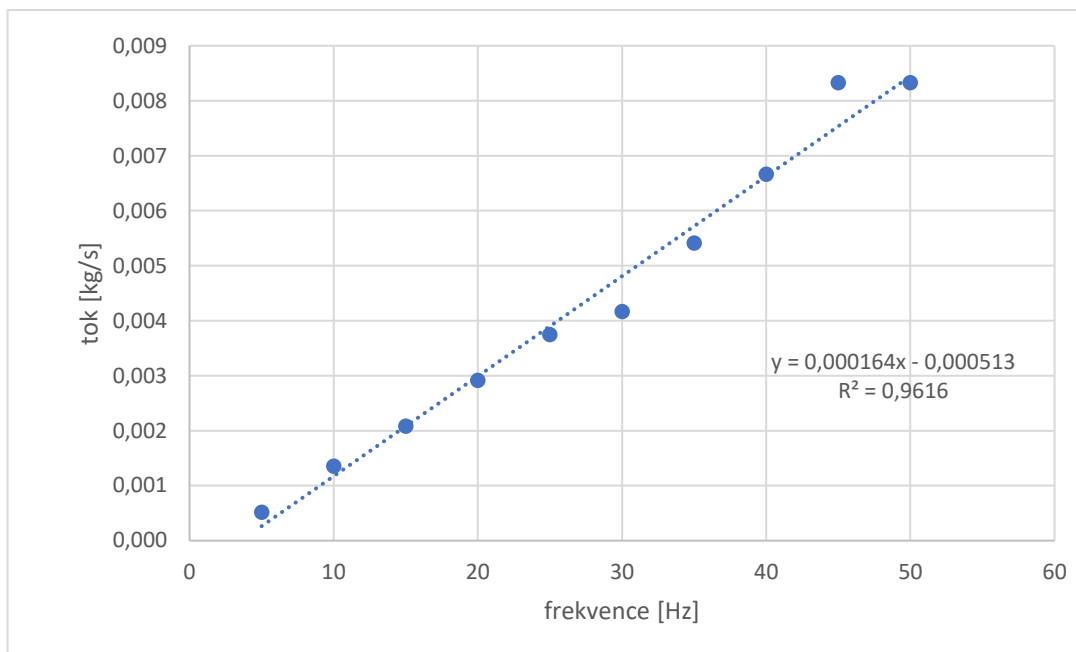
Během spalování dochází ke kontinuálnímu měření teplot v profilu spalovací komory pomocí termočlánků (D1-D6, C5-C7 v obrázku 18), emisí CO_2 , O_2 , CO , SO_2 a NO_x na výstupu, a také tlakové ztráty ve vrstvě. Kyslík ve spalinách je měřen statickou paramagnetickou metodou. Použitý analyzátor byl M&C PMA12. Zbylé emise jsou pak měřeny opticky, pomocí IR záření. Oxid uhličitý byl měřen zařízením Fuji ZRJ. Emise CO , NO_x a SO_2 byly měřeny zařízením Hartmann & Braun Uras 10E. Měření těchto parametrů je možno využít při řízení režimů spalování pro korigování ovládacích prvků k dosažení žádaných stavů. Náhled ovládacího rozhraní před započnutím experimentů je na obrázku 20.



Obrázek 20: Rozhraní ovládacího programu pro kotel MiniFluid

5.1 Metodika měření

Před zahájením samotného měření je třeba provést kalibraci dávkování paliva. Používané palivo jsou dřevní pelety o složení uvedeném v tabulce 2. V ovládacím rozhraní je dodávání paliva řízeno frekvencí frekvenčního měniče, je tedy nutno zjistit závislost hmotnostního toku paliva na zadané frekvenci. Postupně je frekvence o 5 Hz zvyšována. Frekvence 5 Hz, a poté i 10 Hz, je nastavena na 4 minuty, přičemž palivo dodávané šnekem je odebíráno. Po uplynutí tohoto časového intervalu je zváženo dodané palivo, navráceno do zásobníku paliva, frekvence o 5 Hz navýšena a měření opakováno. Od frekvence 15 Hz výše je časový interval zkrácen na 2 minuty, měření jinak probíhá stejně až po 50 Hz. Ze znalosti hmotnosti dodaného paliva i časového intervalu během něhož je dodáváno, lze spočítat hmotnostní tok v těchto měřených bodech. Body jsou vyneseny do grafu v závislosti na nastavené frekvenci (Obrázek 21) a proloženy přímkou, jejíž předpis 5.1 bude využit pro stanovení hmotnostního toku paliva v konkrétních režimech. Lineární aproximaci přímkou byla stanovena dokonalost vyjádřená determinančním indexem R^2 (5.2).



Obrázek 21: Závislost hmotnostního toku paliva na nastavené frekvenci

$$\dot{m}_{pal} = 0,000164 \cdot f - 0,000513 \quad 5.1$$

$$R^2 = 0,9616 \quad 5.2$$

Jako materiál fluidní vrstvy je používán keramzit o vlastnostech uvedených v tabulce 12 a uvažovaných již ve výpočtovém modelu. Materiálu je do fluidní vrstvy odváženo 3,75 kg. Materiál je po zvážení vsypán do spalovací komory.

Měření ve vzduchovém i oxyfuel spalování je prováděno ve čtyřech režimech, které jsou po jejich ustálení kontinuálně měřeny po dobu 30 minut. Měřené hodnoty jsou ukládány každou sekundu. Sledovanými parametry pro řízení spalovacího procesu je koncentrace kyslíku v suchých spalínách a teplota ve fluidní vrstvě. Teplota fluidní vrstvy je důležitá pro to, aby nedocházelo k tavení popelovin, popřípadě k poškození zařízení. Teplota ve vrstvě je tedy korigována, aby nedosáhla hodnoty 1000 °C. Koncentrace kyslíku v suchých spalínách je nastavována pro vzduchový i oxyfuel režim na stejnou hodnotu pomocí objemového toku okysličovačla, recirkulovaných spalín a frekvence dávkování paliva. Měření je prováděno pro čtyři různé koncentrace kyslíku, které jsou voleny 3, 6, 9 a 12 %. V momentě ustálení stavu (teploty, koncentrací) je zahájeno měření, na jeho konci je odebrán vzorek úletu z cyklonu a vzorek vrstvy. Odběr z fluidní vrstvy musí být odebrán v prostředí argonu bez přístupu vzduchu, aby z důvodu teploty ve vrstvě nedošlo k dohoření zbytků paliva. Pro přehlednost budou měřené stavy vzduchového i oxyfuel spalování označeny A-D podle nastavované koncentrace kyslíku ve spalínách.

Stavy A i B vzduchového režimu jsou korigovány recirkulací spalin, aby bylo možné udržet fluidaci při dostatečně nízkém toku vzduchu. Ve stavech C a D už tok vzduchu k dosažení požadovaných parametrů stačí a recirkulace není nutná. Kromě recirkulace jsou všechny režimy vzduchového spalování řízeny množstvím přiváděného vzduchu a paliva. Režimy oxyfuel spalování jsou řízeny tak, že do spalovací komory není přiváděn vzduch a pomocí flowcontrollerů měřících průtok je do recirkulovaných spalin přiváděn kyslík.

Na vzorcích odebraných z cyklonu a z vrstvy je udělán rozbor, aby bylo zjištěno množství nevyhořelé hořlaviny. Odebrané vzorky jsou homogenizovány, odsypány do mističky a zváženy. Z odběrů je nejprve vysušena voda. To je prováděno v sušičce, do které jsou vzorky umístěny na jednu hodinu při teplotě 110 °C. Vzorek je tímto zbaven vlhkosti, následně znovu zvážen v bezvodém stavu. Z tohoto vysušeného vzorku je část vzata, zvážena a vložena do pece při teplotě 815 °C. Tam je po dobu jedné hodiny vzorek podroben této teplotě, přičemž dochází k vyhoření zbylého paliva. Následně je vzorek znovu zvážen a z rozdílu této hmotnosti a hmotnosti před vložením do pece je zjištěna hmotnost nevyhořelého paliva. Ze získaných hodnot během rozboru, kterými jsou obsah nevyhořelého kyslíku ve zbytcích a z jejich poměrného rozdělení budou vypočteny ztráty v tuhých zbytcích podle vztahu 4.22.

Hodnota přebytků okysličovadla je určována ze znalosti hmotnostního toku paliva a toku okysličovadla do kotle a z minimálního objemu spalovacího vzduchu, respektive minimálního objemu spalovacího kyslíku (5.3). Průtok kyslíku je řízen 2 flowcontrollery, celkový průtok je dán součtem obou průtoků Q_{Ox1} a Q_{Ox2} . Pro vzduchový režim lze zjišťovat přebytek i ze změřených koncentrací kyslíku (5.4) a oxidu uhličitého (5.5). Pro další výpočty bude uvažována hodnota vycházející z rovnice 5.3, jelikož ji lze použít pro všechny režimy včetně oxyfuel. Ostatní způsoby budou využity k ověření vycházející hodnoty.

$$\alpha = \frac{Q_{VV}}{\dot{m}_{pal}} ; \alpha = \frac{Q_{Ox1} + Q_{Ox2}}{O_{O2min}} \quad 5.3$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - \omega_{O2}} \quad 5.4$$

$$\alpha = 1 + \left(\frac{O_{CO2}}{O_{SSmin} \cdot \omega_{CO2}} - 1 \right) \cdot \frac{O_{SSmin}}{O_{VSmin}} \quad 5.5$$

Měrné objemy spalin a jejich složek se vypočítají ze známého přebytku, minimálních objemů a měřených koncentrací, jak bylo ukázáno v kapitole 4.1. Recirkulační koeficient bude vypočten z měřeného objemu recirkulovaných spalin a spočítaného vznikajícího objemu spalin. Ze známé koncentrace oxidu uhelnatého a ztráty v tuhých zbytcích lze dopočítat i ztrátu v chemickém nedopalu podle 4.23.

Z objemu recirkulovaných spalin a objemu okysličovadla je zjištěno poměrné rozdělení toku mezi tyto dvě média. Známé průtoky fluidačních médií jsou podle teploty na distributoru (střední hodnota z teplot D2, D3 a D4 ze schématu na obrázku 18) přepočteny z normálních

metrů krychlových na metry krychlové (5.6, tlak uvažován barometrický) a podělením průřezem komory je získána mimovrstvová rychlost fluidace (5.7).

$$Q_{fluid} = (Q_{ox} + Q_{Sr}) \cdot \frac{T}{273,15} \cdot \frac{101\,325}{p} \quad 5.6$$

$$u = \frac{Q_{fluid}}{A} \quad 5.7$$

Do excelového modelu jsou následně dosazeny shodné hodnoty koncentrace kyslíku, které byly v experimentu měřeny, toky paliva a recirkulační koeficienty byly také zachovány. Takto spočtené modelové výpočty jsou následně porovnány s hodnotami vycházejícími přímo z experimentu.

Z měřených koncentrací polutantů ve spalínách jsou vypočteny emisní faktory. Emisní faktory nám říkají, kolik se uvolní dané látky při spalování měrně vztaženo na jednotkové množství paliva (MJ, kg). K výpočtu emisních faktorů je zapotřebí přepočítat naměřené objemové koncentrace na hmotnostní koncentrace (5.8). Emisní faktor vztažený na hmotnost paliva se pak získá vynásobením této hmotnostní koncentrace s měrným objemem produkovaných suchých spalín (5.9). Pokud bychom takto vypočtenou hodnotu vydělili výhřevností paliva, získali bychom emisní faktor vztažený na výhřevnost, se započtením účinnosti by pak emisní faktor mohl být vztažen na vyrobené teplo. Emisní faktory budou počítány pro základní plynné polutanty, mezi které patří oxid uhelnatý, oxid siřičitý a oxidy dusíku.

$$\rho_i = \omega_i \cdot \frac{p_N \cdot M_i}{R \cdot T_N} \left[\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right] \quad 5.8$$

$$EF_{mass}^i = \rho_i \cdot O_{SS} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \right] \quad 5.9$$

5.2 Naměřené hodnoty

5.2.1 Tok paliva

Tabulka 16 uvádí naměřené hodnoty z kalibrace dodávání paliva. Data byla využita k aproximaci závislosti toku paliva na frekvenci v obrázku 21.

Tabulka 16: Měření toku dodávaného paliva

Frekvence [Hz]	Hmotnost [kg]	Čas měření [s]
5	0,15	240
10	0,35	240
5	0,05	120
10	0,15	120
15	0,25	120
20	0,35	120
25	0,45	120
30	0,50	120
35	0,65	120
40	0,40	60
45	0,50	60
50	0,50	60

5.2.2 Koncentrace kyslíku ve spalínách

V tabulce 17 jsou uvedeny střední hodnoty měřené koncentrace kyslíku v suchých spalínách pro všechny režimy. V tabulce jsou rovněž uvedeny směrodatné odchylky těchto hodnot.

