



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

MODELOVÁNÍ PROCESU SPALOVÁNÍ PŘI VYUŽITÍ VZDUCHU S OBSAHEM KYSLÍKU VYŠŠÍM NEŽ 21 %

MODELLING OF OXYGEN-ENHANCED COMBUSTION PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN NAŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR BĚLOHRADSKÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Nadř

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

Modelování procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %

v anglickém jazyce:

Modelling of oxygen-enhanced combustion process

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Průmyslové aplikace jako např. zpracování kovových a nekovových materiálů, zpracování sklářských písků aj. se vyznačují vysokou spotřebou tepelné energie, které je zapotřebí k dosažení vysokých teplot uvnitř pece. Zdrojem tepelné energie je ve většině aplikací proces spalování, kde se obvykle jako oxidační činidlo používá atmosférický vzduch. Avšak za účelem snížení spotřeby paliva je výhodné zvýšit účinnost procesu použitím spalovacího vzduchu, ve kterém je koncentrace kyslíku vyšší než 21 %, tzn. snížit koncentraci dusíku ve vzduchu, který se neúčastní chemických reakcí a působí jako balast. Takový proces se v anglické terminologii nazývá jako „oxygen-enhanced combustion“ (OEC). Krajním případem OEC je úplné nahrazení atmosférického vzduchu vysoce čistým kyslíkem. Pak se hovoří o tzv. kyslíkovém spalování. Obě zmíněné technologie se vyznačují významnou úsporou paliva, nízkým objemem spalin, sníženou tvorbou oxidů dusíku a vysokými teplotami.

Úkolem studenta je v prvním kroku porovnat klady a zápory OEC s konvenčním způsobem spalování a porovnat jednotlivé metody OEC. V dalším kroku bude úkolem studenta shrnout hlavní oblasti užití OEC, hlavní zásady bezpečné manipulace s kyslíkem a základní vztahy pro výpočet výkonu hořáku, teoretické a skutečné spotřeby spalovacího vzduchu atd. Stěžejní částí práce bude modelování spalování užitím CFD metod. V rámci práce budou modelovány různé metody OEC. Sledovanými veličinami budou především rozložení teplot uvnitř spalovací komory, teplota na výstupu ze spalovací komory a rozložení tepelných toků do stěny spalovací komory. Výsledky simulací budou následně porovnány s experimentálními daty.

Cíle diplomové práce:

1. Základní charakteristika, pozitiva a negativa OEC.
2. Přehled oblastí procesního průmyslu, ve kterých je OEC využíváno.
3. Zásady bezpečné manipulace s kyslíkem.
4. Přehled důležitých vztahů pro výpočty spalovacích procesů.

5. Vytvoření modelu hořáku, spalovací komory a přívodního vzduchového potrubí.
6. Modelování spalování užitím CFD metod.
7. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulací s experimentálními daty.

Seznam odborné literatury:

1. Baukal C.E., Industrial Combustion, Pollution and Control, USA, Marcel Dekker, 2004, ISBN 0-8247-4694-5.
2. Baukal C.E., Industrial Burners Handbook, USA, CRC PRESS, 2004, ISBN 0-8493-1386-4.
3. Baukal C.E., Oxygen-Enhanced Combustion, USA, CRC PRESS, 1998, ISBN 0-8493-1695-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Hlavnou náplňou danej práce je matematické modelovanie procesu spaľovania, pri ktorom má spaľovací vzduch obsah kyslíka viac ako 21%, v anglickej terminológii označovaného ako „*oxygen-enhanced combustion*“ (OEC) a jeho porovnanie s experimentálnymi meraniami. Práca sa venuje popisu procesu spaľovania ako aj charakterizácii OEC. Vzhľadom na to, že pri OEC sa pracuje s čistým kyslíkom, je časť práce venovaná aj nebezpečenstvám a nutnej bezpečnosti pri práci s ním. Práca obsahuje detailný popis spaľovacej komory, ako aj súčastí potrebných na prevádzku OEC. V práci sú dve sťažené časti, a to experiment a simulácia. Významnou časťou práce je teda počítačový model danej spaľovacej komory, ako aj simulácia procesu spaľovania s prídavným kyslíkom pomocou využitia CFD metód. Numerické výsledky boli porovnané s experimentálnymi dátami - konkrétne rozloženie tepelných tokov do stien spaľovacej komory a rozloženia teplôt v plameni v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory.

Abstract

The main purpose of the master's thesis is the experimental study and the mathematical modelling of the combustion process in which the combustion air is enriched with the high-purity oxygen, i.e. the oxygen content is more than 21 %. This combustion technology is called as the oxygen-enhanced combustion (OEC). Since the experimental work required the manipulation with the pure oxygen, a part of the thesis is focused on risks and necessary safety associated therewith. The detailed description of the combustion chamber as well as of the components necessary for the operation of OEC is included. The main part of the thesis is the computational model of the combustion chamber and the simulation of OEC using CFD methods. The numerical results were then compared with the experimental data acquired during the combustion tests, namely the heat flux distribution along the combustion chamber and the distribution of in-flame temperatures in the horizontal symmetry plane of the chamber.

Kľúčové slová

Spaľovanie s obohateným vzduchom, CFD modelovanie, tepelné toky, teplota v plameni, model.

Keywords

Oxygen-enhanced combustion, CFD modelling, heat fluxes, in-flame temperature, model.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

NAĎ, M. *Modelovanie procesu spaľovania pri využití vzduchu s obsahom kyslíka vyšším ako 21 %*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 90 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Modelovanie procesu spaľovania pri využití vzduchu s obsahom kyslíka vyšším ako 21 %“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 270 trestného zákona č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Ďakujem svojmu vedúcemu diplomovej práce, Ing. Petrovi Bělohradskému, Ph.D. za užitočnú metodickú odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce. Taktiež by som chcel poďakovať Ing. Jiřímu Vondálovi, Ph.D. za pomoc a ochotu pri riešení matematického modelu. V neposlednej rade by som chcel poďakovať svojej rodine, priateľke a blízkym za ich trpezlivosť a hlavne psychickú podporu počas celého štúdia.

Obsah

1	Úvod.....	11
1.1	Proces spaľovania.....	11
1.2	Spaľovanie s prídavným kyslíkom vo vzduchu.....	12
1.3	Ciele práce.....	13
2	Základy spaľovania.....	14
2.1	Prebytok vzduchu.....	16
2.2	Teplota plameňa a výkon horáku.....	17
3	Základné charakteristiky OEC.....	19
3.1	Súčasný stav poznania v oblasti OEC.....	19
3.2	Kyslík.....	20
3.3	Metódy OEC.....	20
3.3.1	Obohacovanie vzduchu kyslíkom.....	20
3.3.2	Injektovanie kyslíka do pece.....	21
3.3.3	Nahradzovanie spaľovacieho vzduchu kyslíkom.....	21
3.3.4	Samostatný prívod vzduchu a kyslíka do horáku.....	22
4	Bezpečnosť pri OEC.....	23
4.1	Spaľovací trojuholník.....	23
4.2	Návrh vypracovania.....	23
4.3	Nebezpečenstvo plameňa.....	23
4.4	Kontrola limitu zápalnosti.....	24
4.5	Kontrola zapalovania.....	26
4.6	Kyslíkovody.....	26
5	Experimentálna časť.....	28
5.1	Popis zariadenia.....	28
5.2	Meranie teploty v plameni.....	32
5.2.1	Prídavné zariadenie.....	32
5.2.2	Priebeh merania.....	33
5.2.3	Vyhodnotenie rozloženia teplôt v plameni.....	34
5.3	Meranie tepelných tokov.....	36
5.3.1	Chybová analýza experimentálnych dát.....	36
5.3.2	Vyhodnotenie tepelných tokov.....	38
6	Matematické modelovanie pomocou metód CFD.....	42
6.1	Charakteristika matematického modelovania.....	42

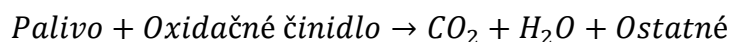
6.2	Súčasný stav poznania v oblasti CFD modelovania OEC	44
6.3	Model 3D	44
6.4	Popis použitej výpočtovej techniky	47
6.5	Matematický model Fluent	47
6.5.1	Modely	47
6.5.2	Použité materiály	48
6.5.3	Okrajové podmienky	49
6.5.4	Riešič	49
6.6	Výsledky simulácií a ich porovnanie s experimentálnymi dátami	50
6.6.1	Premiešavanie kyslíka so spaľovacím vzduchom	51
6.6.2	Teploty plameňa	52
6.6.3	Tepelné toky	53
6.6.4	Zhrnutie možných dôvodov odlišnosti experimentu a simulácie	55
7	Záver	56
	Použitá literatúra	57
	Zoznam obrázkov	59
	Zoznam tabuliek	61
	Zoznam symbolov	62
	Zoznam skratiek	64
	Zoznam chemických prvkov a zlúčenín	65
	Príloha A	66
	Príloha B	74
	Príloha C	79
	Príloha D	82
	Príloha E	87

1 Úvod

1.1 Proces spaľovania

Spaľovanie je najstaršia známa forma premeny paliva na tepelnú energiu a ľudstvo ho v primitívnej forme využíva už tisícročia, pričom každá civilizácia si jeho podstatu vysvetľovala inak. Potenciál jeho využitia sa však naplno preukázal až v posledných storočiach, preto sú spaľovacie procesy aj technológie v súčasnosti teoreticky veľmi dobre opísané a na trhu existuje rozsiahly sortiment spaľovacích zariadení a príslušenstva. Rôznorodosť zariadení so sebou prináša aj schopnosť spaľovať prakticky akékoľvek palivo od plynu, dreva, uhlia až po trus a odpad. Spaľovaním získaná tepelná energia má rozličné využitie v závislosti od požiadaviek zákazníka. Primárne sa však využíva na vykurovanie, či už je to priamo spaľovaním rôznorodého paliva, alebo nepriamo elektrickou energiou, ktorá je prevažne vyrábaná technológiou na báze spaľovania. V technologických procesoch má spaľovanie obrovský význam pri získavaní čistých surovín (železo, hliník, oceľ, atď.), pričom sa využívajú vysoké pece alebo vyhne a následne sa tieto produkty ďalej tepelne upravujú v ďalších peciach. Spaľovanie sa využíva aj v rozličných podnikoch ako sú chemické závody, petrochemické závody, sušičky a spaľovne, a taktiež v rôznych technologických procesoch akým je napríklad tavenie skla. Medzi ďalšie oblasti využitia patria okrem dopravných prostriedkov (lietadlá, zaoceánske lode, vlaky, automobily) taktiež aj ohrev vody alebo už spomínaná výroba elektrickej energie [1].

Spaľovanie vo svojej podstate môžeme chápať ako kontrolované uvoľňovanie tepla a energie zapríčineného chemickými reakciami medzi palivom a oxidačným činidlom. Danú reakciu môžeme vnímať ako prudkú oxidáciu uhl'ovodíkového paliva. Hlavným rozdielom spaľovania v porovnaní s výbuchom a horením je, že výbuch a horenie sú zväčša nekontrolované a nepredvídateľné. Proces spaľovania možno popísať daným vzťahom:



a) Palivo

Palivo môžeme rozdeliť do troch kategórií: tuhé (napr. uhlie, koks), kvapalné (napr. ľahký vykurovací olej) a plyné (napr. zemný plyn). Výber paliva má potom značný vplyv na prenos tepla systému. Charakteristickými parametrami paliva sú výhrevnosť paliva, známa tiež ako LHV („*lower heating value*“) a spalné teplo známe ako HHV („*higher heating value*“). LHV charakterizuje teplotu vyparovania, čo je vlastne energia potrebná na premenu vody na paru. LHV predpokladá, že všetky produkty spaľovania sú v plynnej fáze, čo sa týka takmer všetkých spaľovacích procesov. Ak je však teplota dostatočne nízka, para môže skondenzovať na vodu. Toto kondenzačné teplo figuruje ako ďalší zdroj energie s ktorým počíta HHV paliva. Zloženie paliva je dôležité pre stanovenie množstva potrebného oxidačného činidla, a taktiež pre stanovenie zloženia produktov spaľovania. Významným parametrom paliva je taktiež jeho hustota, ktorá určuje prietok paliva palivovým systémom zariadenia a má značný vplyv na jeho konštrukciu [2].

b) Oxidačné činidlo

Priemyselné spaľovanie využíva hlavne 2 typy oxidačných činidiel. Najčastejšie používaným je atmosférický vzduch, pričom na samotný proces spaľovania sa využíva len jedna jeho zložka a tou je kyslík (približne 21 %). Dusík sa spaľovacej reakcie nezúčastňuje a pôsobí ako balast, ktorý odoberá vzniknuté teplo a vynáša ho von z komory spolu so spalínami. Čistota oxidačného činidla má veľký vplyv na prenos tepla v systéme.