Tabulka 17: Střední hodnoty koncentrace kyslíku v suchých spalínách v %

Stav	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
A	2,439	0,713	2,680	0,790
B	6,090	0,553	6,052	1,816
C	9,127	0,236	9,433	1,217
D	11,962	0,162	11,967	1,160

5.2.3 Teploty fluidní vrstvy

Teplota je snímána v profilu spalovací komory pomocí termočlánků. Rozložení snímaných teplot je zřejmé ze schématu na obrázku 18. V tabulce 18 jsou střední hodnoty měřených teplot pro stav A v obou režimech, v tabulce 19 pro stav B, tabulce 20 pro stav C a tabulce 21 pro stav D. Průběhy teplot v čase jsou v příloze.

Tabulka 18: Rozložení teplot ve spalovací komoře ve stavu A

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
D1 [°C]	88,90	3,16	128,44	3,46
D2 [°C]	828,40	8,21	849,69	5,64
D3 [°C]	882,17	8,84	896,96	3,89
D4 [°C]	884,73	8,95	903,34	3,60
D5 [°C]	891,56	8,42	910,56	3,17
D6 [°C]	882,70	8,33	901,64	1,89
C5 [°C]	863,93	12,48	915,66	2,88
C6 [°C]	838,22	20,56	901,77	6,76
C7 [°C]	796,46	20,79	850,48	8,49

Tabulka 19: Rozložení teplot ve spalovací komoře ve stavu B

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
D1 [°C]	69,44	2,43	139,48	1,68
D2 [°C]	813,23	10,93	876,80	4,25
D3 [°C]	879,78	8,20	929,93	3,57
D4 [°C]	879,78	7,50	932,26	2,27
D5 [°C]	883,67	7,15	937,67	1,50
D6 [°C]	871,52	7,34	923,40	1,54
C5 [°C]	833,34	8,79	920,15	6,72
C6 [°C]	814,64	11,22	900,55	5,65
C7 [°C]	779,81	10,06	851,27	4,37

Tabulka 20: Rozložení teplot ve spalovací komoře ve stavu C

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
D1 [°C]	67,10	0,77	142,73	0,44
D2 [°C]	788,98	6,20	838,73	9,50
D3 [°C]	874,11	2,97	898,18	6,81
D4 [°C]	871,38	2,48	902,04	5,90
D5 [°C]	873,84	2,63	906,82	5,57
D6 [°C]	856,62	2,37	889,10	6,91
C5 [°C]	800,11	2,15	871,34	10,06
C6 [°C]	773,09	1,65	853,06	11,36
C7 [°C]	740,23	1,72	810,96	10,82

Tabulka 21: Rozložení teplot ve spalovací komoře ve stavu D

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
D1 [°C]	60,79	0,75	141,19	0,13
D2 [°C]	773,34	5,08	836,03	3,36
D3 [°C]	859,69	4,16	901,45	1,60
D4 [°C]	856,91	3,44	903,59	1,06
D5 [°C]	856,91	3,50	906,48	1,42
D6 [°C]	837,80	3,92	884,28	1,89
C5 [°C]	772,49	4,70	849,78	3,99
C6 [°C]	745,82	5,81	825,26	3,40
C7 [°C]	714,44	5,25	783,38	3,33

5.2.4 Toky médií

Jak bylo uvedeno v metodice experimentu, spalování je řízeno toky médií. Ty jsou průběžně měřeny pomocí průtokoměrů. Tabulka 22 obsahuje střední hodnoty měřených toků včetně směrodatné odchylky stavu A ve vzduchovém režimu. Symboly Q_{Ox1} a Q_{Ox2} označují průtoky spalovacího kyslíku pro oba flowcontrollery, celkový průtok tohoto kyslíku je jejich součet.

Tabulka 22: Měřené toky médií ve stavu A ve vzduchovém režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Q_{Vv} [Nm ³ /h]	44,8173	0,7773
Q_{Sr} [Nm ³ /h]	27,4714	0,7795
Q_{Ox1} [Nm ³ /h]	0,0000	0,0000
Q_{Ox2} [Nm ³ /h]	0,0000	0,0000

Tabulka 23 uvádí střední hodnoty měřených toků a jejich směrodatnou odchylku pro stav A v oxyfuel režimu.

Tabulka 23: Měřené toky médií ve stavu A v oxyfuel režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Q_{Vv} [Nm ³ /h]	0,0000	0,0000
Q_{Sr} [Nm ³ /h]	50,6992	0,0556
Q_{Ox1} [Nm ³ /h]	5,9916	0,0010
Q_{Ox2} [Nm ³ /h]	1,3477	0,0891

V tabulce 24 jsou uvedeny střední toky médií ve stavu B ve vzduchovém režimu a v tabulce 25 v režimu oxyfuel.

Tabulka 24: Měřené toky médií ve stavu B ve vzduchovém režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$Q_{VV} [Nm^3/h]$	54,0176	1,4773
$Q_{Sr} [Nm^3/h]$	20,2635	1,5638
$Q_{ox1} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000
$Q_{ox2} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000

Tabulka 25: Měřené toky médií ve stavu B v oxyfuel režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$Q_{VV} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000
$Q_{Sr} [Nm^3/h]$	52,0527	0,3126
$Q_{ox1} [Nm^3/h]$	5,9914	0,0010
$Q_{ox2} [Nm^3/h]$	1,5833	0,0258

Tabulka 26 uvádí měřené toky ve stavu C pro vzduchové spalování, Tabulka 27 pak oxyfuel spalování v témže stavu.

Tabulka 26: Měřené toky médií ve stavu C ve vzduchovém režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$Q_{VV} [Nm^3/h]$	57,8041	0,6455
$Q_{Sr} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000
$Q_{ox1} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000
$Q_{ox2} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000

Tabulka 27: Měřené toky médií ve stavu C v oxyfuel režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$Q_{VV} [Nm^3/h]$	0,0000	0,0000
$Q_{Sr} [Nm^3/h]$	53,4006	0,0704
$Q_{ox1} [Nm^3/h]$	5,9911	0,0014
$Q_{ox2} [Nm^3/h]$	0,8699	0,0464

V tabulce 28 jsou uvedeny střední hodnoty měřených toků pro stav D ve vzduchovém režimu a v tabulce 29 v oxyfuel režimu.

Tabulka 28: Měřené toky médií ve stavu D ve vzduchovém režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Q_{VV} [Nm^3/h]	71,5747	0,1126
Q_{Sr} [Nm^3/h]	0,0000	0,0000
Q_{ox1} [Nm^3/h]	0,0000	0,0000
Q_{ox2} [Nm^3/h]	0,0000	0,0000

Tabulka 29: Měřené toky médií ve stavu D v oxyfuel režimu

Veličina	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Q_{VV} [Nm^3/h]	0,0000	0,0000
Q_{Sr} [Nm^3/h]	53,4158	1,1371
Q_{ox1} [Nm^3/h]	5,9914	0,0011
Q_{ox2} [Nm^3/h]	1,0833	0,0830

5.2.5 Emise

Střední hodnoty měřených emisí s jejich směrodatnou odchylkou jsou pro stav A uvedeny v tabulce 30, pro stav B v tabulce 31, pro stav C v tabulce 32 a pro stav D v tabulce 33. Průběhy emisí v čase vynesené do grafu jsou pak v příloze.

Tabulka 30: Střední hodnoty emisí v obou režimech ve stavu A

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$\omega_{CO_2^{SS}}$ [%]	19,0238	0,6466	85,2252	0,6809
$\omega_{CO^{SS}}$ [ppm]	137,1243	90,9142	382,5959	386,8964
$\omega_{SO_2^{SS}}$ [ppm]	13,0643	4,8444	64,2429	10,3239
$\omega_{NOX^{SS}}$ [ppm]	91,1108	4,4357	197,1714	17,6457

Tabulka 31: Střední hodnoty emisí v obou režimech ve stavu B

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$\omega_{CO_2^{SS}}$ [%]	13,3879	0,3755	82,2677	1,6102
$\omega_{CO^{SS}}$ [ppm]	67,6726	2,6734	31,9066	11,1475
$\omega_{SO_2^{SS}}$ [ppm]	0,0000	0,0000	47,7421	4,9406
$\omega_{NOX^{SS}}$ [ppm]	89,7958	1,2240	250,4981	14,8629

Tabulka 32: Střední hodnoty emisí v obou režimech ve stavu C

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$\omega_{CO_2}^{SS}$ [%]	11,9256	0,2923	78,2081	1,0183
ω_{CO}^{SS} [ppm]	72,1449	1,5558	29,6607	0,9273
$\omega_{SO_2}^{SS}$ [ppm]	0,0000	0,0000	33,2568	10,4001
ω_{NOX}^{SS} [ppm]	82,3849	1,5040	279,8664	8,8386

Tabulka 33: Střední hodnoty emisí v obou režimech ve stavu D

	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
$\omega_{CO_2}^{SS}$ [%]	9,0340	0,1683	76,0890	1,0839
ω_{CO}^{SS} [ppm]	72,5357	2,2282	32,2797	0,5879
$\omega_{SO_2}^{SS}$ [ppm]	0,0000	0,0000	48,3140	0,5879
ω_{NOX}^{SS} [ppm]	67,6873	1,2173	296,4856	7,2289

5.3 Výsledky a diskuze

Ze známých nastavených frekvencí je možné z předpisu lineární aproximace v obrázku 21 spočítat hmotnostní toky paliva ve všech stavech. Takto spočtené hmotnostní toky jsou uvedeny v tabulce 34.

Tabulka 34: Hmotnostní toky paliva v g/s vypočtené z nastavené frekvence dodávání paliva

Stav	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
A	2,468	2,137
B	2,137	2,110
C	1,972	1,806
D	1,806	1,806

Obsahy uhlíku v odebíraných vzorcích získané z rozboru těchto tuhých zbytků jsou uvedeny v tabulce 35. Využitím vztahu 4.22 lze z obsahů uhlíku vypočítat ztrátu v mechanickém nedopalu. Rozložení je pro tento výpočet uvažováno stejné jako ve výpočtovém modelu v kapitole 4.1.1.

Tabulka 35: Obsah uhlíku v odebíraných vzorcích a ztráta mechanickým nedopalem

Stav	Podíl uhlíku v odběru z cyklonu [%]	Podíl uhlíku v odběru z vrstvy [%]	Z _c [%]
A _{vzduch}	21,95	6,13	0,3304
B _{vzduch}	17,69	0,43	0,1578
C _{vzduch}	14,12	0,11	0,1354
D _{vzduch}	12,42	0,95	0,1182
A _{oxyfuel}	22,30	0,57	0,2107
B _{oxyfuel}	27,26	0,47	0,2693
C _{oxyfuel}	43,07	1,77	0,5615
D _{oxyfuel}	37,87	2,21	0,4690

S využitím hmotnostních toků paliva z tabulky 34 lze měřené objemové toky spalovacího vzduchu při vzduchovém spalování, nebo kyslíku při oxyfuel spalování a recirkulovaných spalin přepočítat na měrné objemy, jak uvádí Tabulka 36. Množství recirkulovaných spalin je v případě oxyfuel režimu značně větší, na druhou stranu objem přiváděného okysličovačla je v jednotlivých stavech 5-10x menší.

Tabulka 36: Měrné objemy spalovacího vzduchu, spalovacího kyslíku a recirkulovaných spalin

Stav	O _{VV} [Nm ³ /kg]	O _{Ox} [Nm ³ /kg]	O _{Sr} [Nm ³ /kg]
A _{vzduch}	5,0433	-	3,0914
A _{oxyfuel}	-	0,9539	6,5896
B _{vzduch}	6,7961	-	2,6342
B _{oxyfuel}	-	0,9970	6,8511
C _{vzduch}	8,1442	-	0,0000
C _{oxyfuel}	-	1,0553	8,2139
D _{vzduch}	11,0093	-	0,0000
D _{oxyfuel}	-	1,0882	8,2162

Ze střední hodnoty koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalinách a objemu vznikajících spalin lze spočítat i ztrátu nedokonalým vyhořením hořlaviny (Tabulka 37). Ztráty chemickým nedopalem ve všech variantách jsou pro oxyfuel menší, to svědčí o dokonalejším vyhořívání oxidu uhelnatého. Ve stavu D je chemický nedopal více než 14x menší než ve vzduchovém režimu. S vypočtenými ztrátami hořlaviny ve spalinách i tuhých zbytcích je možné dopočítat podíl uhlíku v palivu, který nevyhoří dokonale *a* a který nevyhoří vůbec *b*.

Tabulka 37: Ztráty chemickým nedopalem a podíly uhlíku připadající chemický i mechanický nedopal

Stav	Z_{CO} [%]	a [-]	b [-]
<i>A</i> vzduch	0,0559	0,0009141	0,003739
<i>A</i> oxyfuel	0,0464	0,0007598	0,002384
<i>B</i> vzduch	0,0360	0,0005896	0,001786
<i>B</i> oxyfuel	0,0040	0,0000649	0,003047
<i>C</i> vzduch	0,0453	0,0007417	0,001532
<i>C</i> oxyfuel	0,0038	0,0000622	0,006353
<i>D</i> vzduch	0,0604	0,0009872	0,001337
<i>D</i> oxyfuel	0,0042	0,0000690	0,005307

Vydělením měrných objemů spalovacího vzduchu minimálním měrným objemem vlhkého vzduchu spočteného pro vzduchové spalování v kapitole 4.1 se započtením ztrát hořlaviny a vydělením měrných objemů spalovacího kyslíku minimálním měrným objemem pro oxyfuel spalování z téže kapitoly se započtením ztrát lze spočítat hodnoty přebytku okysličovačla pro všechny režimy. Takto vypočtené přebytky jsou uvedeny v tabulce 38. Pro vzduchové spalování je možné spočítat přebytek i z koncentrace kyslíku nebo oxidu uhličitého ve spalinách. Takto spočtené přebytky jsou uvedeny v tabulce 39. Hodnoty vypočtené z koncentrace kyslíku se liší, to je zapříčiněno nepřesností lineární aproximace toku paliva.

Tabulka 38: Přebytky vzduchu a kyslíku spočtené dosazením do bilance

Stav	Vzduchové spalování	Oxyfuel spalování
<i>A</i>	1,103	1,010
<i>B</i>	1,486	1,055
<i>C</i>	1,781	1,117
<i>D</i>	2,407	1,152

Tabulka 39: Přebytky vzduchu u vzduchového spalování spočtené z koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého ve spalinách

Stav	α (ω_{O_2})	α (ω_{CO_2})
<i>A</i>	1,131	1,103
<i>B</i>	1,408	1,486
<i>C</i>	1,769	1,781
<i>D</i>	2,324	2,407

Se známými přebytky α , a tedy i měrnými objemy vlhkých spalin, a s využitím výše uvedených objemů recirkulovaných spalin lze získat recirkulační koeficienty ve všech stavech. Hodnoty recirkulačních koeficientů ve všech případech jsou uvedeny v tabulce 40.

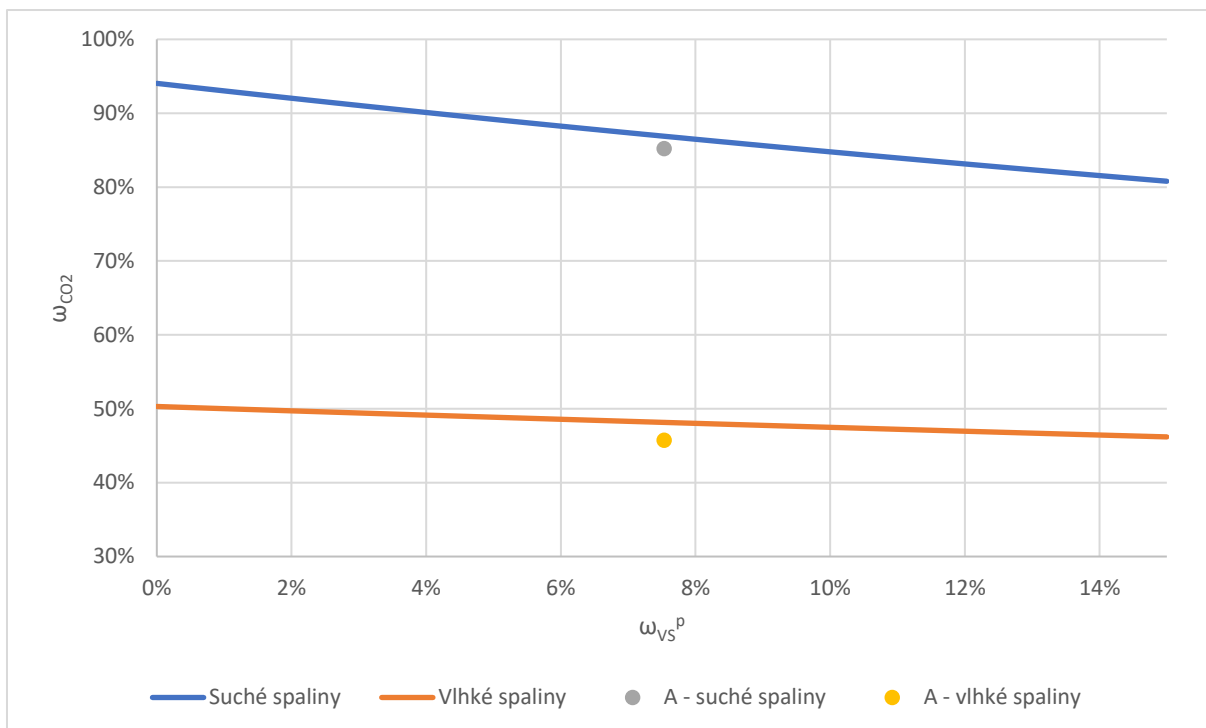
Tabulka 40: Recirkulační koeficienty

Stav	$r [-]$
A_{vzduch}	0,538
$A_{oxyfuel}$	3,851
B_{vzduch}	0,351
$B_{oxyfuel}$	3,906
C_{vzduch}	0,000
$C_{oxyfuel}$	4,532
D_{vzduch}	0,000
$D_{oxyfuel}$	4,452

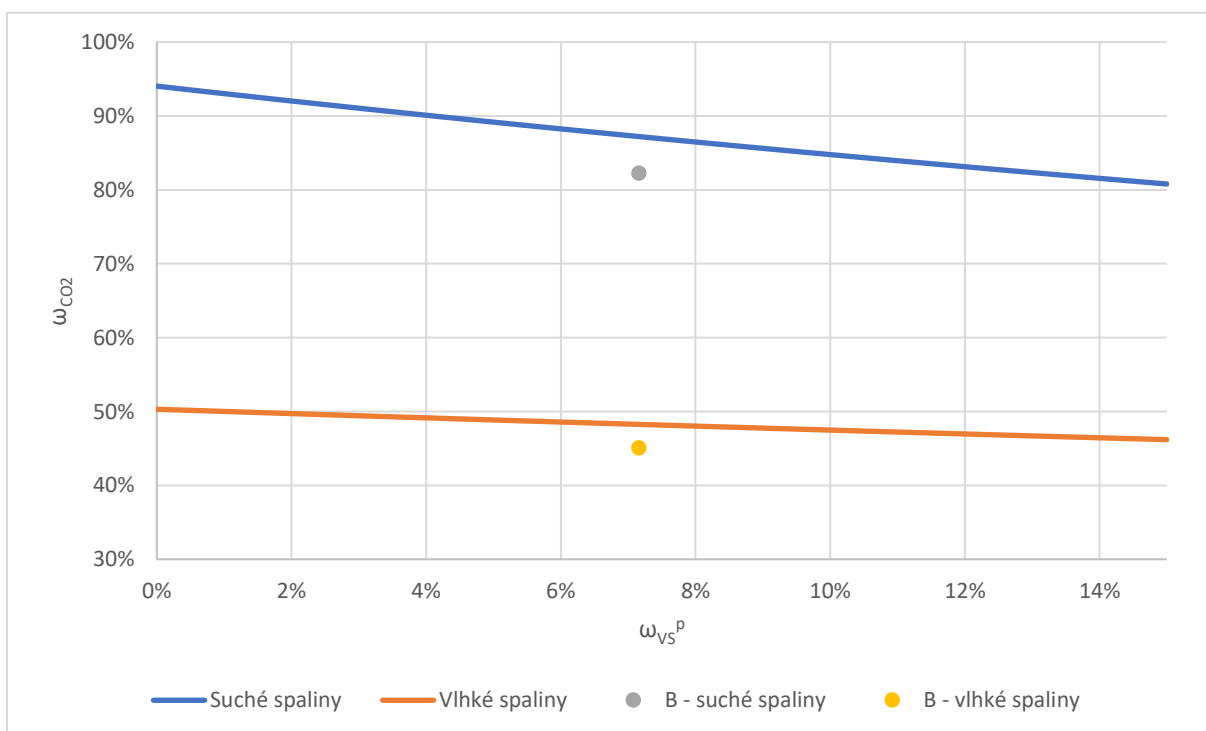
Dusík se do spalin oxyfuel režimu, kromě dílu odpovídajícího obsahu v palivu, dostává z přisátého vzduchu. Díl odpovídající obsahu v palivu se vypočte podle vztahu 4.36. Dusík, který je ve spalinách navíc, se dovnitř dostává v přisátém vzduchu. Se známou koncentrací dusíku v suchém vzduchu lze z tohoto dusíku odvodit množství přisávaného vzduchu. Hodnoty měrných objemů přisátého vzduchu jsou uvedeny v tabulce 41. Kromě nich je v tabulce také uveden podíl tohoto přisátého vzduchu v objemu spalovacího kyslíku. Obrázky 22-25 ukazují modelově vypočtenou závislost koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách na procentu přisátého vzduchu pro jednotlivé stavy oxyfuel režimu. V grafech jsou kromě této závislosti vykresleny reálně měřené koncentrace s odpovídajícím procentem přisátého vzduchu z tabulky 41. Měřené hodnoty se ve všech případech pohybují pod křivkou, koncentrace CO_2 je reálně nižší než vychází z modelového výpočtu.

Tabulka 41: Míra přisávání vzduchu

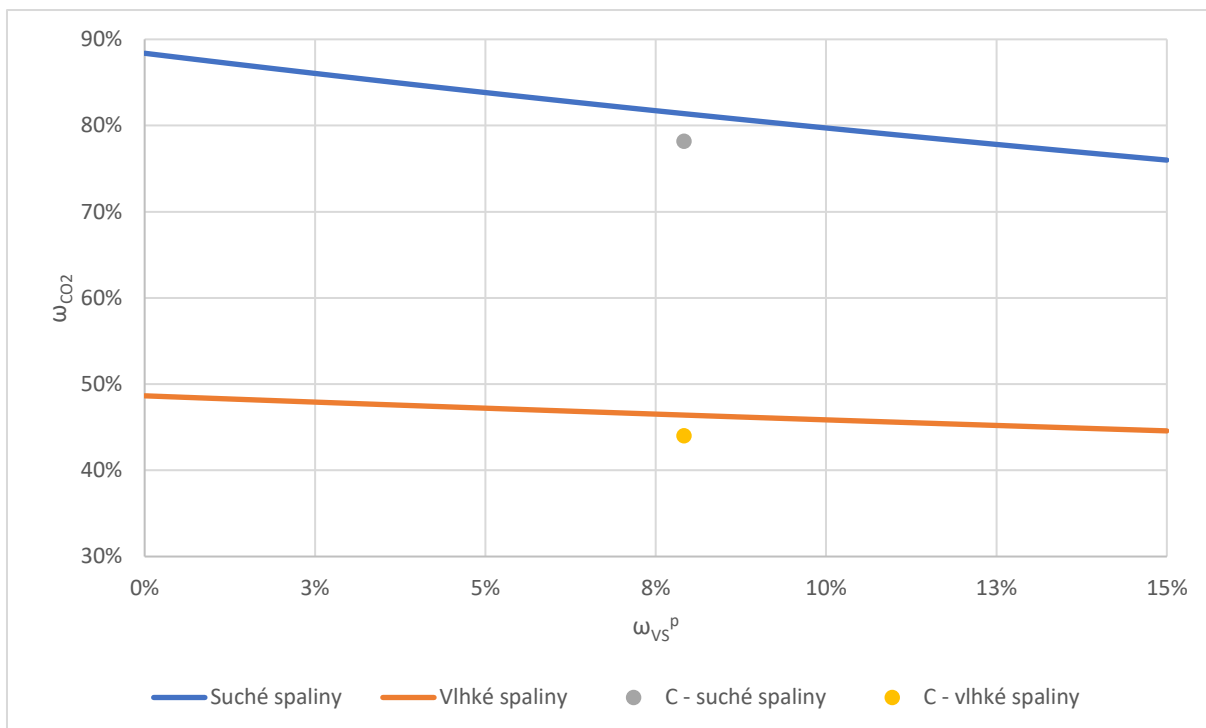
Stav	$O_{vs}^p [Nm^3/kg]$	$\omega_{vs}^p [%]$
$A_{oxyfuel}$	0,0777	7,532
$B_{oxyfuel}$	0,0769	7,158
$C_{oxyfuel}$	0,0907	7,912
$D_{oxyfuel}$	0,0881	7,491