V závislosti na pomere množstva paliva a oxidačného činidla poznáme niekoľko typov spaľovania pričom jedným nich je spaľovanie bohatej zmesi, ktoré sa vyznačuje nedostatkom oxidačného činidla, čo má za následok nedokonalé spálenie paliva. Ďalším typom spaľovania je spaľovanie chudobnej zmesi, kde je naopak prebytok O_2 v spalinách. Spaliny a konkrétne ich zloženie je veľmi dôležité na určenie prenosu tepla systému. V prípade, že sa v spalinách nachádzajú zvyšky paliva, znamená to nevyužitie celého potenciálu paliva. Ak sa však v spalinách nachádza príliš veľa O_2 poukazuje to na mrhanie oxidačným činidlom, čo má za následok unášanie tepla, ktoré nemohlo byť využité a bolo unesené so spalinami do komína [2].

Pre dosiahnutie stabilného a dokonalého spaľovania je potrebné mať správny pomer oxidačného činidla a paliva, a tiež vhodnú konštrukciu horákov. Na dosiahnutie dokonalého horenia paliva musíme priviesť do procesu istý prebytok vzduchu, ktorý je pre každé palivo charakteristický. V tab. 1.1 môžeme vidieť percentuálny podiel prebytku vzduchu v závislosti na type paliva.

Palivo	Prebytok vzduchu [%]
Antracit	40
Koksárenský plyn	5 - 10
Zemný plyn	5 - 10
Uhlie, práškové	15 - 20
Uhlie, kotlové	20 - 30
Olej	10 - 20
Polo antracit, ručné prikladanie	70 - 100
Polo antracit, s násypníkom	40 - 70
Polo antracit, s posuvným roštom	30 - 60

Tab. 1.1 Prebytok spaľovacieho vzduchu v závislosti na použítom palive [3].

Poniektoré vysokoteplotné procesy však potrebujú vyššiu koncentráciu kyslíka, a preto sa časť vzduchu alebo všetok nahradí čistým kyslíkom. Spaľovanie, pri ktorom obohacujeme spaľovací vzduch kyslíkom, sa v anglickej terminológii nazýva „*oxygen-enhanced combustion*“ (OEC) [4].

1.2 Spaľovanie s prídavným kyslíkom vo vzduchu

Mnoho priemyselných procesov vyžaduje obrovské množstvo tepelnej energie, ktoré je zabezpečované spaľovaním uhlíkovodíkov. Väčšina spaľovacích procesov využíva pri spaľovaní ako oxidačné činidlo atmosférický vzduch [5]. Proces spaľovania však môže byť intenzifikovaný použitím oxidantu s vyšším obsahom O_2 ako má samotný atmosférický vzduch. Spaľovanie s prídavným kyslíkom sa ujalo v rozličných priemyselných odvetviach, najmä vďaka zvýšenej efektívnosti, zníženiu spotrebovanej energie a zníženiu koncentrácie NO_x v závislosti na použitej OEC metóde (viď. kapitola 3.3).

Zvýšenie produktivity spaľovacieho procesu môže byť dosiahnuté len miernym navýšením podielu O_2 vo vzduchu. Bežné konvenčné horáky zvládnu bez potrebných úprav, resp. len s miernymi úpravami, spaľovať s oxidačným činidlom obsahujúcim až 30 % kyslíka. Vysoká

koncentrácia kyslíka však môže mať za následok nestálosť plameňa a navýšenie jeho teploty až natolko, že to môže poškodiť horák, ktorý nebol špeciálne navrhnutý na takýto typ spaľovania [2]. K procesu obohacovania kyslíkom dochádza najmä 4 rôznymi spôsobmi:

- a) pridávaním O_2 do vstupného vzduchového prúdu,
- b) vstrekaním O_2 priamo do plameňa,
- c) nahradzovaním spaľovacieho vzduchu kyslíkom,
- d) samostatným prívodom vzduchu a kyslíka do horáku.

Danému typu spaľovania sa budeme bližšie venovať v nasledujúcich kapitolách.

1.3 Ciele práce

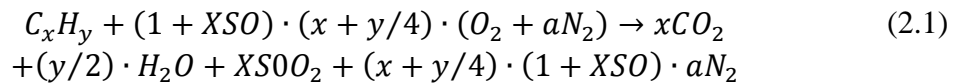
Diplomová práca sa zaoberá tematikou z oblasti OEC. Predmetom práce bola realizácia experimentálnych meraní jednej z metód OEC, konkrétne metódy obohacovania spaľovacieho vzduchu kyslíkom. Spaľovacie skúšky boli zamerané na určenie tepelných tokov do stien spaľovacej komory a na rozloženie teplôt v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory. Táto experimentálna činnosť bola doplnená o matematické modelovanie OEC pomocou metód CFD (Computational Fluid Dynamics). Získané numerické výsledky boli následne porovnané s experimentálnymi dátami. Hlavné ciele práce možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

1. Literárna rešerš v oblasti experimentálnych meraní.
2. Realizácia experimentálneho merania OEC a vyhodnotenie nameraných dát.
3. CFD simulácia OEC a vyhodnotenie výsledkov.
4. Porovnanie experimentálnych a numerických výsledkov.

Diplomová práca nadväzuje na bakalársku prácu s názvom *Hořáky pro vysokoteplotní průmyslové aplikace* [6], ktorá sa zaoberala rôznymi typmi horákov a ich súčastí, a taktiež spaľovacím procesom s obsahom kyslíka viac ako 21 %.

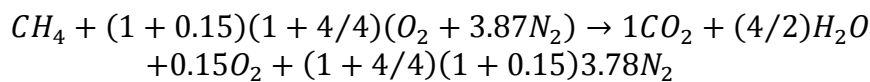
2 Základy spaľovania

Pri spaľovaní dochádza k zlučovaniu horľavých zložiek paliva, najmä uhlíku a vodíku so vzduchom. V procese spaľovania dochádza k produkcii tepla, a taktiež aj k tvorbe oxidu uhličitého a vodnej pary. Všeobecná reakcia popisujúca spaľovanie uhl'ovodíkového paliva s oxidačným činidlom má tvar [2]

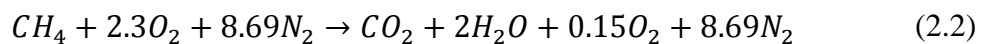


kde XSO je percentuálny prebytok oxidačného činidla a „ a “ je faktor ktorý sa využíva pre výpočet množstva dusíku v oxidačnom činidle. V danej rovnici však boli vypustené stopové prvky.

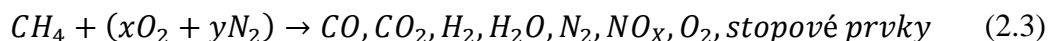
Použitie rovnice (2.1) je možné znázorniť na príklade spaľovania metánu s prebytkom vzduchu 15 % [2]. Snahou je dopočítať neznáme z rovnice, ktorými sú a , x , y a XSO . Metán s chemickou značkou CH_4 môže byť chápaný tiež ako C_1H_4 , a teda $x = 1$, $y = 4$. Prebytok vzduchu je známy zo zadania, takže $XSO = 0.15$. V prípade, že zloženie vzduchu sa zjednodušuje, obsah O_2 vo vzduchu je 20.9 % a zvyšných 79.1 % tvorí N_2 . Znamená to, že na každú jednotku kyslíka pripadne $0.791 / 0.209 = 3.78$ jednotiek dusíku, teda $a = 3.78$. Dosadením všetkých neznámych do rovnice (2.1) vznikne



Po úprave má výsledná rovnica tvar



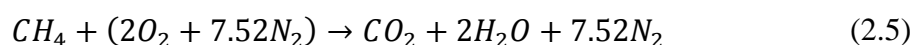
Pre popis procesu spaľovania sa v niektorých prípadoch používa spaľovacia rovnica metánu, ktorý je vo svojej podstate obdobný so spaľovaním iných palív.



Stechiometria reakcie určuje v danom systéme kvantitatívny vzťah medzi kyslíkom a palivom. Existuje niekoľko metód určovania stochiometrie. Najčastejšie všeobecne používaná metóda je daná vzťahom [2]

$$S_1 = \frac{\text{Objemový prietok oxidačného činidla}}{\text{Objemový prietok paliva}} \quad (2.4)$$

Pre názornú ukážku bol teda vybraný metán, ktorého zjednodušenú reakciu so vzduchom popisuje stochiometrická rovnica



kde vzduch je chápaný ako zmes $2O_2 + 7.52N_2$. Pre tento prípad má vyjadrenie stochiometrov tvar

$$S_1 = \frac{2 + 7.52}{1} = 9.52$$

To znamená, že pre spálenie 1 mN³ metánu je potrebných 9,52 mN³ atmosférického vzduchu pri stechiometrických podmienkach.

Problémom tejto metódy bežne používanej v priemysle je fakt, že v prípade zmeny zloženia oxidačného činidla a zmeny stechiometrických pomerov, je nutné vykonať prepočet stechiometrie. Spomínaný prepočet nie je nutné vykonávať v prípade, keď ako oxidačné činidlo je zakaždým používaný vzduch, čo sa teda týka väčšiny spaľovacích procesov.

Druhou z metód určovania stechiometrie je metóda zanedbania inertov v oxidačnom činidle. Keďže pre reakciu nie sú potrebné, berie sa preto do úvahy len O₂ [2]

$$S_2 = \frac{\text{Objemový prietok } O_2 \text{ v oxidačnom činidle}}{\text{Objemový prietok paliva}} \quad (2.6)$$

Keďže v tejto metóde sú inertý zanedbané, z vyššie uvedenej reakcie sa do úvahy berie len zložka kyslíka. Vyjadrenie stechiometrov má teda tvar

$$S_2 = \frac{2}{1} = 2$$

Táto metóda sa využíva najmä pri procesoch, v ktorých dochádza k obohacovaniu kyslíkom. Dôvodom je široká škála koncentrácií oxidačného činidla, zatiaľ čo podstatný je podiel čistého kyslíka. Uvedením na príklade reakcie metánu s čistým kyslíkom bude stechiometria pre oba prípady rovnaká, teda $S_1 = S_2$. V prípade, že je kyslík nahradený vzduchom, S_2 ostane nemenné a S_1 sa bude meniť. Výhodou používania stechiometrie S_2 je fakt, že je nezávislá na zložení oxidačného činidla. V prípade dokonalého spaľovania CH₄, s nulovým prebytkom kyslíka, je $S_2 = 2$ nezávisle od množstva dusíku obsiahnutého v oxidačnom činidle. Pre toto teoreticky dokonalé spaľovanie môže byť definovaný stechiometrický pomer S_2^P , ktorý bude pre prípad reakcie CH₄ a O₂ konštantný $S_2^P = 2$. V prípade S_1 je za rovnakých podmienok, teda stechiometrický pomer S_1^P , ktorý sa však mení v závislosti od zloženia oxidačného činidla. V skutočnosti však dokonalé spaľovanie nikdy nedosiahneme a plameň potrebuje určitý prebytok kyslíka. Je to spôsobené nedokonalým premiešaním paliva a oxidačného činidla. V prípade spaľovania metánu s nedostatkom vzduchu je hodnota $S_2 < 2$, a naopak v prípade spaľovania metánu s prebytkom vzduchu je hodnota $S_2 > 2$. Pre hodnoty S_1 takéto rozdelenie, bez bližšieho upresnenia zloženia oxidačného činidla, nemôže byť vytvorené.

Podiel kyslíka v oxidačnom činidle sa môže líšiť. Hodnotu podielu kyslíka v oxidačnom činidle vyjadruje Ω , ktorú je možné zistiť zo vzťahu [2]

$$\Omega = \frac{\text{Objemový prietok } O_2 \text{ v oxidačnom činidle}}{\text{Objemový prietok oxidačného činidla}} \quad (2.7)$$

Jej hodnota pri použití vzduchu je $\Omega = 0,2$. V prípade spaľovania čistého kyslíka je hodnota $\Omega = 1$. Z jej hodnoty možno teda odčítať mieru obohacovania spaľovacieho vzduchu kyslíkom, ktorá je v prípade $\Omega = 0,41$ rovných 20 % (41 % - 21 %).