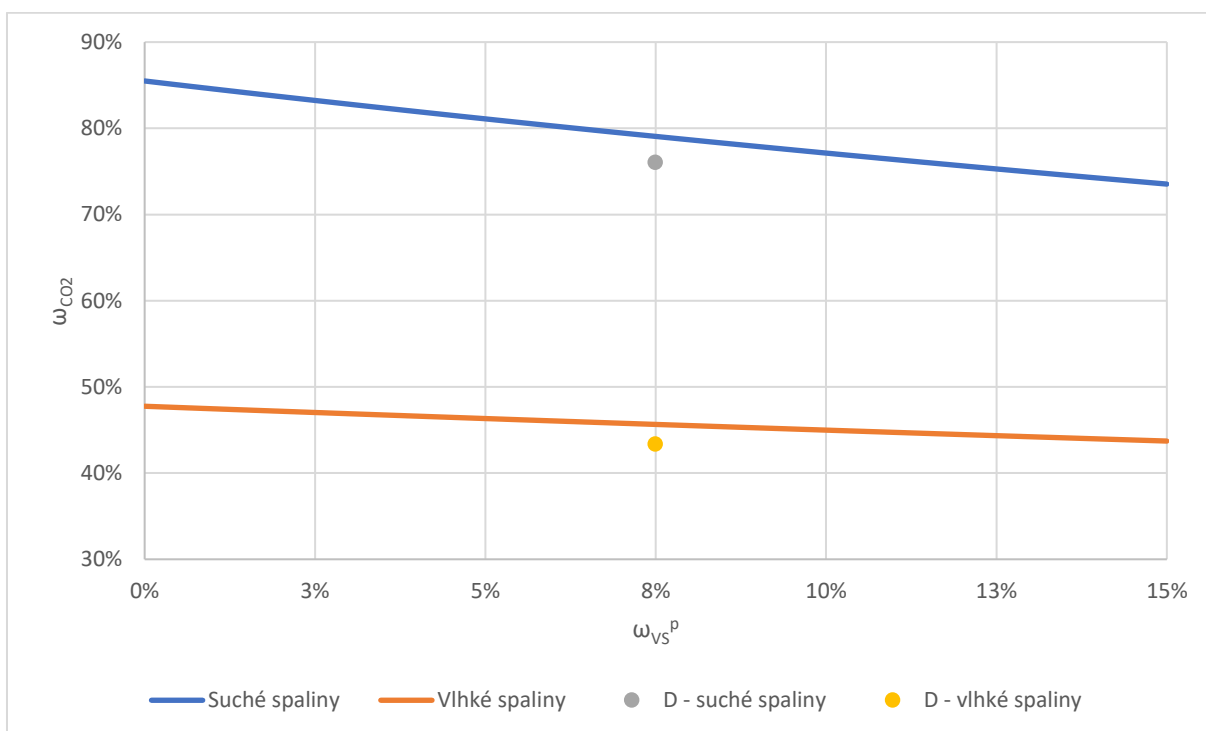
Obrázek 22: Závislost ω_{CO_2} ve spalínách na procentu přísátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav A



Obrázek 23: Závislost ω_{CO_2} ve spalínách na procentu přísátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav B



Obrázek 24: Závislost ω_{CO_2} ve spalínách na procentu přísátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav C



Obrázek 25: Závislost ω_{CO_2} ve spalínách na procentu přísátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav D

Objemový průtok spalovací komorou je dán proudem okysličovadla a recirkulovaných spalin. Tabulka 42 uvádí objemový průtok fluidačního média, podíl recirkulovaných spalin a okysličovadla v tomto médiu. Dále je v tabulce rychlost proudění fluidačního média u , prahová a úletová rychlost. Mezní rychlost fluidace pro oxyfuel spalování nabývá vyšších hodnot než ve vzduchovém režimu, zároveň také úletová rychlost oxyfuel spalování je nižší. Interval fluidace je tedy pro oxyfuel spalování menší než pro vzduchový režim. Ve vzduchových režimech se při spalování pohybujeme na 9,5-9,7 násobku mezní rychlosti fluidace, pouze v režimu C vzduchového spalování byla tato rychlost jen 7,7x větší než u_{mf} . To bylo dáno nižším objemovým průtokem v tomto režimu. V oxyfuel režimech se rychlost proudění pohybovala na nižších násobcích 7,8-8,2x u_{mf} .

Tabulka 42: Průtok fluidačního média, jeho složení, rychlost proudění, mezní rychlost fluidace a rychlost úletová

Stav	Q_{fluid} [m ³ /s]	ω_{Sr} [%]	ω_{VV} [%]	ω_{Ox} [%]	u [m/s]	u_{mf} [m/s]	u_t [m/s]
A_{vzduch}	0,0837	38,00	62,00	-	2,4793	0,2553	8,5231
$A_{oxyfuel}$	0,0683	87,35	-	12,65	2,0224	0,2601	8,1483
B_{vzduch}	0,0834	27,93	72,07	-	2,4711	0,2538	8,5231
$B_{oxyfuel}$	0,0719	87,30	-	12,70	2,1311	0,2592	8,5183
C_{vzduch}	0,0657	0,00	100,00	-	1,9472	0,2516	8,5231
$C_{oxyfuel}$	0,0706	88,61	-	11,39	2,0932	0,2589	8,5183
D_{vzduch}	0,0803	0,00	100,00	-	2,3791	0,2516	8,5231
$D_{oxyfuel}$	0,0709	88,30	-	11,70	2,1025	0,2581	8,5183

5.3.1 Porovnání stechiometrie s modelovými výpočty

Přebytky vzduchu a kyslíku spočtené z měřených průtoků dosazením do výpočtového modelu jsou uvedeny v tabulce 43. První hodnota uvedená ke každému stavu je vypočtena dosazením do modelu dokonalého, druhá do modelu nedokonalého spalování. Spočtené hodnoty přebytků okysličovadla pro dokonalé i nedokonalé spalování pro stav A jsou v obou režimech vyšší než vycházejí z experimentu, to samé platí i pro stav B u oxyfuel spalování. Pro ostatní stavy je to právě naopak, tedy větší přebytek vychází z experimentu.

Tabulka 43: Porovnání přebytků vypočtených dosazením do bilance a získaných z experimentu

Stav	Vzduchové spalování		Oxyfuel spalování	
	Dokonalé	Nedokonalé	Dokonalé	Nedokonalé
A	1,128	1,124	1,027	1,023
B	1,401	1,398	1,062	1,056
C	1,754	1,751	1,101	1,094
D	2,298	2,295	1,132	1,126

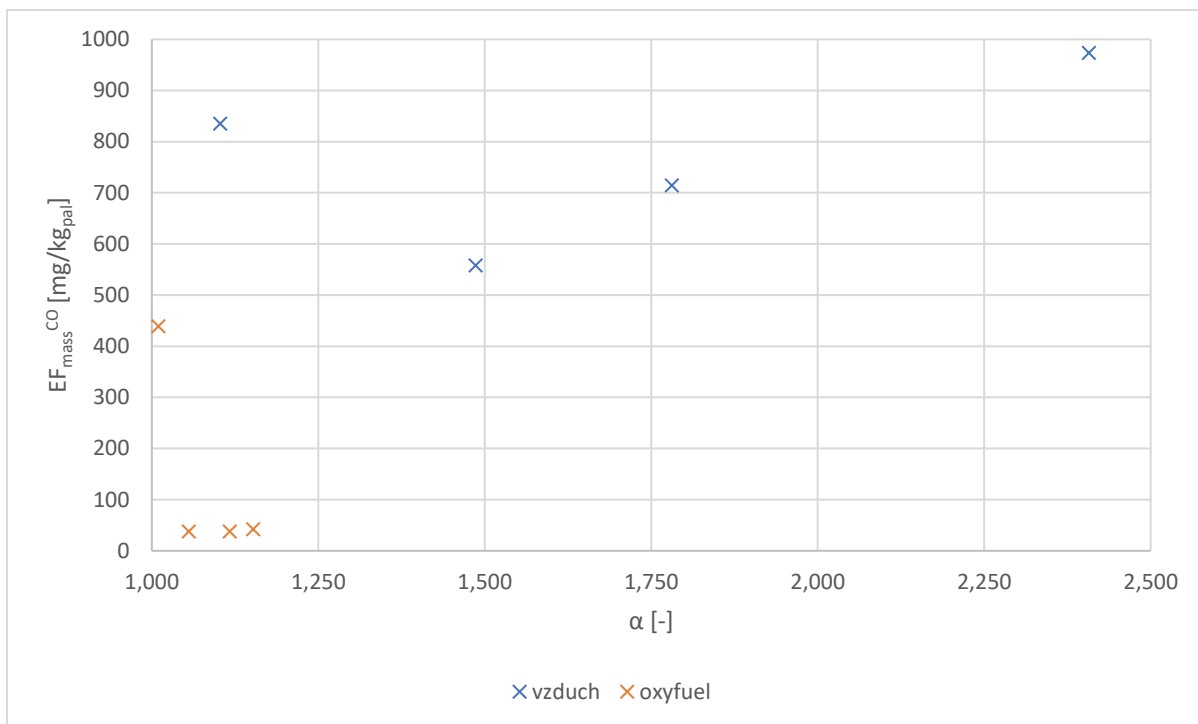
5.3.2 Emise a emisní faktory

Spalin při oxyfuel spalování vzniká výrazně méně a jejich složení se od vzduchového koncentracemi odlišuje. Na rozdíl od vzduchového spalování, kde se koncentrace CO₂ v suchých spalin pohybovala od 9 do 19 %, zde byla mnohem výraznějších 76-85 % v závislosti na konkrétním režimu. Ve stavu A, který se u obou režimů vyznačoval koncentrací kyslíku okolo 2,5 %, byl ve spalinách obsah oxidu uhličitého 85 % pro oxyfuel, oproti 19 % ve vzduchovém prostředí. Oproti tomu obsah dusíku, kterého zde bylo jen okolo 12 %, bylo v suchých spalinách vzduchového spalování v tomto režimu bezmála 78 %. Ve stavu D, na druhé straně měřeného spektra s koncentrací kyslíku v suchých spalinách 12 %, tvořil CO₂ nižších, i když proti vzduchovému režimu pořád velmi vysokých, 76 %. V tomto stavu tvoří u vzduchového režimu CO₂ pouhých 9 % a dusík přes 78 % (toho je v oxyfuelu méně než 12 %). Tyto vysoké koncentrace oxidu uhličitého jsou právě výhodné z hlediska CCS technologií.

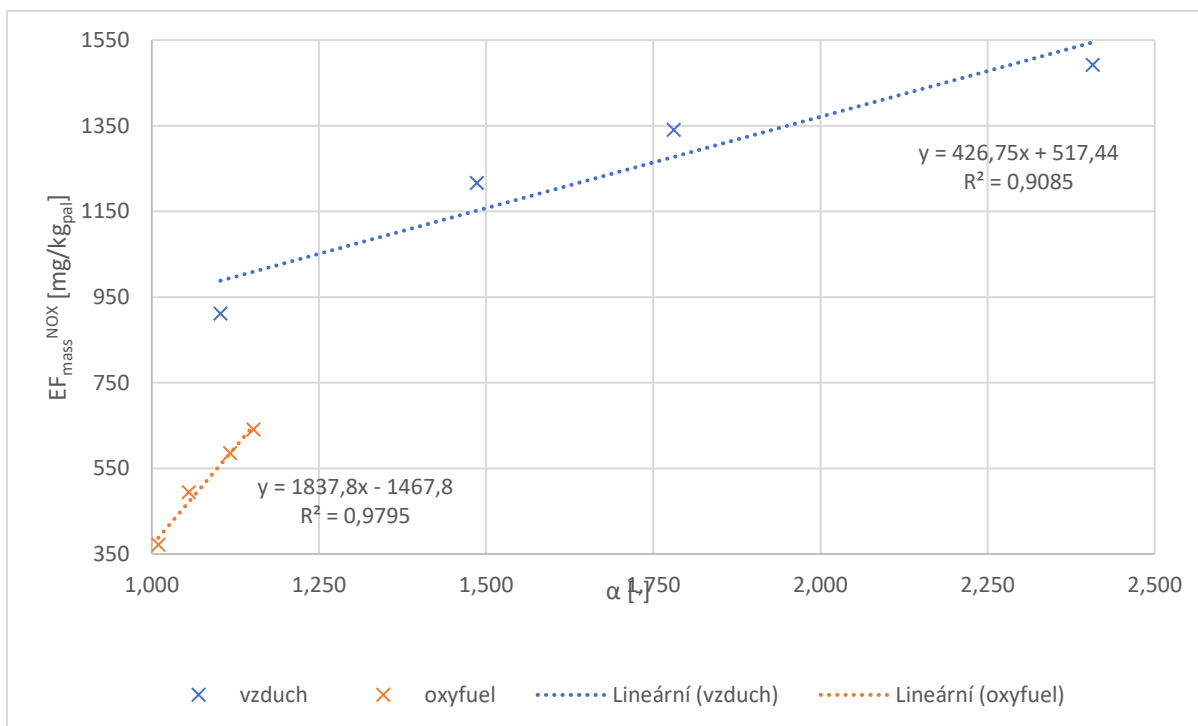
Emisní faktory vztažené na kilogram paliva jsou uvedeny v tabulce 44. V porovnání režimu oxyfuel a ve vzduchu je patrné, že emisní faktory pro oxyfuel spalování vycházejí nižší pro oxid uhelnatý i oxidy dusíku. Ve stavu A s přibližně 2,5 % kyslíku je emisní faktor CO pro vzduchové spalování 1,9x větší a emisní faktor NO_x dokonce 2,45x větší. V režimech s větším obsahem kyslíku je tento rozdíl ještě výraznější. Ve stavu D (12 % kyslíku) je emisní faktor CO bezmála 23x větší. Emise oxidu siřičitého by pro dané palivo s nízkým obsahem síry měly být velmi malé v obou režimech, jelikož tyto emise se do spalin dostávají právě z paliva. Ve třech ze 4 měření vzduchového spalování nebyly emise tohoto oxidu vůbec zaznamenány, ve zbylém stavu A, kde zaznamenány byly, byl emisní faktor rovněž o něco vyšší než v oxyfuel režimu. Na obrázku 26 je vynesena korelace emisního faktoru CO na stechiometrii, na obrázku 27 pak emisního faktoru oxidu dusíku na stechiometrii.

Tabulka 44: Emisní faktory polutantů v jednotlivých režimech

Stav	EF_{mass}^{CO} [mg/kg _{pal}]	EF_{mass}^{NOX} [mg/kg _{pal}]	EF_{mass}^{SO2} [mg/kg _{pal}]
A _{vzduch}	836	912	182
A _{oxyfuel}	439	372	169
B _{vzduch}	558	1216	0
B _{oxyfuel}	38	494	131
C _{vzduch}	715	1340	0
C _{oxyfuel}	38	586	97
D _{vzduch}	974	1493	0
D _{oxyfuel}	42	641	145



Obrázek 26: Emisní faktor oxidu uhelnatého v závislosti na stechiometrii



Obrázek 27: Emisní faktor oxidů dusíku v závislosti na stechiometrii

6 Závěr

Práce porovnávala oxyfuel spalování se vzduchovým režimem. Při výpočtu stechiometrie oxyfuel spalování jsou objemy produkovaných spalin nižší o množství přiváděné ve vzduchu, primárně o dusík. Celkový objem produkovaných spalin je pak několikanásobně menší než pokud do nich vstupuje dusík ze vzduchu. Spaliny oxyfuel spalování jsou tvořeny primárně oxidem uhličitým a vodní parou. V uvažovaném příkladu v počítaném modelu s dřevními peletami o vlhkosti 7,8 % je u vzduchového režimu vypočtená koncentrace vodní páry ve spalinách 9,3 %, u oxyfuel režimu 43,5 %. CO₂ se pak ve vlhkých spalinách oxyfuelu nachází přes 47 %, v suchých dokonce přes 83 %, oproti 8,4 % ve vlhkých, respektive 9,3 % v suchých spalinách ve vzduchu. Rozdílné koncentrace jsou dány menším objemem produkovaných spalin, sníženým primárně o dusík ze vzduchu. V uvažovaném příkladu vychází vlhkých spalin z oxyfuel spalování 5,6x méně, suchých dokonce 9x méně.

Objem produkovaných spalin roste s rostoucím přebytkem okysličovadla v obou režimech, kvůli vzdušnému dusíku však u vzduchového spalování rychleji. V obou režimech klesá koncentrace vodní páry i CO₂ s rostoucím přebytkem, což je dáno tím, že tyto závisí primárně na složení paliva. Zvyšováním přebytku okysličovadla roste koncentrace kyslíku v obou režimech, v oxyfuel však mnohem výrazněji. Tento nárůst je v oxyfuel režimu mnohem znatelnější, protože růst přebytku v tomto případě znamená pouze dodávání kyslíku navíc. Při stejné koncentraci kyslíku 11 % v suchých spalinách byl vypočten potřebný recirkulační koeficient $r = 3,90$, aby bylo v oxyfuel režimu dosaženo stejné hodnoty teploty nechlazeného plamene. Z důvodu rozličných poměrů a složek ve fluidačním médiu, které se v příkladu ve vzduchovém spalování skládá pouze z vlhkého vzduchu a v oxyfuel spalování ze směsi recirkulovaných spalin a kyslíku, budou mít fluidační média odlišnou hustotu i viskozitu. Tyto odlišnosti se projeví různou prahovou rychlostí fluidace, pro oxyfuel režim bude prahová rychlost o něco vyšší.

Z experimentálního měření vyplývá, že řízení oxyfuel režimu je obecně komplikovanější než v případě spalování se vzduchem, jelikož měřené hodnoty koncentrací mnohem více fluktuují. To znamená větší odchylky od požadovaných hodnot a proměnlivější složení spalin. S tím se musí počítat při využití oxyfuel spalování jako CCS technologie.

Koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách byly u oxyfuel měřeny 85 %, 82 %, 78 % a 76 %, pro 2,5 %, 6 %, 9 % a 12 % koncentrace kyslíku. Oproti tomu pro stejné koncentrace kyslíku byly měřeny koncentrace CO₂ 19 %, 13 %, 12 % a 9 %. Přebytky pro dosažení nastavovaných koncentrací kyslíku ve spalinách stačí pro oxyfuel nižší než u vzduchového spalování, oproti tomu je třeba výrazné recirkulace spalin, která nahrazuje vzdušný dusík v odvodu tepla a zajišťování dostatečného proudění k udržení fluidace.

Emisní faktory pro oxid uhelnatý vycházejí ve zkoumaném rozsahu lépe při oxyfuel spalování. Oxid uhelnatý v tomto režimu lépe vyhořívá. Emisní faktor dosáhl nejvyšší hodnoty při velmi nízkém přebytku kyslíku ve stavu A s 2,5 % kyslíku v suchých spalinách. I tato nejvyšší

hodnota však byla nižší než nejnižší emisní faktor pro vzduchové spalování, kterého je dosaženo při 6 % kyslíku v suchých spalinách s recirkulací $r = 0,348$. V ostatních stavech s vyšším obsahem kyslíku byla ztráta chemickým nedopalem velmi nízká, což vedlo k nízkým emisním faktorům. Emisní faktory pro NO_x mají s rostoucími přebytky rostoucí trend. Ve všech režimech, které byly sledovány, vychází emisní faktory oxidů dusíku nižší než nežli u vzduchového spalování. Nejvyšší emisní faktor NO_x při oxyfuel spalování byl naměřen při 12 % kyslíku v suchých spalinách, opět je však nižší než u vzduchu. Koncentrace oxidu siřičitého závisí pouze na síře v palivu. U vzduchového režimu byl tento polutant naměřen pouze ve stavu s 2,5 % kyslíku v suchých spalinách, kde byl vyšší než v případě oxyfuel. V jiných vzduchových režimech naměřen vůbec nebyl.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Přehled produkce, dodávek a spotřeby energie v ČR v roce 2019 [1].....	3
Obrázek 2: Varianty CCS technologií [4].....	5
Obrázek 3: Procesní schéma zachycování CO ₂ ze spalin pomocí absorpce [5].....	8
Obrázek 4: Schématické zobrazení pre-combustion CCS [10]	10
Obrázek 5: Procesní diagram pre-combustion CCS u IGCC [10].....	11
Obrázek 6: Schéma jednotky kryogenické separace [10]	13
Obrázek 7: Schématický diagram oxyfuel spalování [13].....	14
Obrázek 8: Schéma oxyfuel spalování s recirkulací H ₂ O (a) a recirkulací CO ₂ (b) [12].....	16
Obrázek 9: Rozložení oxyfuel spalování v uhelné elektrárně s práškovým kotlem a záchytem CO ₂ [19].....	18
Obrázek 10: Diagram oxy-CFB s recirkulací mokrých spalin za filtrem pevných částic a s recirkulací suchých spalin za kondenzační jednotkou [19]	19
Obrázek 11: Závislost měrného objemu vlhkých spalin na přebytku okysličovadla pro oba režimy	33
Obrázek 12: Závislost koncentrace H ₂ O ve vlhkých spalinách na přebytku okysličovadla	34
Obrázek 13: Závislost koncentrace CO ₂ ve vlhkých spalinách na přebytku okysličovadla	35
Obrázek 14: Závislost koncentrace O ₂ ve vlhkých spalinách na přebytku okysličovadla ..	35
Obrázek 15: Závislost podílu CO ₂ ve spalinách na procentu přisátého vzduchu v okysličovadle	36
Obrázek 16: I-t diagram pro oba režimy spalování	39
Obrázek 17: Závislost teploty nechlazeného plamene oxyfuel spalování na recirkulačním koeficientu.....	39
Obrázek 18: Schéma fluidního kotle MiniFluid	42
Obrázek 19: Fluidní kotel MiniFluid	43
Obrázek 20: Rozhraní ovládacího programu pro kotel MiniFluid	44
Obrázek 21: Závislost hmotnostního toku paliva na nastavené frekvenci	45
Obrázek 22: Závislost ω_{CO_2} ve spalinách na procentu přisátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav A	57
Obrázek 23: Závislost ω_{CO_2} ve spalinách na procentu přisátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav B	57
Obrázek 24: Závislost ω_{CO_2} ve spalinách na procentu přisátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav C	58
Obrázek 25: Závislost ω_{CO_2} ve spalinách na procentu přisátého vzduchu z bilance a měřené hodnoty pro stav D.....	58
Obrázek 26: Emisní faktor oxidu uhelnatého v závislosti na stechiometrii	61
Obrázek 27: Emisní faktor oxidů dusíku v závislosti na stechiometrii	61

8 Zdroje

- [1] IEA - International Energy Agency, "Czech Republic 2021 - Energy Policy Review". <https://iea.blob.core.windows.net/assets/301b7295-c0aa-4a3e-be6b-2d79aba3680e/CzechRepublic2021.pdf> (accessed May 16, 2022).
- [2] R. Stuart Haszeldine, "Carbon capture and storage: how green can black be?," *Science (1979)*, vol. 325, no. 5948, pp. 1647–1652, Sep. 2009, doi: 10.1126/SCIENCE.1172246/SUPPL_FILE/1647.MP3.
- [3] C. Fu and T. Gundersen, "Carbon capture and storage in the power industry: Challenges and opportunities," *Energy Procedia*, vol. 16, no. PART C, pp. 1806–1812, 2012, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2012.01.278.
- [4] D. Y. C. Leung, G. Caramanna, and M. M. Maroto-Valer, "An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 426–443, 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.07.093.
- [5] C. Chao, Y. Deng, R. Dewil, J. Baeyens, and X. Fan, "Post-combustion carbon capture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110490.
- [6] J. C. M. Pires, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. Simões, "Recent developments on carbon capture and storage: An overview," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 9, pp. 1446–1460, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.CHERD.2011.01.028.
- [7] M. Wang, A. Lawal, P. Stephenson, J. Sidders, and C. Ramshaw, "Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 9, pp. 1609–1624, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.CHERD.2010.11.005.
- [8] N. Jiang *et al.*, "CO₂ capture from dry flue gas by means of VPSA, TSA and TVSA," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 35, pp. 153–168, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JCOU.2019.09.012.
- [9] H. Dieter, C. Hawthorne, M. Zieba, and G. Scheffknecht, "Progress in Calcium Looping post combustion CO₂ Capture: Successful pilot scale demonstration," *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 48–56, 2013, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2013.05.084.
- [10] W. L. Theo, J. S. Lim, H. Hashim, A. A. Mustaffa, and W. S. Ho, "Review of pre-combustion capture and ionic liquid in carbon capture and storage," *Appl Energy*, vol. 183, pp. 1633–1663, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.09.103.
- [11] T. Uchida, T. Goto, T. Yamada, T. Kiga, and C. Spero, "Oxyfuel combustion as CO₂ capture technology advancing for practical use - Callide oxyfuel project," *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 1471–1479, 2013, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2013.06.022.