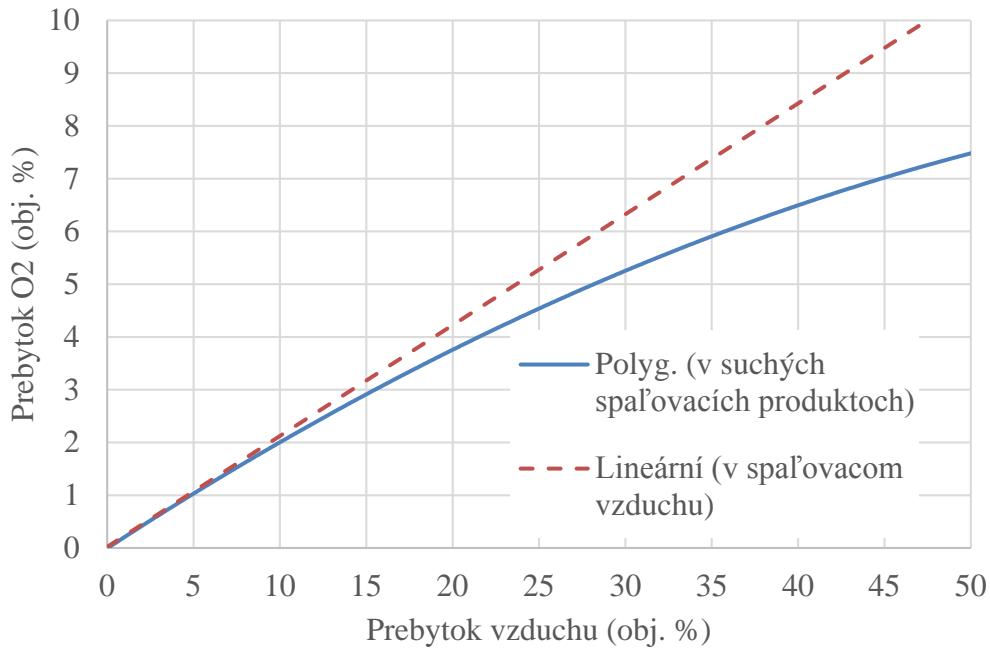
2.1 Prebytok vzduchu

Pre kontrolu a monitorovanie výkonu spaľovacieho systému sa často využíva množstvo kyslíka v spalinách. Najvýhodnejšie je, ak spaľovací proces prebieha za čo najmenšieho prebytku kyslíka bez tvorby veľkého množstva oxidu uhľnatého. Na množstvo prebytočného vzduchu má vplyv niekoľko faktorov. Jedným z nich je rôznorodosť oxidačného činidla použitého pri spaľovaní. Vo väčšine prípadov je ako oxidačné činidlo používaný atmosférický vzduch, ktorého vlastnosti (napr. teplota, relatívna vlhkosť) sa zo dňa na deň, respektíve počas dňa, výrazne menia. Medzi premenné vplyvajúce na množstvo prebytočného vzduchu patrí kvalita a zloženie paliva, ktoré sa môžu značne meniť. Jedným z faktorov je množstvo vzduchu, ktoré sa vďaka netesnostiam dostane do spaľovacieho priestoru. Tento faktor sa vyskytuje najmä v starších zariadeniach, ktoré neboli dostatočne utesnené. Vďaka podtlaku vyvolanému procesom v nich dochádza k prisávaniu vzduchu netesnosťami. Ďalšou premennou je ovládací systém spaľovacieho procesu. Zatiaľ čo automatický systém priebežne monitoruje množstvo kyslíka obsiahnutého v spalinách, pri manuálnom ovládaní kontrola a následná korekcia neprebíha tak často [2].

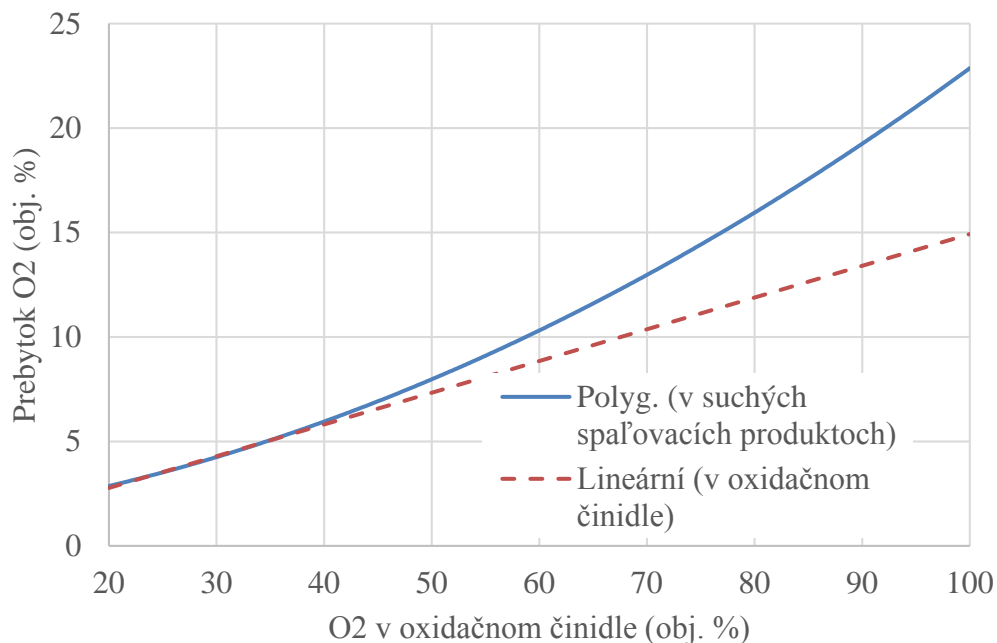
Vo väčšine priemyselných spaľovacích systémoch nedochádza k meraniu prietoku spaľovacieho vzduchu. Prebytok oxidačného činidla je ale následne dopočítavaný z hodnôt koncentrácie O_2 obsiahnutého v suchých spalinách, avšak za predpokladu, že do pece z dôvodu netesností nevniká žiadny vzduch. Pre výpočet prebytku O_2 môže byť použitý vzťah

$$XSO = \frac{[x + a(x + y)/4](suchý O_2)}{(x + y/4)[1 - (1 + a)(suchý O_2)]} \quad (2.8)$$

Pri spaľovaní sa niekedy využíva pravidlo (v anglickej terminológii tiež „a rule of thumb“), ktoré hovorí o ekvivalencii množstva O_2 v suchých spalinách s prebytkom O_2 v oxidačnom činidle. Toto pravidlo však stráca na presnosti v prípade, že sa prebytok vzduchu zvyšuje nad hranicu bežne používanú, čo je 10 – 15 % (obr. 2.1). Nad touto hranicou je zrejmé, že nárast obsahu O_2 v suchých spalinách je nižší ako v spaľovacom vzduchu. Ak však predpokladáme, že väčšina spaľovacích procesov prebieha v rozmedzí bežných hodnôt, presnosť tohto pravidla je dostačujúca. Ďalším problémom tohto pravidla je jeho platnosť, ktorá je obmedzená na použitie vzduchu ako oxidačného činidla (obr. 2.2). S nárastom obsahu O_2 v oxidačnom činidle v porovnaní so spaľovaním bežného atmosférického vzduchu prudko narastá obsah O_2 v suchých spalinách.



Obr. 2.1 Graf závislosti prebytku O₂ v spaľovacom vzduchu a v suchých spalinách ako funkcia prebytku vzduchu pre spaľovanie metánu [2].



Obr. 2.2 Graf závislosti prebytku O₂ v oxidačnom činidle (obsahujúcom O₂ a N₂) a v suchých spalinách ako funkcia O₂ v oxidačnom činidle, pre spaľovanie metánu s prebytkom oxidačného činidla 15 % [2].

2.2 Teplota plameňa a výkon horáku

Teplota plameňa je dôležitou premennou pri určovaní prenosu tepla z plameňa na ohrievaný materiál. Má zásadný význam, pretože predstavuje limitnú hodnotu, ku ktorej sa môže teplota ohrievaného materiálu blížiť. Teplota plameňa tiež ovplyvňuje voľbu materiálov pri výstavbe spaľovacieho zariadenia.

Rozlišujeme niekoľko typov teplôt plameňa. Teoretická teplota plameňa je maximálnou hodnotou teploty plameňa pri spaľovaní plynu so vzduchom alebo s kyslíkom, ktorú možno dosiahnuť iba za adiabatických podmienok. Táto teplota predpokladá dokonalé spaľovanie paliva s presnou teoretickou hodnotou vzduchu alebo kyslíka, pričom všetko privedené teplo využíva na ohrev spalín. Ďalším typom je adiabatická teplota plameňa, ktorá sa od teoretickej teploty plameňa odlišuje tým, že pri dokonalom spaľovaní je istý definovaný prebytok vzduchu. Adiabatická teplota plameňa taktiež predpokladá nulové tepelné straty do okolia, teda adiabatický priebeh spaľovania. V porovnaní s teoretickou má adiabatická teplota plameňa nižšie hodnoty z dôvodu zvýšenia množstva použitého spaľovacieho vzduchu [7].

Reálna teplota plameňa je v porovnaní s adiabatickou teplotou nižšia z dôvodu nedokonalého spaľovania a radiácie z plameňa. Skutočná teplota plameňa závisí od toho, ako plameň vyžaruje svoje teplo a tiež od toho, ako spaľovací systém, ohrievaný materiál a žiaruvzdorné steny absorbujú toto žiarenie. Čím viac budú absorbovať tepelné žiarenie, tým bude teplota plameňa nižšia. Tento jav nastáva v prípade, že ohrievaný materiál a steny majú nižšie teploty a vysokú schopnosť absorpcie žiarenia. Vo všeobecnosti má plameň s vysokou svetelnou intenzitou nižšiu teplotu v porovnaní s plameňom, ktorého svetelná intenzita je minimálna [2].

Hlavnou úlohou spaľovacieho procesu je využitie chemickej energie obsiahnutej v palive, premena na tepelnú energiu a jej následný prenos do ohrievaného materiálu alebo do samotnej pece. Tepelná účinnosť procesu je tým väčšia, čím väčšia je miera prenosu tepla z produktov na ohrievaný materiál, respektíve spaľovaciu komoru. Po opustení plameňa, produkty spaľovania v plynnom stave obvykle strácajú teplo prúdením a radiáciou počas ich prechodu spaľovacou komorou. Z toho dôvodu je teplota spalín omnoho nižšia ako teplota plameňa v tepelne efektívnom procese. Zloženie produktov spaľovania sa preto môže meniť v závislosti na teplote [2].

Pre výpočet výkonu horáku P [kW] môžeme použiť vzťah

$$P = \frac{\dot{V} \cdot LHO}{3600} \quad (2.9)$$

kde \dot{V} je objemový prietok plynu [mN³/h],
 LHO výhrevnosť paliva [kJ/mN³].

3 Základné charakteristiky OEC

3.1 Súčasný stav poznania v oblasti OEC

Hoci má spaľovanie s prídavným kyslíkom širokú škálu využitia, štúdiu pre jeho lepšie pochopenie zatiaľ veľa času venovaného nebolo. Spaľovacím charakteristikám metánového spaľovania s prídavným kyslíkom sa však venovalo niekoľko prác. Jednej z nich sa venovali Zhen a spol. [8], ktorí sa zaoberali štúdiom charakteristík inverzného difúzneho vírivého plameňa obohateného o kyslík. Došli k záverom, že obsah kyslíka má vplyv jednak na vzhľad plameňa, ale tiež aj na jeho teplotu, celkové emisie a iné.

Vplyv kyslíka s koncentráciou 21 - 30 % na rýchlosť ohrevu, emisie, rozloženie teplôt a spotrebu paliva vo svojich testoch študovala skupina Wu a spol. [9]. Počas teplotných skúšok zistili, že pri použití koncentrácie kyslíka 30 % dôjde k ohrevu na požadovanú teplotu 1200 °C za 46 % času v porovnaní s koncentráciou kyslíka 21 %. V prípade emisií NO_x však došlo k nárastu ich koncentrácie, a to až 4,4 krát, zatiaľ čo nárast CO₂ mal lineárny charakter počas celej doby navyšovania koncentrácie. Zistilo sa, že navýšením koncentrácie na hodnotu 30 % došlo v porovnaní s bežným obsahom kyslíka 21 % k zníženiu spotreby paliva až o 26 %.