- [12] M. A. Nemitallah *et al.*, “Oxy-fuel combustion technology: current status, applications, and trends,” *Int J Energy Res*, vol. 41, no. 12, pp. 1670–1708, Oct. 2017, doi: 10.1002/ER.3722.
- [13] C. Zheng *et al.*, “Fundamental and Technical Challenges for a Compatible Design Scheme of Oxyfuel Combustion Technology,” *Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 139–149, Mar. 2015, doi: 10.15302/J-ENG-2015008.
- [14] N. D. Mancini and A. Mitsos, “Ion transport membrane reactors for oxy-combustion - Part I: Intermediate-fidelity modeling,” *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 4701–4720, 2011, doi: 10.1016/J.ENERGY.2011.05.023.
- [15] L. Chen, S. Z. Yong, and A. F. Ghoniem, “Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 38, no. 2, pp. 156–214, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.PECS.2011.09.003.
- [16] S. S. Rashwan, A. H. Ibrahim, T. W. Abou-Arab, M. A. Nemitallah, and M. A. Habib, “Experimental investigation of partially premixed methane-air and methane-oxygen flames stabilized over a perforated-plate burner,” *Appl Energy*, vol. 169, pp. 126–137, May 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.02.047.
- [17] Eurostat, “Coal production and consumption statistics,” *Statistics Explained*, Mar. 2022. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Coal_production_and_consumption_statistics#Deliveries_of_coal_to_coking_plants_and_coke_oven_coke_production (accessed May 02, 2022).
- [18] H. Kaß, S. Tappe, and H. J. Krautz, “The combustion of dry lignite under oxy-fuel process conditions in a 0.5 MWth test plant,” *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 423–430, Feb. 2009, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2009.01.057.
- [19] R. Stanger *et al.*, “Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 40, pp. 55–125, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.IJGGC.2015.06.010.
- [20] T. Wall *et al.*, “An overview on oxyfuel coal combustion-State of the art research and technology development,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 87, no. 8, pp. 1003–1016, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.CHERD.2009.02.005.
- [21] T. Dlouhý, *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*, 3rd ed. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2011.
- [22] J. A. Lasek, M. Janusz, J. Zuwała, K. Głód, and A. Iluk, “Oxy-fuel combustion of selected solid fuels under atmospheric and elevated pressures,” *Energy*, vol. 62, pp. 105–112, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.04.079.

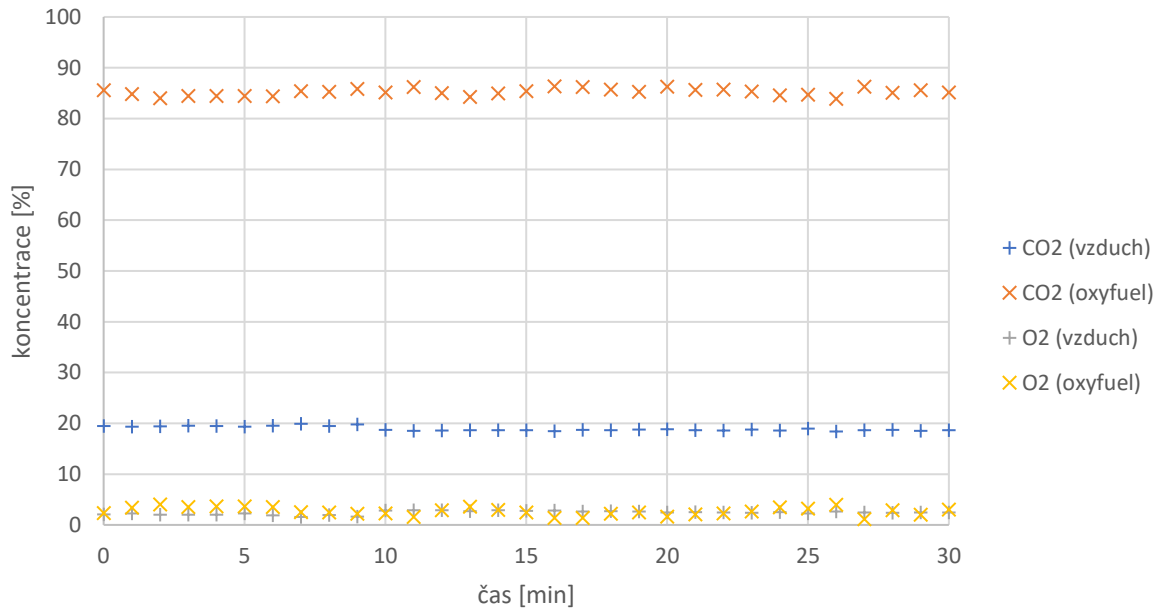
- [23] F. Normann, K. Andersson, B. Leckner, and F. Johnsson, "Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 35, no. 5, pp. 385–397, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.PECS.2009.04.002.
- [24] D.-I. Reinhold Spörl, D.-I. Jörg Maier, and U.-P. techn Günter Scheffknecht, "Sulphur Oxide Emissions from Dust-Fired Oxy-Fuel Combustion of Coal Selection and/or peer-review under responsibility of GHGT," *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 1435–1447, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.019.
- [25] M. Vodička *et al.*, "External bed materials for the oxy-fuel combustion of biomass in a bubbling fluidized bed," *J Clean Prod*, vol. 321, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128882.

9 Seznam příloh

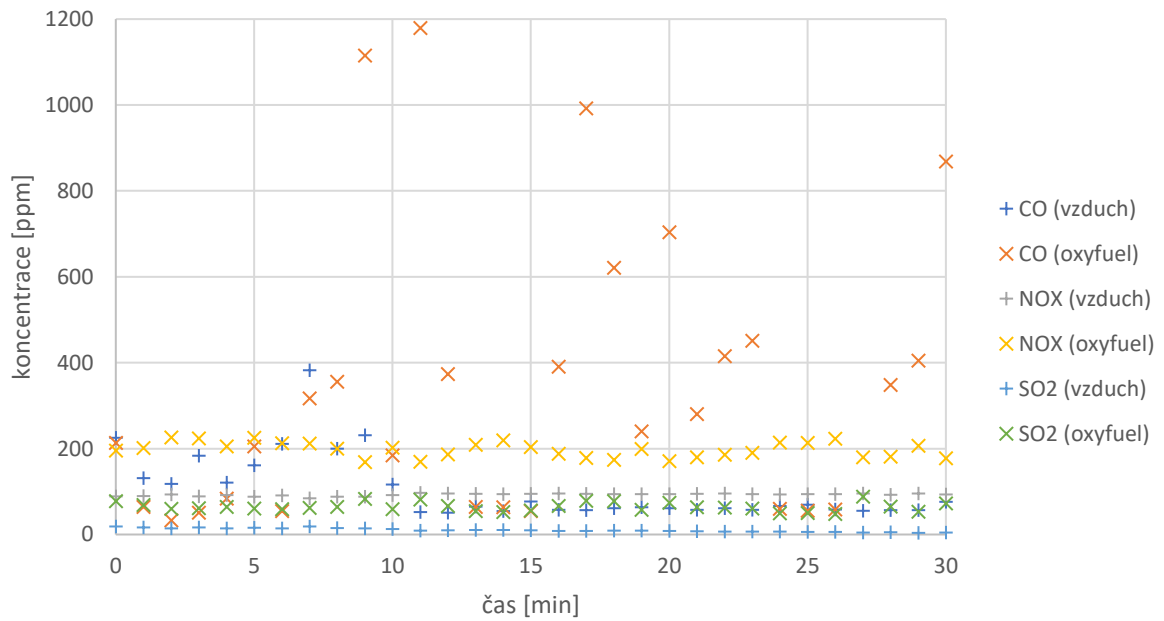
Příloha 1: Průběhy měřených emisí v měřených režimech