K obdobným výsledkom sa dopracovali aj Bělohradský a spol. [10], ktorí testovali vplyv kyslíka s koncentráciou 21 - 46 % na spaľovanie. Ich testy boli zamerané na vplyv kyslíka na emisie NO_x, teplotu spalín, tepelné toky a charakteristiku plameňa. Zistili, že vplyvom navýšenia teploty v peci, čo bol dôsledok zvýšenia koncentrácie kyslíka, prudko narástli emisie NO_x. Pri zvýšenej koncentrácii kyslíka z 21 % na 32 % koncentrácia NO_x vzrástla 40 - násobne pri jednostupňovom spaľovaní a 20 - násobne pri dvojstupňovom. Pri dvojstupňovom spaľovaní však pri navýšení koncentrácie kyslíka na hodnotu 46 % došlo k prudkému poklesu emisií NO_x. Nárastom koncentrácie kyslíka sa dosiahol aj prenos tepla žiarením. Tepla, ktorého sa vyprodukovalo pri koncentrácii kyslíka 46 %, bolo o 20 % viac ako pri bežnej koncentrácii 21 % pri dvojstupňovom spaľovaní. Pri obohacovaní kyslíkom dosiahli stabilnejší, žiarivejší a dlhší plameň.

Merlo a spol. [11] skúmali vplyv obohacovania kyslíkom na emisie (napr. CO, CO₂, NO_x) a stabilitu vírivého plameňa metán / vzduch bez predmiešavania. Výsledkom bolo zistenie, že navyšovaním koncentrácie kyslíka dochádza k vyššej miere premeny CO na CO₂, a taktiež k značnému nárastu emisií NO_x, najmä z dôvodu vyššej teploty plameňa. Zistilo sa, že už pri malom navýšení koncentrácie kyslíka v spaľovacom vzduchu došlo k zlepšeniu stability plameňa.

Danej oblasti výskumu sa taktiež venovali Tan a spol [12], ktorí pre štúdium s obohateným kyslíkom a O₂/CO₂ spaľovanie, použili vertikálnu spaľovaciu komoru. Počas experimentov zistili, že vplyvom vyšších teplôt, ktoré boli dosiahnuté navýšením koncentrácie kyslíka v spaľovacom vzduchu, došlo k nárastu emisií NO_x. Ich tvorba je však potláčaná pri O₂/CO₂ spaľovaní z dôvodu nižšieho obsahu dusíku v spaľovacom vzduchu.

Niekoľko štúdií spaľovania s prídavným kyslíkom pre oblasť bezplameňového spaľovania bolo vypracovaných Sanchezom a spol. [13]. Zisťovali vplyv obohatenia v rozmedzí od 21 % až po 35 % na výkon bezplameňovej spaľovacej pece s regeneračným horákom. Ako bolo zistené, dosiahnutie žiadneho svetelného efektu, rozsiahlej reakčnej plochy a jednotného teplotného profilu bolo možné pre všetky stupne obohatenia, čo je pre bezplameňové spaľovanie typické. Hodnota dosiahnutých emisií neprekročila 5 ppm, a tiež celková efektívnosť narástla takmer o 5 % pre koncentráciu kyslíka 30 %.

3.2 Kyslík

Kyslík je jedným z chemických prvkov, ktorý je v čistej forme dvojatómová molekula označovaná ako O_2 s mólovou hmotnosťou 32,00 g/mol. Kyslík v plynnom skupenstve, niekedy taktiež označovaný aj ako GO_x , sa považuje za plyn so silnými oxidačnými účinkami a je nepatrne ťažší ako vzduch. Tekutý kyslík, označovaný ako LO_x , je bez zápachu, má bledomodrú farbu, je priehľadný a mierne ťažší ako voda. Kyslík je silné oxidačné činidlo, čo znamená, že je nehorľavý, ale má schopnosť zvýšiť rýchlosť spaľovania, pretože je vysoko reaktívny [14].

V priemysle sa kyslík používa na zvyšovanie teploty aj rýchlosti mnohých chemických reakcií pri oxidácii ropy, ropných produktov, zemného plynu, pri výrobe kyseliny dusičnej, kyseliny sírovej a pri mnohých procesoch patriacich do organickej technológie. V kovospracujúcom priemysle je využívaný na rezanie, zváranie, ohrev, tavenie a pri výrobe mnohých kovov. Využíva sa taktiež v priemysle zaoberajúcom sa spracovaním nerastov, napríklad pri výrobe skla, keramiky, tehál, vápenca a cementu. V chemickom priemysle sa využíva jednak na ohrev, ale taktiež aj na chemickú syntézu. V ekológii je používaný na čistenie odpadových vôd a na spaľovanie odpadu [4].

3.3 Metódy OEC

Mnoho priemyselných procesov, pri ktorých dochádza k ohrevu, môže byť vylepšených nahradením časti alebo všetkého vzduchu kyslíkom [15]. Proces OEC sa zvykne využívať hlavne v procesoch, ktoré sa vyznačujú požiadavkou na vysokú teplotu spalín, niekedy až 1100 °C, majú však nízku tepelnú účinnosť zapríčinenú obmedzeniami pri prenose tepla a vysokou hodnotou emisií NO_x [4].

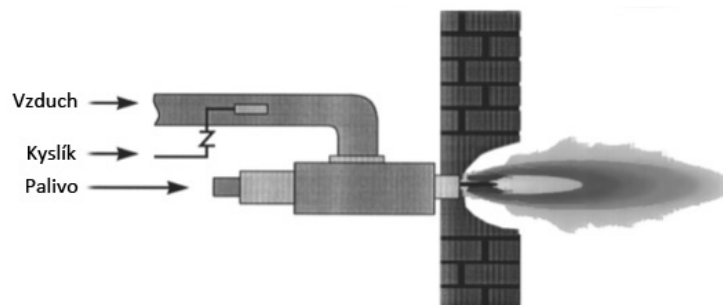
Pri využití vzduchu ako oxidačného činidla sa v procese spaľovania využíva len O_2 . Znižovaním podielu N_2 v oxidačnom činidle získavame mnoho výhod, ako sú napríklad zvýšenie efektivity procesu a zníženie emisií (predovšetkým NO_x).

Ako sme už v úvode spomínali, k procesu obohacovania kyslíkom môže dochádzať štyrmi spôsobmi, ktoré sa navzájom líšia hlavne konštrukciou a množstvom privádzaného O_2 a vzduchu.

3.3.1 Obohacovanie vzduchu kyslíkom

Tento druh obohacovania znázornený na obrázku obr. 3.1, je považovaný za nízkoúrovňové obohacovanie O_2 alebo predzmesové obohacovanie. Na túto technológiu môže byť prispôbené veľké množstvo horákov pôvodne určených na spaľovanie paliva s atmosférickým vzduchom. Pri danom type obohacovania dochádza k vstrekovaniu O_2 do privádzaného spaľovacieho vzduchu. K danému prívodu dochádza najmä pomocou difúzora, aby sa dosiahla požadovaná koncentrácia. Tento spôsob obohacovania je lacným variantom prispôbenia systému, ktorý nám zabezpečí značné výhody.

Za normálnych podmienok pridanie O_2 skráti plameň a zvýši jeho intenzitu. Pri neprimeranom navýšení obsahu O_2 v spaľovacom vzduchu, privádzaného do pôvodného horáku, určeného pre spaľovanie s atmosférickým vzduchom, sa však môže stať, že dĺžka plameňa sa skráti až príliš, a to už je nežiaduce. Vyššia teplota plameňa môže tiež poškodiť samotný horák alebo výstelku horáku. Z bezpečnostných dôvodov je niekedy nutné upraviť prívodné vzduchové trubky z dôvodu navýšenia množstva O_2 [4].



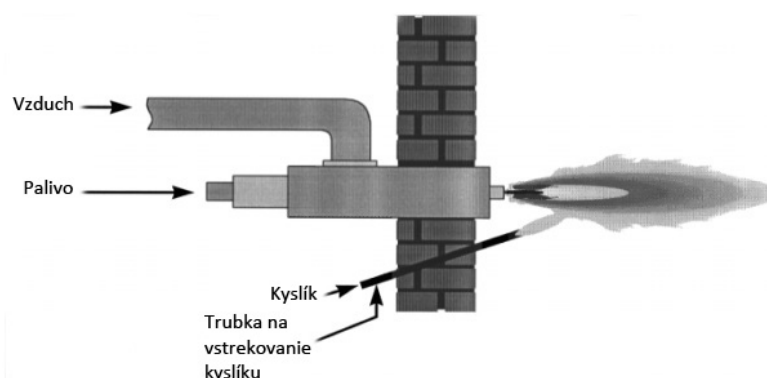
Obr. 3.1 Schéma obohacovania vzduchu kyslíkom [16].

3.3.2 Injektovanie kyslíka do pece

Tento variant je známy taktiež pod názvom „*oxygen enriched air staging*“ (OEAS). Nevýhodou je cena za pridanie ďalšieho otvoru do spaľovacej komory pre prírodnú trubicu O₂. Avšak daný otvor je obvykle veľmi malý. Táto cena je navýšená z dôvodu ceny montáže, a taktiež z dôvodu zníženia produktivity.

Takisto ako v prvej metóde, aj tu dochádza k nízkoúrovňovému obohacovaniu kyslíkom. V porovnaní s predmiešaním sú pri tomto type prívodu O₂ nižšie emisie. V závislosti od miesta vstrekovania môže byť tvar plameňa predĺžený stupňovitým prívodom kyslíka [17]. Táto metóda dokáže teplo uvoľňované z plameňa rozptýliť rovnomernejšie ako pri obohacovaní s predmiešaním O₂ [4].

V špeciálnych prípadoch je O₂ injektovaný do miesta medzi plameňom a materiálom, pričom dochádza k „vytiahnutiu“ plameňa smerom k materiálu (obr. 3.2). Zatiaľ čo obohacovanie vzduchom zvyšuje teplotu plameňa rovnomerne, táto technika obohacuje len spodnú časť plameňa, čím sa zvyšuje jeho teplota a na ohrievaný materiál smeruje väčšie teplo. Hoci premiešanie kyslíka a spaľovacieho vzduchu nie je také rovnomerné ako pri predmiešavaní, táto nevýhoda je vyvážená efektívnejším prívodom dodatočného tepla. Ďalšou výhodou je, že žiaruvzdorný strop pece musí odolávať menším teplotám v porovnaní s obohacovaním vzduchom. Taktiež pri tomto type je menšia pravdepodobnosť prehriatia horáku určeného pre spaľovanie s atmosférickým vzduchom a ústia horáku. Tento fakt predlžuje životnosť jednak horáku, ale aj samotnej pece [4].



Obr. 3.2 Schéma injektovania kyslíka do pece [4].

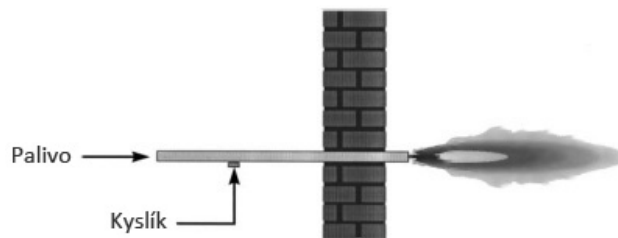
3.3.3 Nahradzovanie spaľovacieho vzduchu kyslíkom

Pri danom type takmer vo všetkých prípadoch zostáva palivo a kyslík oddelene vo vnútri horáku a nedochádza k zmiesaniu až do chvíle, kým sa nedostanú k výstupu z horáku (obr. 3.3). Toto je často nazývané ako horáky s miešaním v tryske, ktoré vytvárajú difúzny plameň.

Z bezpečnostných dôvodov nedochádza k predmiešavaniu plynov. Je to zapríčinené tým, že čistý kyslík je vysoko reakčný a je tu reálna hrozba výbuchu v prípade, že dôjde k predmiešaniu.

V tejto metóde sa na spaľovanie paliva využíva veľmi čistý kyslík (> 90 % O₂ na objem). Na výrobu O₂ existuje niekoľko spôsobov, napr. rozkladom oxidov. V systéme kyslíkového spaľovania závisí čistota oxidačného činidla práve od metódy, akou bol O₂ vyrobený.

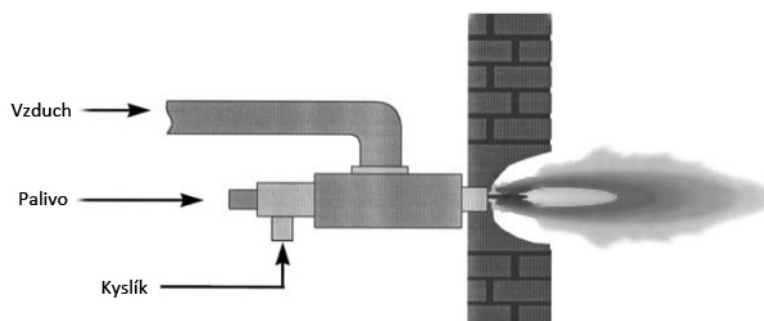
Špeciálnou verziou kyslíkového spaľovania, známou taktiež ako riedené kyslíkové spaľovanie, je keď palivo a kyslík sú samostatne vstrekané do spaľovacej komory. Aby sa zabezpečilo vznietenie, teplota komory musí byť vyššia ako je samozápalná teplota paliva. V závislosti na geometrii môžeme dosiahnuť takmer neviditeľný plameň, niekedy je to známe pod pojmom bezplameňové spaľovanie. Výhodou tejto technológie je zníženie emisií, nakoľko sa minimalizujú horúce miesta v plameni, čo vo všeobecnosti znižuje emisie. Nevýhodou, okrem bezpečnosti, môže byť zníženie prenosu tepla, keďže teplota a emisivita plameňa majú byť redukované [4].



Obr. 3.3 Schéma nahradzovania spaľovacieho vzduchu kyslíkom [4].

3.3.4 Samostatný prívod vzduchu a kyslíka do horáku

Táto metóda využíva samostatné vstrekovanie vzduchu a O₂ cez horák (obr. 3.4). Táto metóda má mnoho výhod. Je typom vysokoúrovňového vstrekovania O₂ v porovnaní s metódou obohacovania O₂ alebo metódou stupňovitého prívodu O₂, čo poskytuje väčšie výhody. Taktiež sú oveľa nižšie operačné náklady ako pri nahradzovaní spaľovacieho vzduchu kyslíkom, ktorý využíva veľmi vysoké hodnoty O₂. Tvar plameňa a oblasť uvoľňovania tepla môžu byť upravované reguláciou prívodu O₂ do procesu. Zvyčajne to je lacné prispôbenie systému, pretože mnohé horáky určené pre spaľovanie s atmosférickým vzduchom, sú navrhnuté pre dva typy palív, a to obyčajne pre kvapalné palivo, ktorým je olej a plyné palivo, ktorým je zemný plyn. Vstrekovanie oleja v strede duálneho palivového horáku môže byť obvykle jednoducho odobrané a nahradené kyslíkovým horákom. Využitím tejto metódy OEC môže byť zloženie oxidačného činidla rôzne. Namiesto toho, aby sa skladalo z čistého O₂, môže sa skladať z časti zo vzduchu a z časti z O₂ [4].



Obr. 3.4 Schéma samostatného prívodu vzduchu a kyslíka do horáku [4].

4 Bezpečnosť pri OEC

4.1 Spaľovací trojuholník

Na vyvolanie a udržanie plameňa je nutná prítomnosť paliva, kyslíka a zapaľovania súčasne, čo je znázornené na obr. 4.1. Odobratie akéhokoľvek z týchto troch prvkov zabráni vzniku plameňa alebo zapríčini zhasnutie existujúceho plameňa (pokiaľ neuvažujeme, že samotný existujúci plameň môže byť považovaný za zapaľovanie) [18].



Obr. 4.1 Spaľovací trojuholník [4].

4.2 Návrh vypracovania

Väčšina prístrojov zabezpečujúcich spaľovanie sa skladá z dvoch oddelených častí. Prvou časťou je samotný horák a druhou zvyšné vybavenie obvodu, ktoré má na starosti kontrolu horáku a bezpečnosť

Konštruktér horáku berie do úvahy prítomnosť plameňa a snaží sa to navrhnuť čo najbezpečnejšie s najnižšími rizikami. Kritickými bezpečnostnými problémami sú napríklad údržba stability plameňa, kontrola tvaru a umiestnenia plameňa, vyhýbanie sa nadmerne vysokým teplotám a korózii, minimalizácia nežiaducich produktov spaľovania (emisií) a zabráňovanie nežiaducej taveniu zvyšku pece a príslušenstva. Vzhľadom na to, že pri OEC vzrastá teplota a rýchlosť plameňa v porovnaní so spaľovaním so vzduchom, začína byť dôležitá aj teplota.

Kompatibilita materiálu s kyslíkom je vlastnosť materiálu horieť alebo nehorieť v prostredí obohatenom o kyslík. Kyslík sám o sebe nie je nebezpečný, nevyvolá horenie pokiaľ nie je prítomné palivo, avšak kombinácia kyslíka s palivom môže byť veľmi nebezpečná (napr. prudké vzplanutie alebo výbuch) [4]. Výber materiálu a komponentov pre kyslíkové spaľovanie alebo pre spaľovanie s prídavným kyslíkom si vyžaduje určité znalosti. Termín „kompatibilné s kyslíkom“ slúži na popis materiálu, ktorý bol analyzovaný a schválený pre prácu s kyslíkom alebo pre prácu v prostredí obohatenom o kyslík. V kyslíkovom systéme sa na označenie konštrukčného materiálu podľa možnosti využitia používa kyslíkový index materiálu. Kyslíkový index materiálu je definovaný ako minimálna koncentrácia kyslíka vyjadrená ako podiel v zmesi kyslíka s dusíkom vzhľadom na to, že len kyslík podporuje horenie.

4.3 Nebezpečenstvo plameňa

Hlavné nebezpečenstvo plameňa je vytvárané systémom dodávky paliva z dôvodu hrozby úniku paliva do okolitého prostredia alebo atmosféry, ktorou je takmer vždy vzduch. Je to bezprostredné riziko vzhľadom na to, že je možnosť nekontrolovaného plameňa alebo explózie v závislosti na rozmeroch a mieste úniku, ako aj dostupnosť zapaľovania [19].

Značným nebezpečenstvom je taktiež únik kyslíka využitého v procese spaľovania do prostredia. Pravdepodobnosť plameňa a rozsahu plameňa závisí od veľkosti trhliny,

rýchlosti, ktorou kyslík uniká do okolitej atmosféry a dostupnosti zapalovania. Plameň, ktorý obsahuje čistý kyslík, môže byť náhly, prudký a veľmi deštruktívny [4].

Tradičné bezpečnostné metódy pri horení plynného paliva sú: kontrola limitu zápalnosti (vyhýbanie sa akumulovaniu horľavých zmesí paliva a oxidantu), kontrola zapalovania (predísť zapáleniu horľavej zmesi plynov), zánik plameňa (metóda zapríčiňujúca ukončenie spaľovania) a kontrola poškodenia (metóda síce zahŕňa plameň alebo výbuch, avšak minimalizuje potenciálne poškodenie). Tieto metódy sú konštruktérmi využívané na minimalizáciu nebezpečenstva spojeného s plameňom pri OEC. Príkladom aplikácie techniky kontroly poškodenia je inštalácia betónového krytu obklopujúceho kyslíkový kompresor [4].

4.4 Kontrola limitu zápalnosti

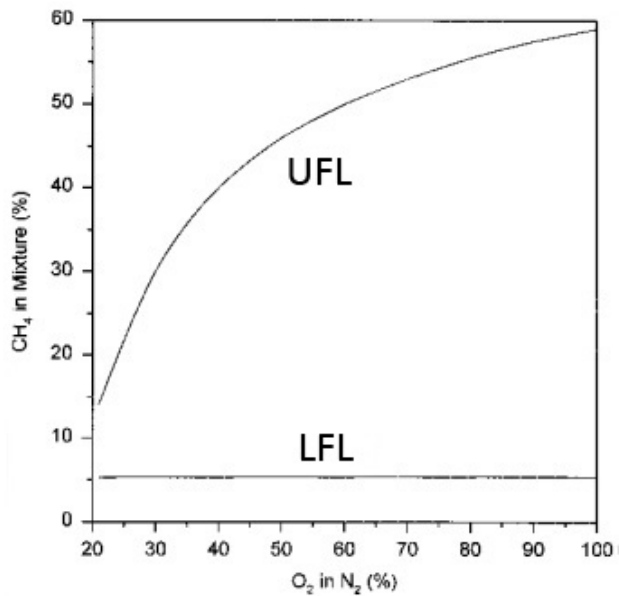
Vo väčšine spaľovacích aplikácií je hlavným prístupom pre zaistenie bezpečného procesu vyhýbanie sa akumulovaniu horľavých zmesí paliva a oxidantu. Poznáme tri limity zápalnosti pre plynné spaľovanie. Sú nimi nízko zápalný limit (LFL), vysoko zápalný limit (UFL) a limit minimálneho spaľovacieho kyslíka (MinO_2). Limit LFL je definovaný ako najnižší percentuálny podiel paliva v zmesi s oxidantom, ktorý bude šíriť plameň. Limit UFL je zas definovaný ako najvyšší percentuálny podiel paliva v zmesi s oxidantom, ktorý bude šíriť plameň. Naopak limit MinO_2 je definovaný ako najnižší možný percentuálny podiel kyslíka v zmesi s oxidantom, ktorý bude podporovať šírenie plameňa [4].

Základný vzorec pre výpočet medzí zápalnosti [7]:

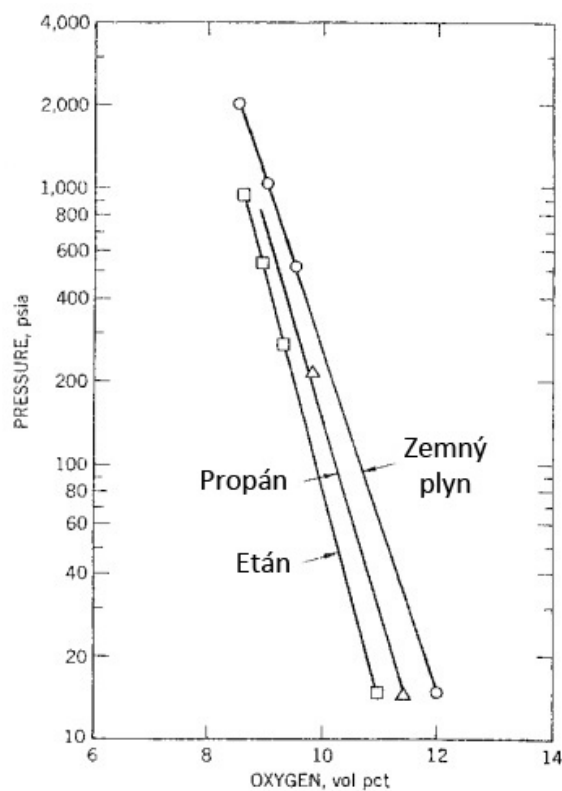
$$L_{(h,d)} = \frac{100}{\sum \frac{c_i}{L_{i(h,d)}} + \frac{n}{100}} \quad (4.1)$$

kde $L_{(h,d)}$ je horná alebo dolná medza zápalnosti vykurovacieho plynu [%],
 C_i koncentrácia jednotlivých horľavých zložiek [obj %],
 $L_{i(h,d)}$ tabuľková hodnota hornej alebo dolnej medze zápalnosti pre zložku i [%],
 n súčet koncentrácií nehorľavých zložiek vykurovacieho plynu [obj %].

Údaje limitu zápalnosti závisia od chemického správania spaľovacej reakcie, tlaku a teploty zmesi, geometrii a povrchu zariadenia, prítomnosti riedidla, spomaľovača alebo iných materiálov a mnohých ďalších. Graf na obr. 4.2 zobrazuje limity zápalnosti pre metán vo vzduchu pri izbovej teplote a atmosférickom tlaku. Na grafe na obr. 4.3 je znázornený vplyv tlaku na minimálne požiadavky hodnôt kyslíka pre šírenie zemného plynu, etánu a propánu v zmesi vzduchu s dusíkom (napr. pri izbovej teplote a atmosférickom tlaku je MinO_2 pre zemný plyn 12 % a pre propán 11,5 %) [4].



Obr. 4.2 Limity zápalnosti pre metán vo vzduchu obohatenom o O₂ v závislosti na množstve kyslíka [4].



Obr. 4.3 Vplyv tlaku na minimálne požiadavky hodnôt kyslíka pre šírenie zemného plynu, etánu a propánu v zmesi vzduchu s dusíkom pri teplote 25 °C [4].