Příloha 2: Průběhy teplot ve fluidní vrstvě v měřených režimech

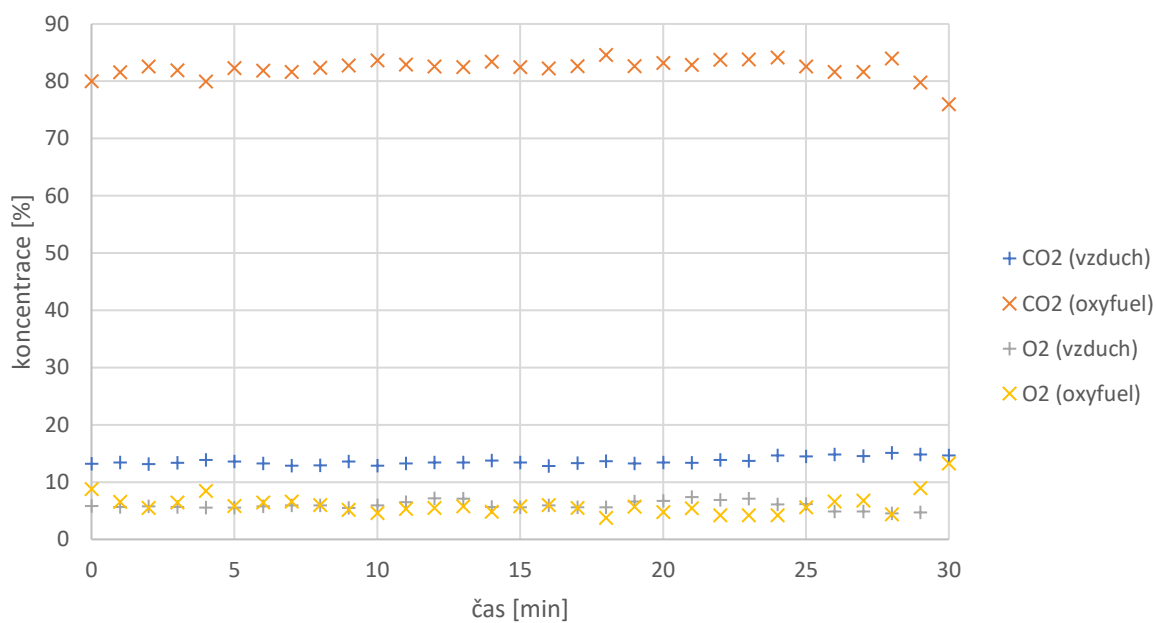
Stav A - emise CO₂, O₂



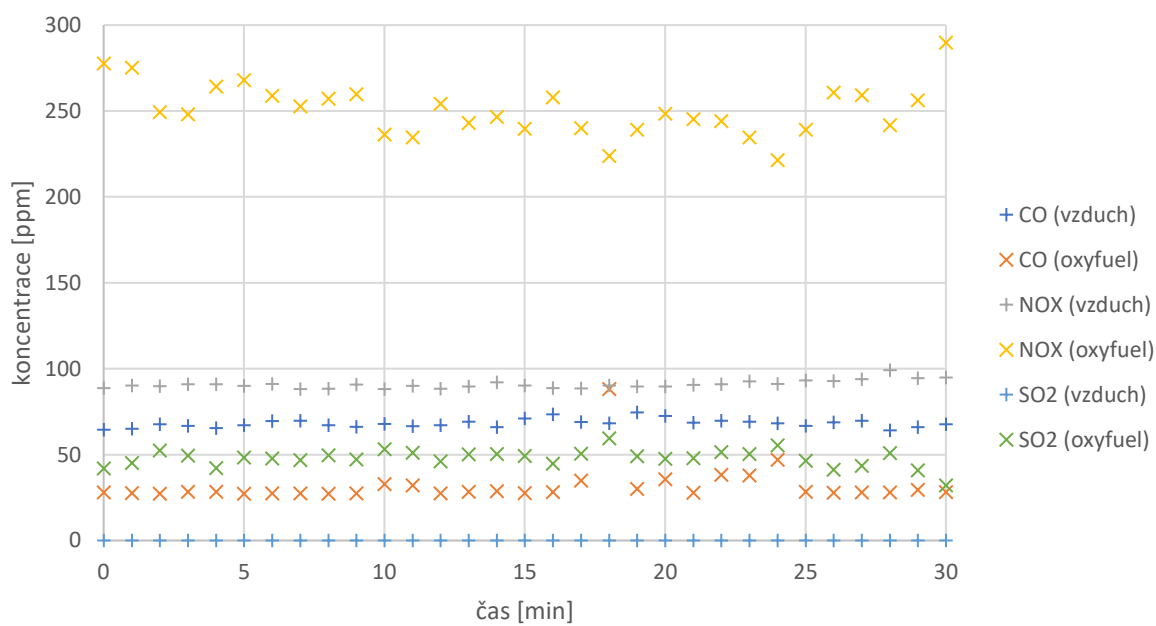
Stav A - emise CO, NO_x, SO₂



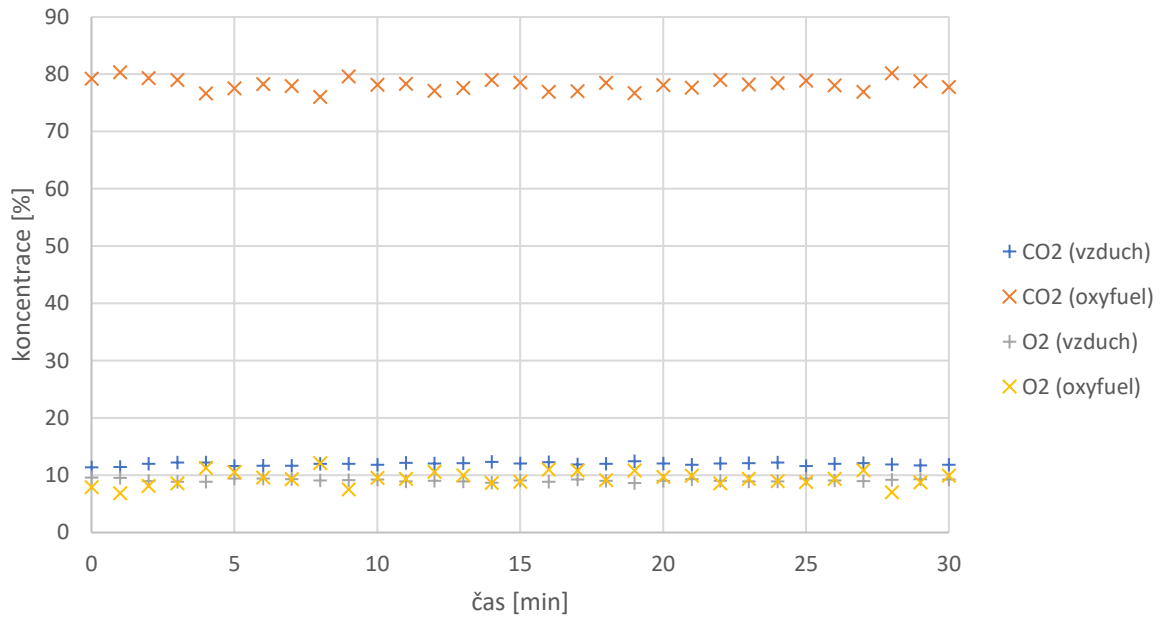
Stav B - emise CO₂, O₂



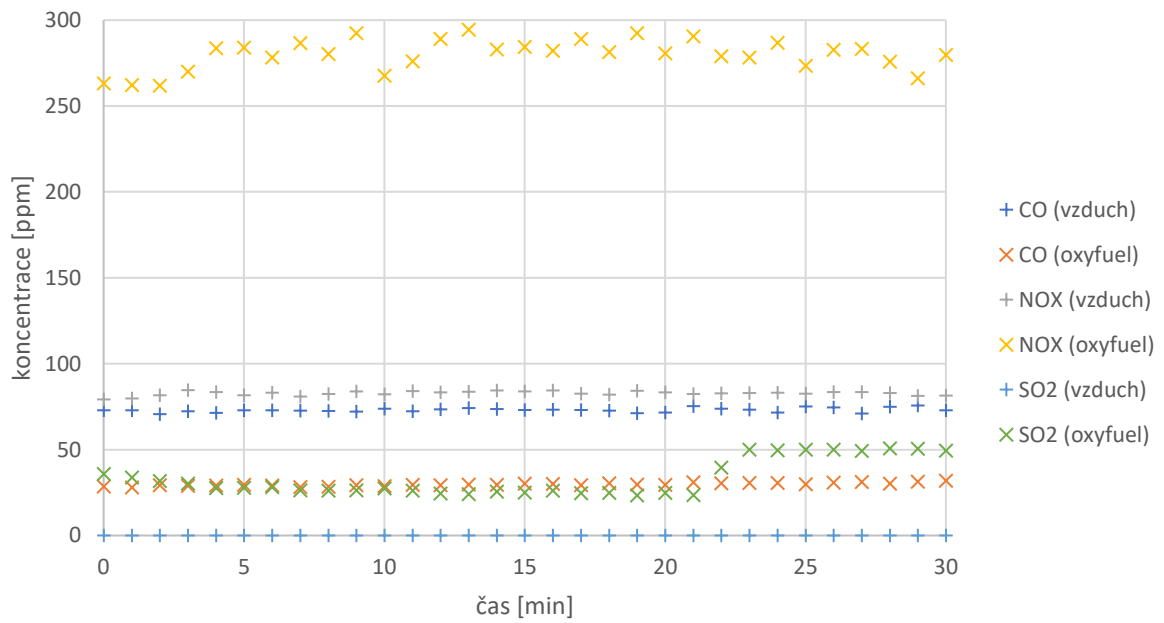
Stav B - emise CO, NO_x, SO₂



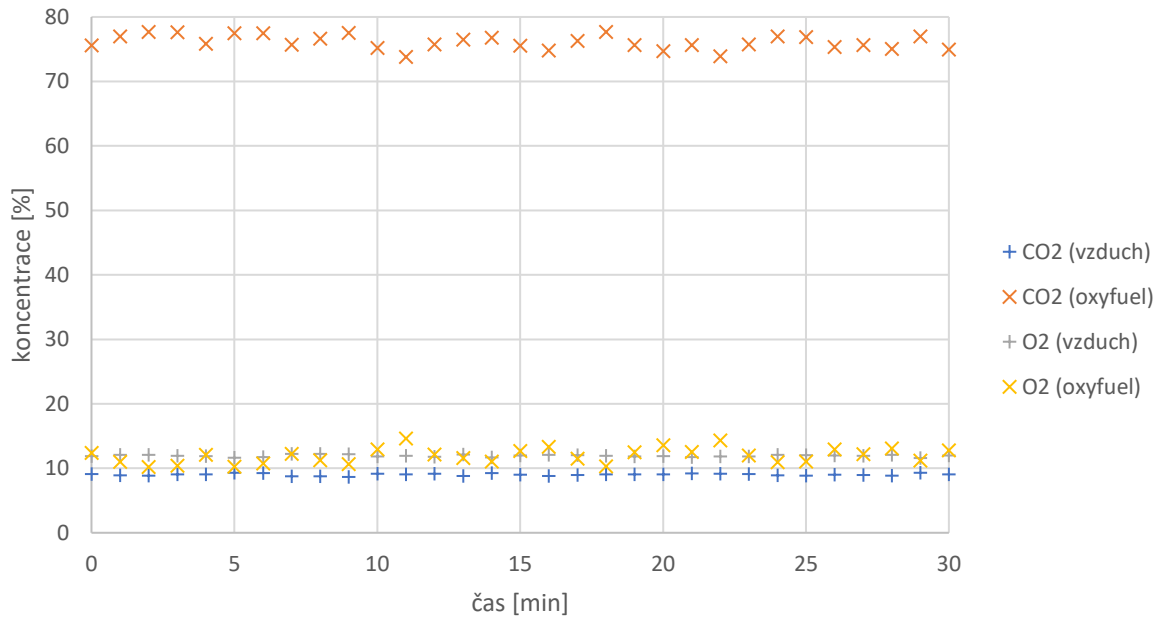
Stav C - emise CO₂, O₂



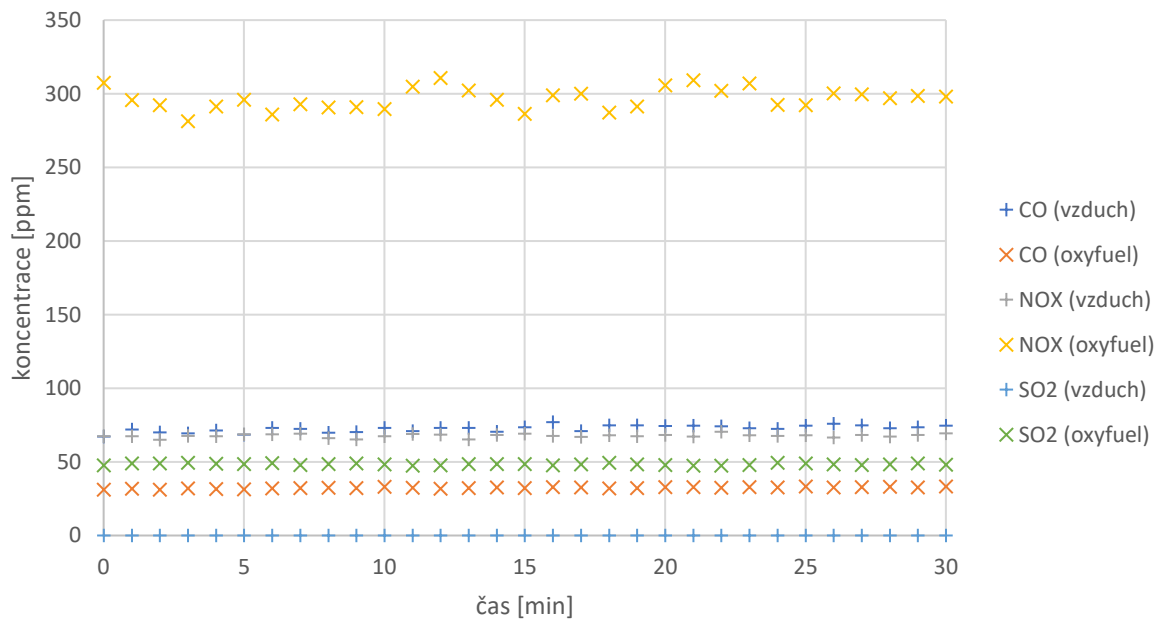
Stav C - emise CO, NO_x, SO₂



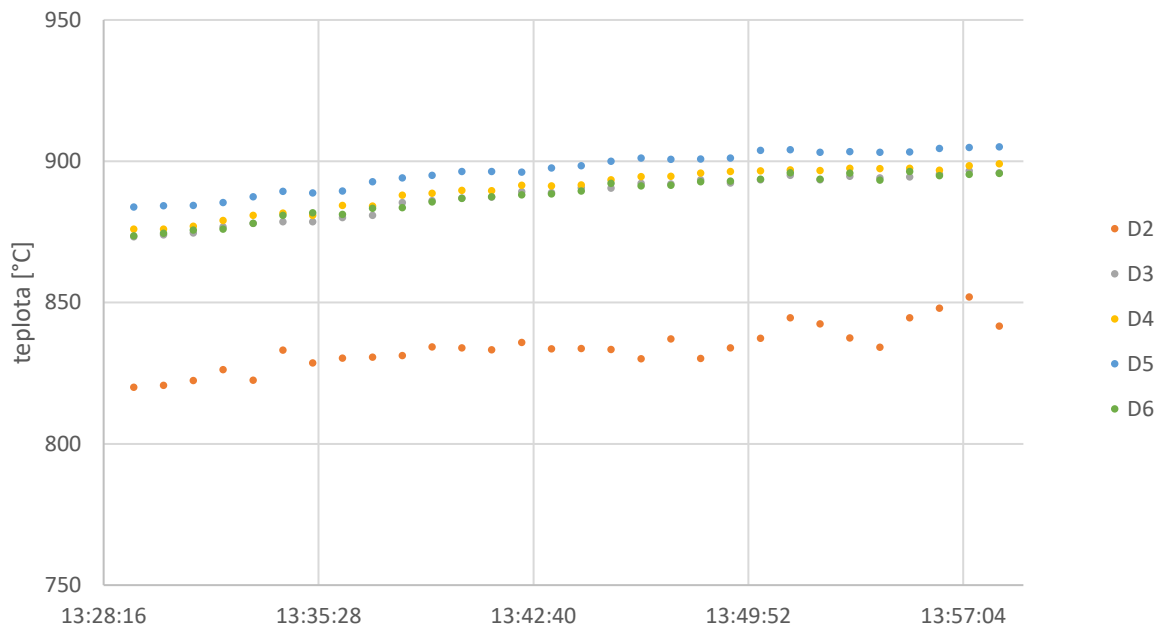
Stav D - emise CO₂, O₂



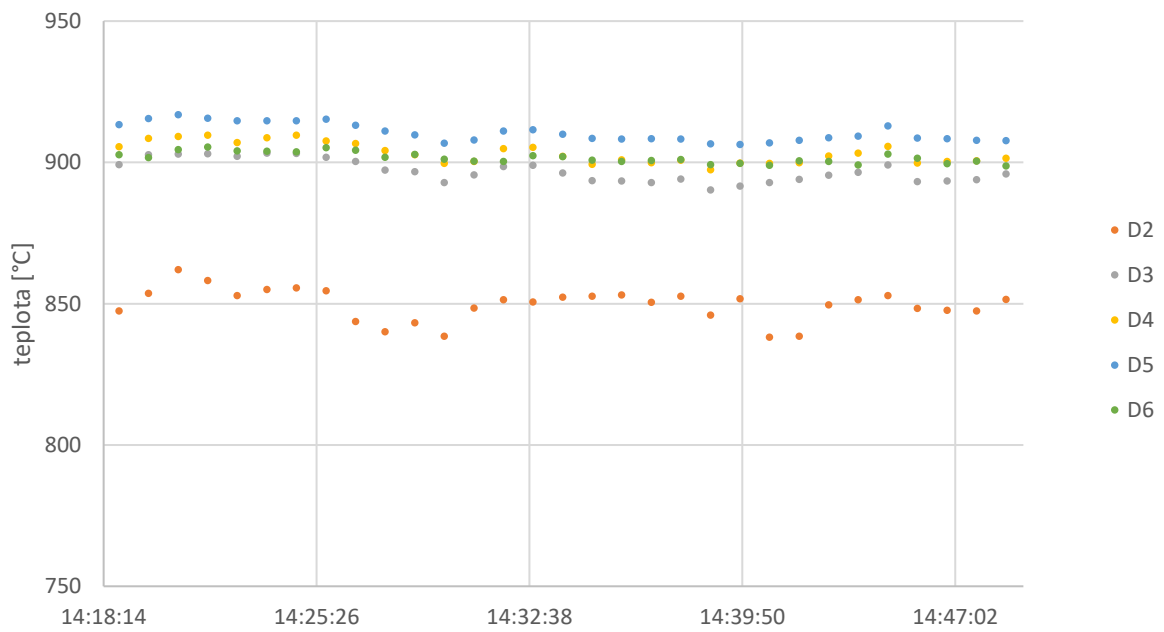
Stav D - emise CO, NO_x, SO₂