Novo nainštalované palivové a kyslíkové trubky sú obyčajne prečistené inertným plynom (napr. dusíkom), aby sa zabránilo krátkodobým možnostiam vzniku horľavých zmesí, ktoré sa môžu vyskytnúť počas uvedenia zariadenia do prevádzky. Tento postup sa používa aj pri údržbe, resp. pre prípravu systému na dlhodobé odstavenie. Čistenie pece vzduchom alebo inertným plynom pred, niekedy aj po, snahe o zapálenie akéhokoľvek horáku je hlavnou

technikou, ktorá sa využíva na vyhnutie sa plameňom alebo výbuchu. Zapalovanie horáku je určitý čas korigované na nízku rýchlosť horenia pre minimalizáciu množstva horľavej zmesi, ktorá môže vzniknúť ako výsledok neúspešných pokusov na vznietenie horáku (pokus o zapálenie) [4].

Kontrolné zariadenia plameňa sú prepojené s palivovým a kyslíkovým bezpečnostným ventilom, ktorý po detekcii zániku plameňa automaticky odstaví prívod paliva aj kyslíka. Niektoré zariadenia využívajú taktiež vstavaný nízkoteplotný alarm pece (vstavaný do bezpečnostných ventilov) aby sa zaručilo, že teplota pece je značne vyššia ako je samozápalná teplota zmesi paliva a oxidantu, zatiaľ čo horáky horia [4].

Vzduchové prúdy obohatené o kyslík často obsahujú kyslíkový analyzátor, vstavaný do kyslíkových bezpečnostných ventilov, aby sa zaistilo, že k obohacovaniu kyslíkom dochádza v bezpečnej miere. Miera bezpečnosti obohacovania kyslíkom závisí od materiálu existujúceho vzduchového potrubia, čistoty vzduchového potrubia, tvaru potrubia a komponentov umiestnených za miestom, v ktorom dochádza k prívodu kyslíka [4].

4.5 Kontrola zapalovania

Zapálenie zmesi paliva a oxidantu, ku ktorému dochádza v rámci limitov, môže byť vyvolané niekoľkými spôsobmi, napr. navýšením teploty, dopadom častíc, elektrickým výbojom (oblúkom alebo iskrou), prudkým pretlakovaním, zvukovou rezonanciou, samovoľnou exotermickou reakciou, trením. Bez ohľadu na fyzikálny dopad, proces zapálenia musí dodať dostatočnú teplotu a energiu. V prípade OEC systému prítomnosť vysokej koncentrácie kyslíka vedie k nižším teplotám a energii, ktorá je potrebná na inicializáciu plameňa. Kontrola zapalovania sa snaží o minimalizáciu alebo o elimináciu všetkých zdrojov zapalovania, ktoré môžu vyvolať nežiaduci plameň, respektíve výbuch.

Kľúčovým problémom pri návrhu bezpečného zariadenia pre kontrolu kyslíkového toku a trubkového systému je rýchlosť kyslíka v systéme. Tento problém sa priamo vzťahuje na predchádzanie zapáleniu. Plyn má počas pohybu priestorom tendenciu unášať so sebou aj cudzie častice. Tieto častice môžu mať pôvod napr. v zariadení na výrobu plynu alebo v zásobnej nádrži, v samotnom plynovode, v nečistotách vyprodukovaných alebo privedených počas výroby. Keď daná častica narazí na povrch trubky alebo komponentov, uvoľní energiu a v prípade kyslíka môže byť táto energia dostačujúca na vznietenie častice alebo dokonca aj materiálu trubky. V závislosti na použiteľnom materiály trubky existuje maximálny rýchlostný limit pre plyn, ktorého prekročenie môže zapríčiniť vznietenie [4].

Redukcia počtu a veľkosti častíc v kyslíkovodoch tvorí prvý a najdôležitejší proces pri inštalácii. Tento proces začína dôkladným vyčistením všetkých komponentov a potrubí patriacich do sústavy. Väčšina kyslíkovodov je čistená inertným plynom (napr. dusíkom) pred uvedením systému do prevádzky. Zariadenie na kontrolu toku kyslíka musí navyše obsahovať filtre a sitá na minimalizáciu počtu a veľkosti častíc, ktoré môžu putovať kyslíkovodmi. Samotné sitá a filtre podliehajú pravidelnej kontrole a čisteniu.

4.6 Kyslíkovody

Kyslíkovod je vyhradené plynové zariadenie podľa predpisu ČSN 38 6461 [20]. Keďže kyslík je vysoko reaktívny, treba dodržiavať určité bezpečnostné predpisy. Medzi základné postupy dosiahnutia čistoty kyslíkovodu jednoznačne patrí odmasťovanie. Poznáme niekoľko postupov na dosiahnutie čistoty materiálu, ktorý prichádza do styku s kyslíkom:

- mechanické čistenie s následným odprášením (pre veľké, ľahko prístupné plochy),

- mechanické umývanie pomocou odmasťovacích roztokov biologicky odbúrateľných detergentov (na jednotlivé súčiastky a časti plôch, ktoré sú dobre prístupné armatúry),
- umývanie v perchloretylene (na ťažko prístupné, alebo neprístupné miesta, dlhé potrubia, vlnocové hadice a pod.)

Každý kyslíkovod má svoj maximálny povolený obsah znečisťujúcich látok (vrátane mechanických nečistôt), čo je charakterizované tzv. stupňom kontaminácie K, pre ktorý platí vzťah:

$$K = \frac{V \times (m_2/V_2 - m_1/V_1)}{S} \quad (4.2)$$

kde:	K je	stupeň kontaminácie	[mg/m ²],
	V	celkový objem použitého odmasťovača	[l],
	m ₁	hmotnosť odparku z čistého odmasťovača	[mg],
	V ₁	objem vzorku čistého odmasťovača	[l],
	m ₂	hmotnosť odparku z čistého odmasťovača	[mg],
	V ₂	objem vzorku použitého odmasťovača	[l],
	S	veľkosť odmasťovanej plochy	[m ²].

Hlavným nebezpečenstvom vo väčšine kyslíkovodov je spaľovanie zmesi, keďže oxidant je plynný materiál, ktorý môže podporovať spaľovanie častí systému, ktoré môžu byť kvapalné (napr. olej, mazivo, chladiaca zmes), ale aj tuhé (napr. potrubie, ventily, rozličné nástroje) [20].

Každý vzduchový systém obohatený o kyslík musí byť precízne prekontrolovaný. Toto zahŕňa otestovanie a kontrolu horákov, systému dodávky kyslíka a paliva, elektrických systémov, kontrolných systémov, celkového procesu ohrevu, umiestnenia zariadenia, prevádzkových postupov, personál, ktorý sa bude starať o chod zariadenia a mnohé ďalšie aspekty, ktoré vplývajú na bezpečný chod prevádzky [4].

5 Experimentálna časť

Cieľom experimentálnej časti práce bolo získať pre niekoľko prevádzkových podmienok horáku hodnoty rozloženia teplôt v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory, tepelných tokov a tiež teploty spalín. Prevádzkové podmienky boli nasledujúce:

- výkon horáku 750 kW,
- dvojstupňový prívod paliva (zemného plynu),
- percentuálny podiel O₂ v suchých spalínach 3 %,
- prietok kyslíka 0, 20 a 80 m³/h.

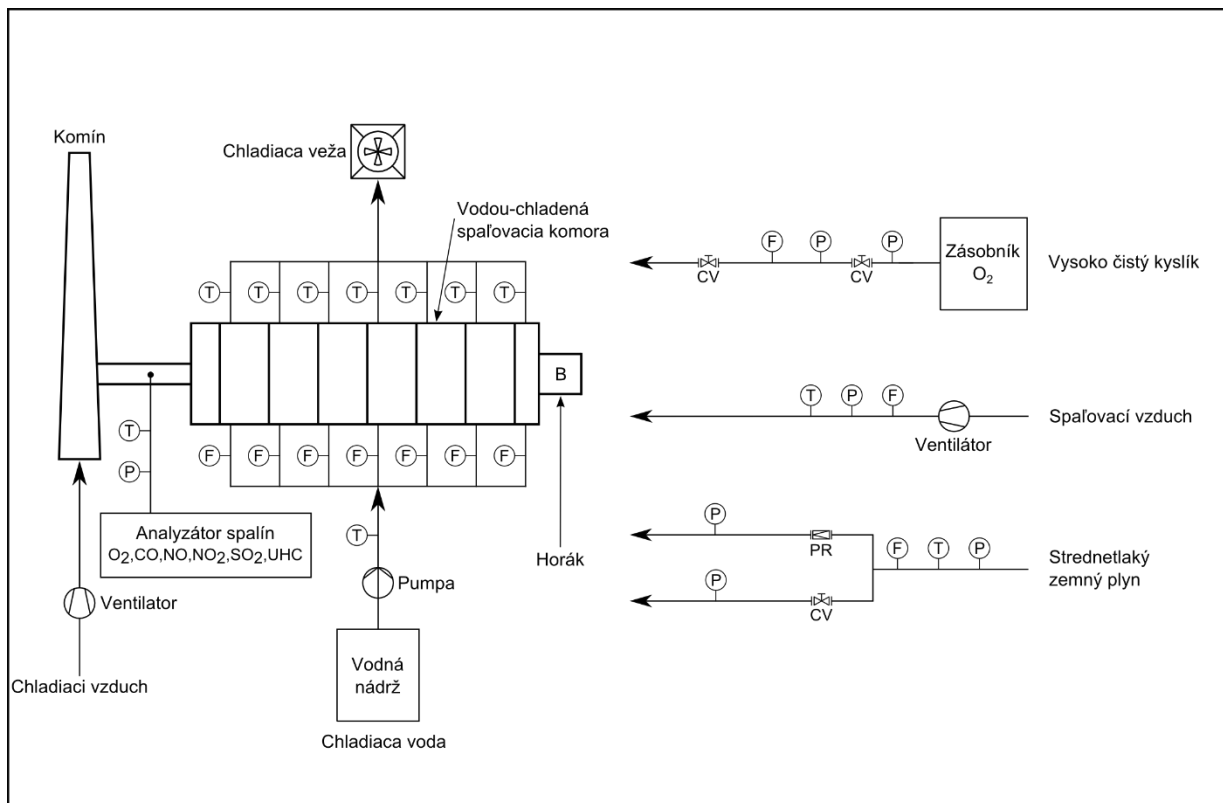
5.1 Popis zariadenia

Experimentálne merania OEC prebiehali na zariadení skúšobne horákov (obr. 5.1 a obr. 5.2). Dané zariadenie je primárne určené pre skúšky horákov ako na plynné, tak aj na kvapalné palivá. Maximálny výkon horáku je obmedzený maximálnou možnou výstupnou teplotou spalín 1050 °C, čo odpovedá v závislosti na palive a tvare plameňa 1500 - 1800 kW. Zariadenie vie pracovať ako v podtlaku, tak aj v pretlaku. Podtlak je vytváraný ejekčným účinkom chladiaceho vzduchu, pričom ejektor je umiestnený v spodnej časti komína. Pretlak je nastavovaný škrtiacou klapkou, ktorá sa nachádza v spalínovode.



Obr. 5.1 Zariadenie skúšobne horákov.

Hlavným aparátom daného zariadenia je spaľovacia pec, ktorá je horizontálna, dvojplášťová a chladená vodou. Pec má vnútorný priemer 1 m a jej dĺžka sa v závislosti od požiadaviek môže meniť od 2 m do 4 m. Chladiaca voda prúdi v siedmich samostatných sekciách nachádzajúcich sa v medziplášťovom priestore, pričom prvých šesť sekcií má dĺžku 0,5 m a posledná siedma sekcia má dĺžku 1m. V medziplášťovom priestore je použitá špirála, ktorá zabezpečuje usmernenie toku chladiacej vody, čo má za následok rovnomerné obtekanie okolo ochladzovaného povrchu. Chladiaca voda je privádzaná zo zásobníku s kontinuálnym dopúšťaním. Po tom, čo voda prejde spaľovacou komorou, je odvádzaná do chladiacej veže, nachádzajúcej sa mimo budovy, pričom po ochladení sa vracia naspäť do zásobníka. Vnútorný plášť komory nie je po stranách nijak izolovaný. Izolované sú akurát čelá spaľovacej komory pomocou vysokoteplotnej vlákna výstelky s hrúbkou 100 mm. Každá sekcia má na vstupe a výstupe vody senzory na meranie prietoku a teploty. Pomocou týchto údajov možno následne vyhodnotiť lokálne tepelné toky do steny komory po dĺžke plameňa, čo je vlastne jedným z kľúčových parametrov procesných zariadení.



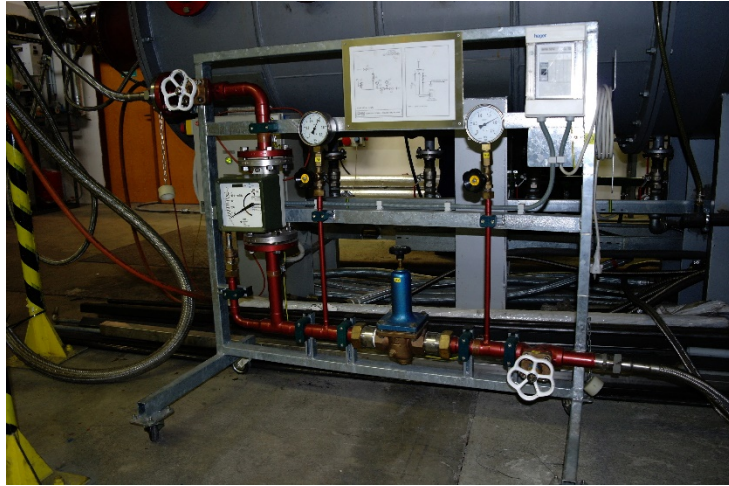
Obr. 5.2 Schéma zariadenia skúšobne horákov.

Na komore sa nachádza osem inšpekčných otvorov na každej strane vo vzdialenosti 0,5 m od seba. Ďalšie inšpekčné otvory sa nachádzajú na prednej a zadnej stene v oboch prípadoch po dva, ktorými možno pozorovať plameň na horáku. Inšpekčné otvory boli na jednej strane komory využité na zavedenie vodou chladených termočlánkov typu R slúžiacich na meranie teploty plameňa.

Počas experimentálnych meraní bolo použité plynné palivo, konkrétne strednetlakový zemný plyn s maximálnym pretlakom približne 100 kPa.

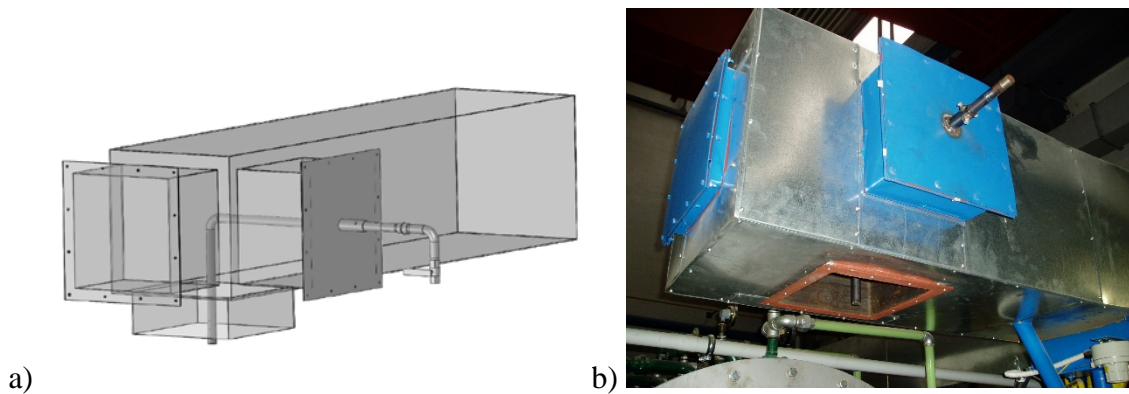
Prívod spaľovacieho vzduchu do zariadenia zabezpečuje vysokotlakový ventilátor s maximálnou kapacitou 2700 m_N^3 , pričom pretlak za ventilátorom dosahuje hodnotu približne 7 kPa. Na ventilátore je umiestnený frekvenčný menič, ktorého pracovný rozsah sa pohybuje v rozmedzí 10 % až 100 %. Hodnoty prietoku vzduchu sú získavané na základe merania diferencie tlakov s korekciou na teplotu.

Pre naše potreby bolo nainštalované zariadenie na dodávanie čistého kyslíka. Zariadenie bolo zapožičané od firmy Linde Gas a.s., ktorá nám tiež dodala kvapalný kyslík. Zariadenie obsahovalo niekoľko kľúčových aparátov. Prvým z nich bol samotný zásobník kvapalného kyslíka, ktorý bol z bezpečnostných dôvodov umiestnený mimo budovy. Ďalším zariadením bol výparník, kde dochádzalo k zmene skupenstva kyslíka. Ten bol následne dopravovaný do zariadenia určeného na reguláciu jeho toku (obr. 5.3). Z tohto zariadenia bol kyslík už priamo privádzaný do difúzoru, ktorý bol umiestnený v prívodnom potrubí vzduchu, čo je znázornené na obr. 5.4.



Obr. 5.3 Zariadenie určené na reguláciu toku kyslíka.

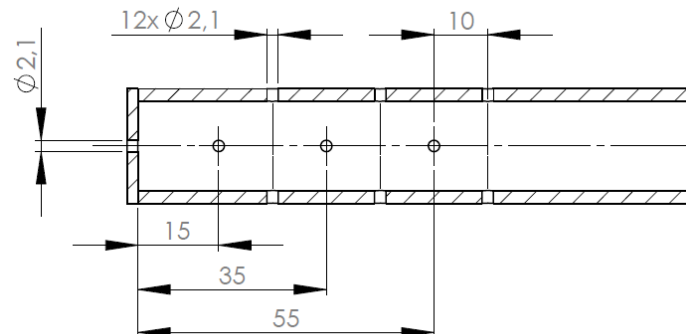
Difúzor je trubka, do ktorej sú vyvrtané otvory tak, aby sa zaistilo adekvátne premiešavanie kyslíka so spaľovacím vzduchom. Difúzor je navrhnutý pre prietok $160 \text{ mN}^3/\text{h}$ pri pretlaku 6 bar. Celkovo obsahuje 13 trysiek, pričom priemer jednej trysky je 2,1 mm. Umiestnené sú v šiestich radoch po dve trysky, ktoré sú oproti sebe. Trysky v jednotlivých radoch sú pootočené o 90° (viď. obr. 5.5). Posledná trinásť tryska je umiestnená na spodnej strane difúzoru.



a)

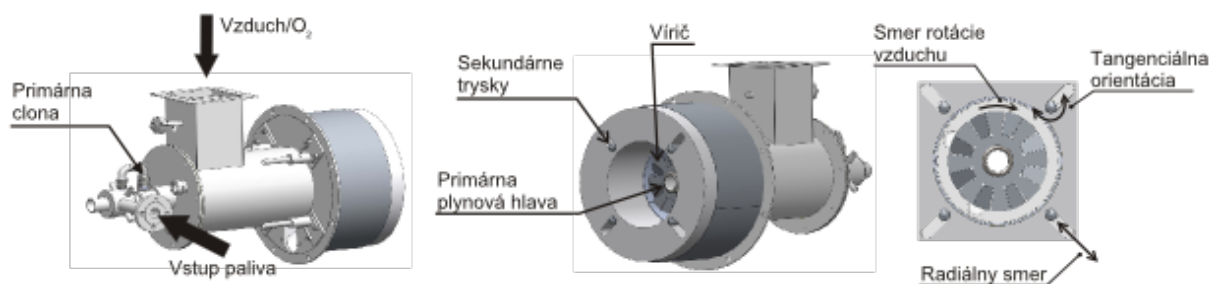
b)

Obr. 5.4 Umiestnenie difúzoru do prívodného potrubia spaľovacieho vzduchu: a) model
b) reálny stav.



Obr. 5.5 Nákres koncovej časti difúzorovej trubky s tryskami.

Počas našich experimentálnych meraní sme využívali dvojstupňový plynový horák znázornený na obr. 5.6. K prívodu plynu dochádza pomocou primárnych trysiek, ktorých je celkovo 12 a sekundárnych trysiek, ktorých je dohromady 8. Primárne trysky sú v hlave umiestnené v dvoch sústredných kružniciach, pričom prvé štyri trysky majú priemer 3 mm a zvyšných osem trysiek umiestnených v druhej rade má priemer 2,6 mm. Pred vstupom do primárnych trysiek sa nachádza obmedzovacia primárna clona s priemerom 5,5 mm, ktorá umožňuje reguláciu výkonu primárneho stupňa obmedzením prívodu plynu. Sekundárny prívod plynu do komory zabezpečujú sekundárne trysky, umiestnené v štyroch hlavách, ktorých vrcholový uhol sklonu je 30°. Hlavy sa nachádzajú v horákových tvárniciach s vnútorným priemerom 300 mm a každá z nich obsahuje dve trysky s priemerom 3,3 mm. Konštrukcia povoľuje zmenu pozície hláv sekundárnych trysiek v radiálnom smere (možnosť posunu až o 50 mm) a tangenciálnom smere voči osi horáku (možnosť natočenia až o $\pm 90^\circ$). Vzdialenosť hláv od osi horáku môže byť upravovaná v závislosti od potreby v rozmedzí od 180 mm až po 230 mm. V našom prípade bola vzdialenosť hláv od osi nastavená na maximálnu hodnotu 230 mm a trysky boli natočené o uhol $+ 20^\circ$ (kladný uhol je v smere vírenia plameňa). Na zapálenie plameňa slúži predzmesový stabilizačný horák s výkonom 18 kW. Ďalšou časťou horáku je pútač plameňa v podobe víriča s priemerom 240 mm, ktorý pozostáva z ôsmich lopatiek so sklonom 35°. Vírič vyvoláva v spaľovacom vzduchu tangenciálnu zložku rýchlosti, čím podporuje turbulentné prúdenie vzduchu a zabezpečuje tak intenzívne premiešavanie primárneho plynu so spaľovacím vzduchom. Okrem toho taktiež zabráňuje odtrhnutiu alebo zhasnutiu plameňa.



Obr. 5.6 Model dvojstupňového plynového horáku.

Pri spaľovaní má dôležitý informačný charakter zloženie spalín na výstupe, čo nám vie prezradiť množstvo informácií, a preto je daná skúšobňa vybavená elektrochemickým analyzátorom spalín TESTO 350XL, ktorý je umiestnený v spalínovode. Analyzátor je vybavený senzormi O_2 (0 až 25 % obj.), CO (0 až 1000 ppm), NO (0 až 3000 ppm), NO_2 (0 až 500 ppm), SO_x (0 až 5000 ppm), C_xH_y (0 až 40000 ppm) a taktiež termočlánkom typu K.

Vzhľadom na to, že všetky testy vyžadujú zaznamenávanie určitých výsledkov, je zariadenie vybavené systémom určeným na zbieranie dát, ako aj bezpečnostným systémom, ktorý slúži na zabezpečenie bezpečného chodu zariadenia. Zbieranie dát je trojstupňové:

- Stupeň 1 – automatický zber s frekvenciou 1 s
- Stupeň 2 – automatický zber s frekvenciou 2 min
- Stupeň 3 – záznam na povel operátora

Dáta zo všetkých meraných veličín si systém zaznamenáva. Medzi zaznamenávané veličiny patria merania hodnoty prietokov chladiacej vody, paliva a spaľovacieho vzduchu. Zaznamenávajú sa aj tlaky a zloženia v prívodných potrubíach a teploty spalín.

Bezpečnostný systém má za úlohu pomocou informácií od čidiel zabezpečiť bezpečný a spoľahlivý chod zariadenia. Jeho úlohou je napríklad zabránenie prehriatia chladiacej vody.

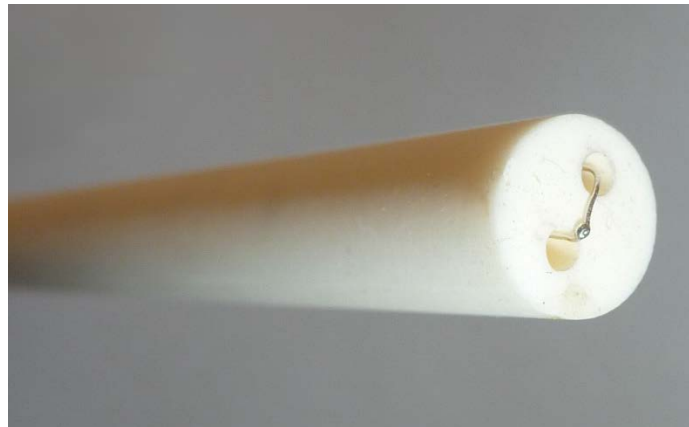
Súčasťou bezpečnostného systému je taktiež sústava, ktorá je aj určená na zapalovanie a ionizačné sledovanie plameňa na horáku.