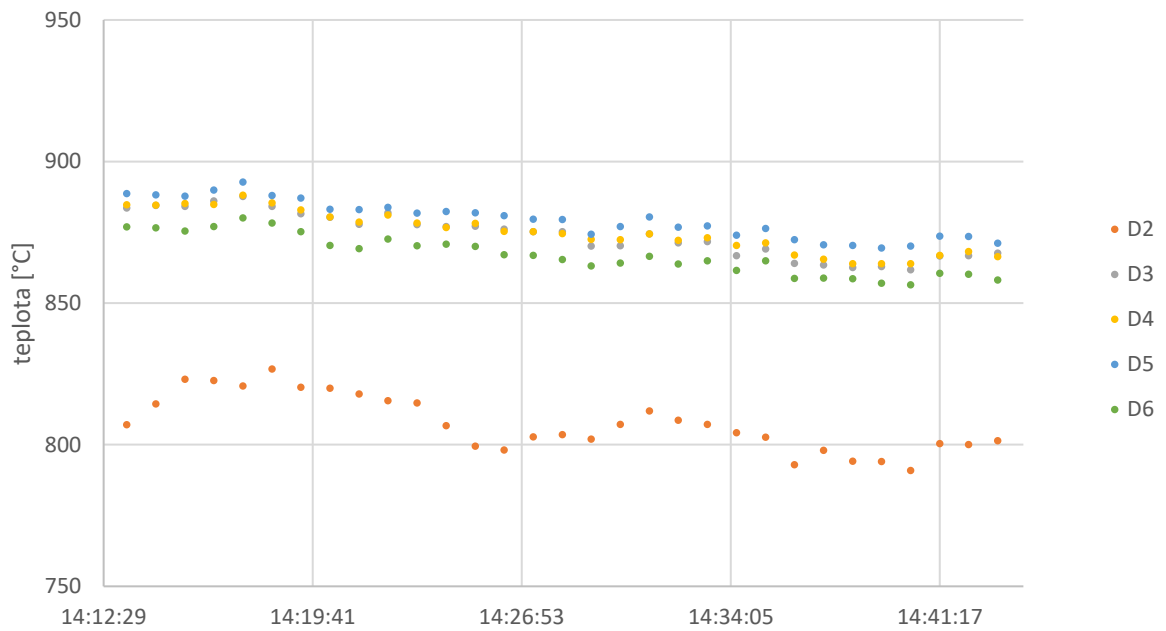
Stav A - teploty ve fluidní vrstvě (vzduchový režim)



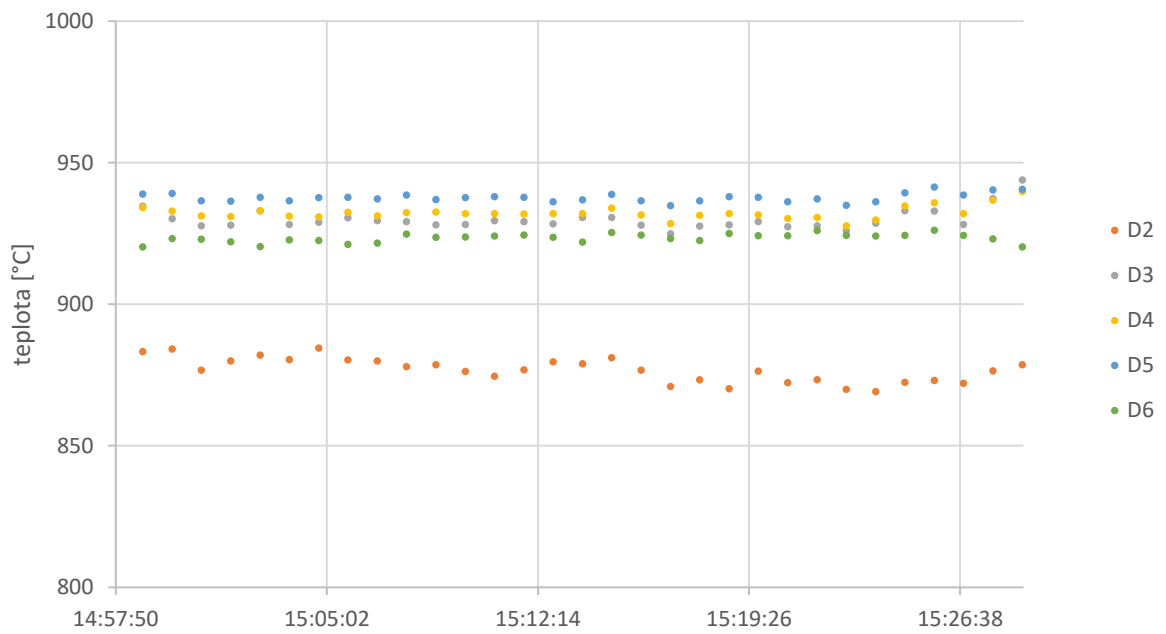
Stav A - teploty ve fluidní vrstvě (oxyfuel režim)



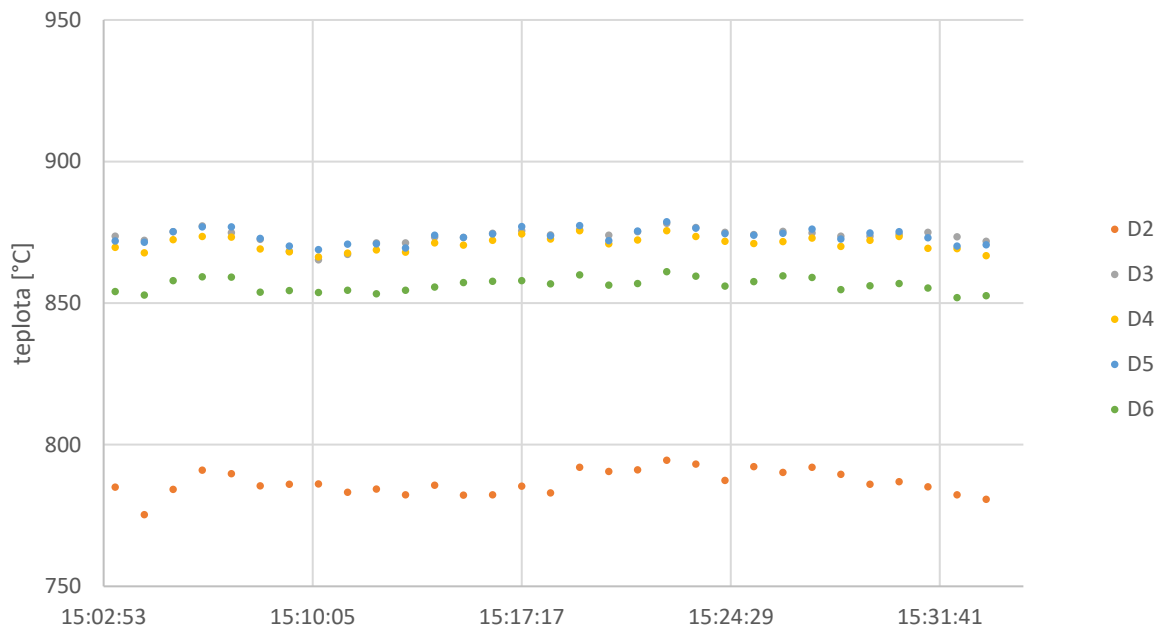
Stav B - teploty ve fluidní vrstvě (vzduchový režim)



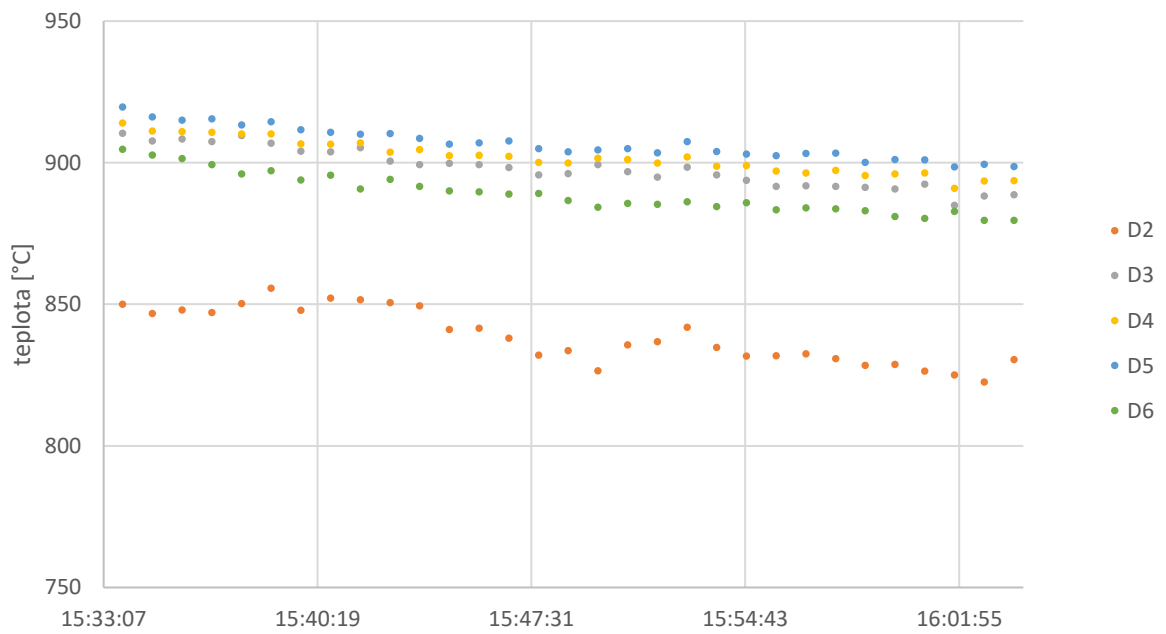
Stav B - teploty ve fluidní vrstvě (oxyfuel režim)



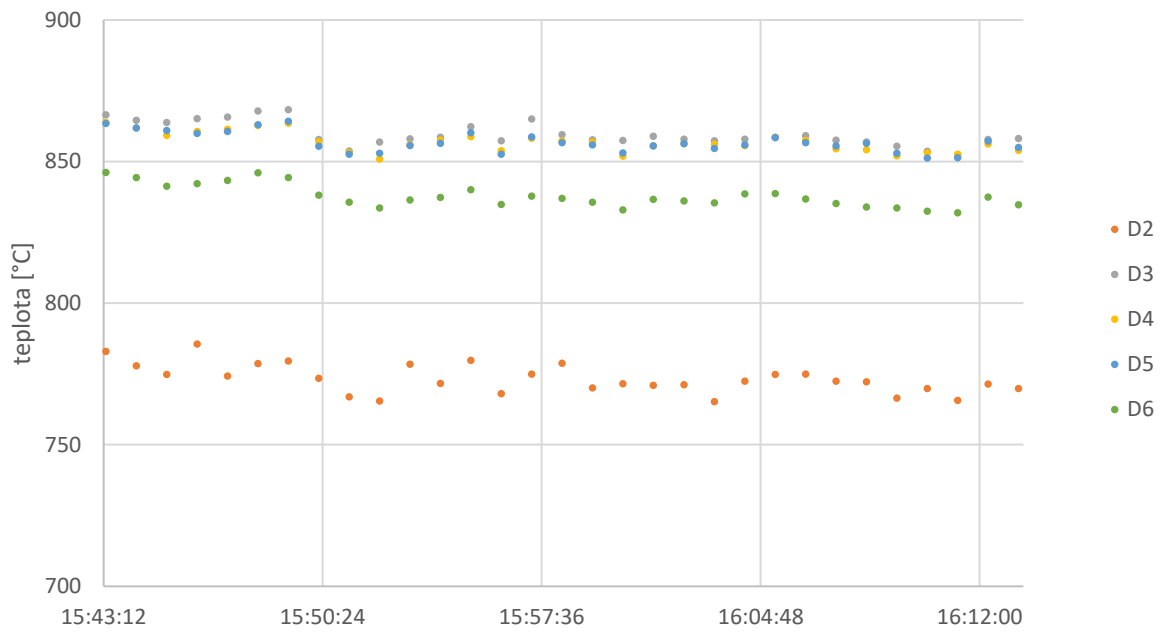
Stav C - teploty ve fluidní vrstvě (vzduchový režim)



Stav C - teploty ve fluidní vrstvě (oxyfuel režim)



Stav D - teploty ve fluidní vrstvě (vzduchový režim)



Stav D - teploty ve fluidní vrstvě (oxyfuel režim)