5.2 Meranie teploty v plameni

5.2.1 Prídavné zariadenie

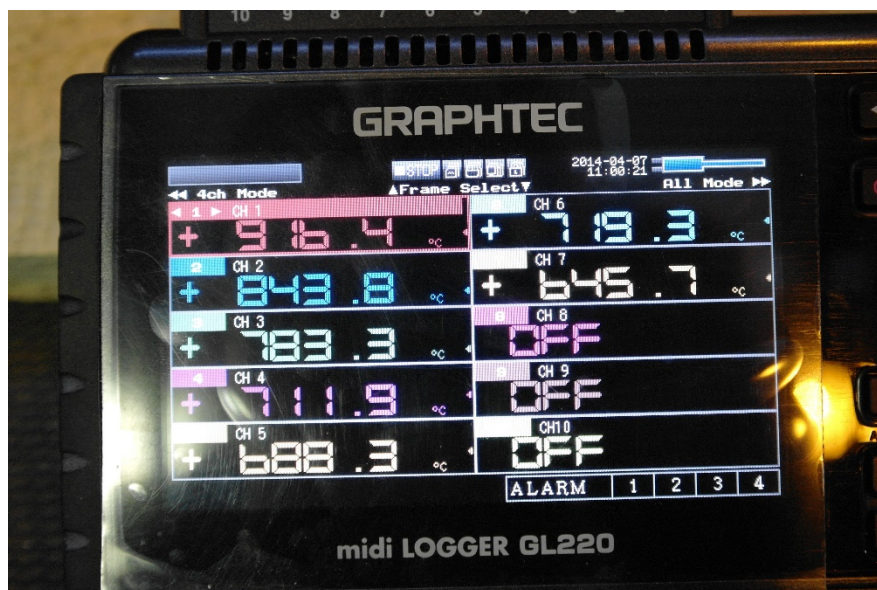
Na meranie teploty plameňa bol použitý snímač typu termočlánok. Tento typ snímača pozostáva z dvoch rôznych kovov spojených do jedného bodu. Akonáhle začne na tento spoj pôsobiť teplota, v danom termočlánku sa začne indukovať napätie závislé na teplote. Termočlánkové zliatiny sú najčastejšie dodávané ako veľmi tenké drôty, pričom je možné, vzhľadom na potreby, si vybrať z rôznych kombinácií kovov alebo kalibrácií (najpoužívanejšie J, K, T, E a pre vysoké teploty R, S, C, GB). Každý typ kalibrácie má odlišné pracovné podmienky a teplotný rozsah. Teplotný rozsah je však taktiež obmedzený hrúbkou použitého drôtu.

Pre naše potreby bol zvolený termočlánok typu R s priemerom 0,2 mm (alebo 0,008 "). Daný termočlánkový drôt sa skladá z dvoch zvarovaných drôtov (obr. 5.7). Prvý drôt je z čistej platiny, druhý je zmesou platiny/ródiu (s obsahom ródiu 13 %). Obalovú vrstvu tvorí oxid hlinitý. Vzhľadom na zloženie a priemer drôtu je možné použitie do teploty 1398 °C, krátkodobo však až do teploty 1482 °C. Táto neizolovaná drôtená sonda je charakteristická vysokou presnosťou pre bodové merania, nízkym prenosom tepla a rýchlou dobou odozvy. Jej použitie je možné ako v oxidačnej, tak aj inertnej atmosfére. Využíva sa pre meranie vysokých teplôt vzduchu (resp. plynu) a na povrchové merania.



Obr. 5.7 Termočlánkový drôt v ochrannej keramickej trubici [21].

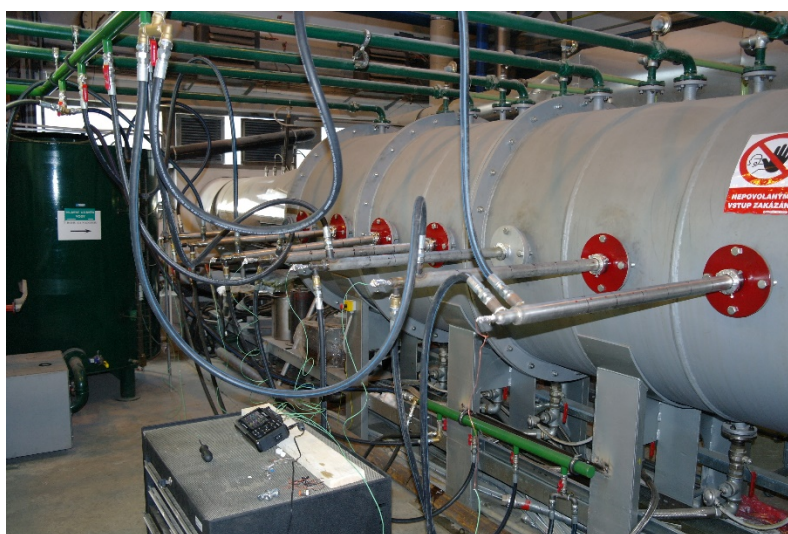
Pre zber a spracovanie hodnôt z termočlánku bol použitý datalogger midi LOGGER GL2220 od spoločnosti Graphtec (obr. 5.8). Použitý datalogger možno používať samostatne alebo pomocou pripojenia na počítač. Energetická samostatnosť je zabezpečená batériami alebo AC adaptérom. Pre prácu samostatne má vstavaný 4,3" LCD display (WQVGA TFT), na ktorom sú zobrazované merané hodnoty, ale taktiež je možnosť prepnutia zobrazenia na grafy meraných veličín, kde je zobrazovaná aj časť histórie. Zariadenie okrem okamžitých hodnôt, ktoré sú zobrazované na základe vzorkovacej frekvencie (16 módov v rozsahu od 10 ms po 1 hod), zaznamenáva aj históriu, priemernú hodnotu, maximá, minimá a ďalšie aritmetické operácie. Zariadenie má 10 analógových kanálov, kde je možné pripojiť sondy.



Obr. 5.8 Datalogger midi LOGGER GL2220.

5.2.2 Priebek merania

Meranie teploty plameňa prebiehalo v niekoľkých krokoch. V prvom rade sa muselo skompletizovať zariadenie. Po celkovom zostavení a po pripojení všetkých potrebných súčastí pre zabezpečenie bezpečnej a plynulej dodávky čistého kyslíka došlo k zapáleniu horáku. Počas zahrievania pece sa pristúpilo k odňatiu krytov inšpekčných otvorov. Na ich miesta boli nainštalované sondy na meranie bodovej teploty plameňa. Pre meranie bolo využitých sedem inšpekčných otvorov (vid' obr. 5.9). Prvý inšpekčný otvor nemohol byť použitý, pretože do jeho pohľadu zasahoval horákový kameň, čo by bránilo zasunutiu sondy. Po zhruba 20 minútach došlo k zohriatiu pece a ustáleniu hodnôt meraných veličín. Nastavili sa presné parametre prietoku plynu, kyslíka a spaľovacieho vzduchu a sondy sa dali do prvej pozície, ktorá bola 5 cm od okraja vnútorného plášťa komory. V priebehu merania sa sondy v dvojminútových intervaloch zasúvali smerom k osi spaľovacej komory (merané pozície boli 5, 10, 20, 30, 40 a 50 cm). Posledná hodnota zasunutia predstavovala pozíciu sondy presne v osi spaľovacej komory.



Obr. 5.9 Experimentálne meranie teploty plameňa.

5.2.3 Vyhodnotenie rozloženia teplôt v plameni

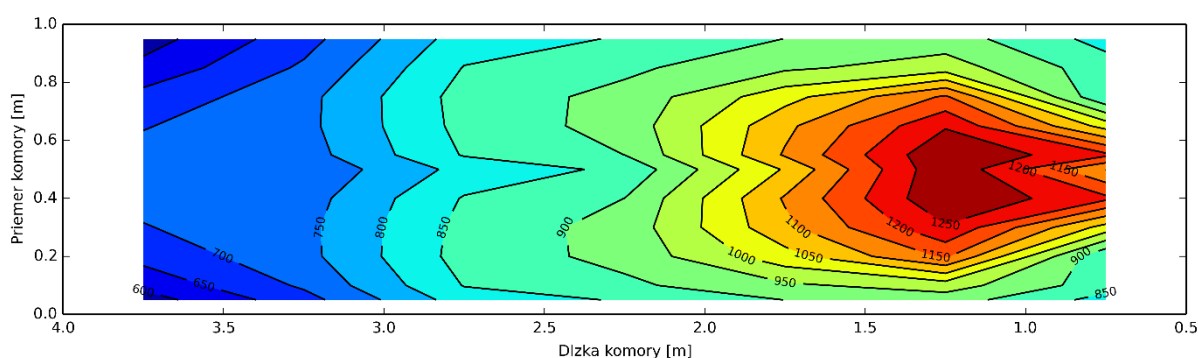
Počas skúšok komory bolo vykonaných niekoľko meraní, no na základe zamerania tejto práce sa budeme venovať najmä trom z nich.

a) Prietok kyslíka 0 mN³/h

Prvé meranie bolo referenčné a nedochádzalo pri ňom k obohacovaniu kyslíkom. Jednalo sa teda o spaľovanie metánu s atmosférickým vzduchom. Tak, ako aj v nasledujúcich prípadoch, sa merané hodnoty zaznamenávali do tabuľky (tab. 5.1), z ktorej bol následne vypracovávaný graf (obr. 5.10) použitím programovacieho jazyku Python [22].

	Term. č.1	Term. č.2	Term. č.3	Term. č.4	Term. č.5	Term. č.6	Term. č.7
Pozícia	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
5 cm	832	924	901	854	825	680	577
10 cm	873	974	941	889	852	708	615
20 cm	853	1157	1031	916	870	734	667
30 cm	1030	1245	1088	920	866	736	697
40 cm	1211	1295	1105	900	854	728	714
50 cm	1100	1293	1056	861	817	711	718

Tab. 5.1 Tabuľka nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka 0 mN³/h.



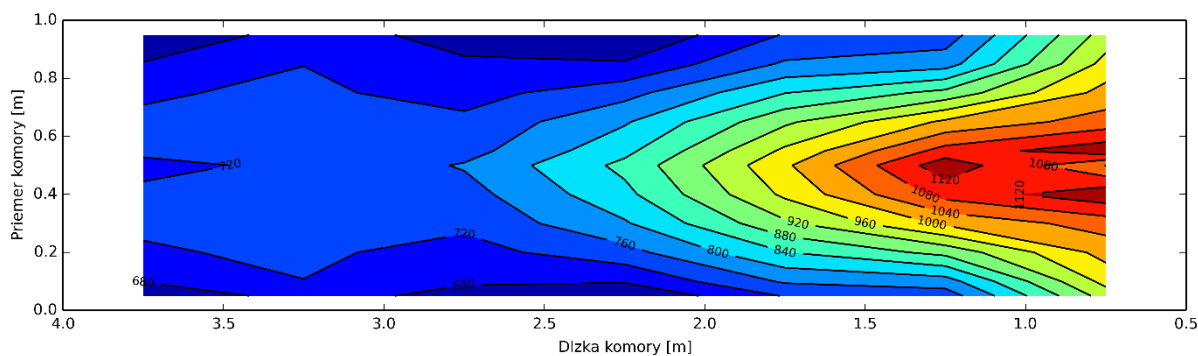
Obr. 5.10 Graf nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka 0 mN³/h.

b) Prietok kyslíka 20 mN³/h

Druhé meranie bolo zamerané na obohacovanie vzduchu kyslíkom pri prietoku kyslíka 20 mN³/h, čo predstavuje koncentráciu kyslíka v spaľovacom vzduchu 23,1 %. Namerané hodnoty boli zaznamenávané do tabuľky (tab. 5.2), z ktorej bol následne vytvorený graf (obr. 5.11).

	Term. č.1	Term. č.2	Term. č.3	Term. č.4	Term. č.5	Term. č.6	Term. č.7
Pozícia	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
5 cm	938	738	723	644	666	699	643
10 cm	973	782	765	684	685	719	682
20 cm	1015	892	839	746	705	727	716
30 cm	1058	1008	912	795	729	731	726
40 cm	1147	1096	968	829	745	725	726
50 cm	1039	1145	993	850	764	727	712

Tab. 5.2 Tabuľka nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka 20 mN³/h.



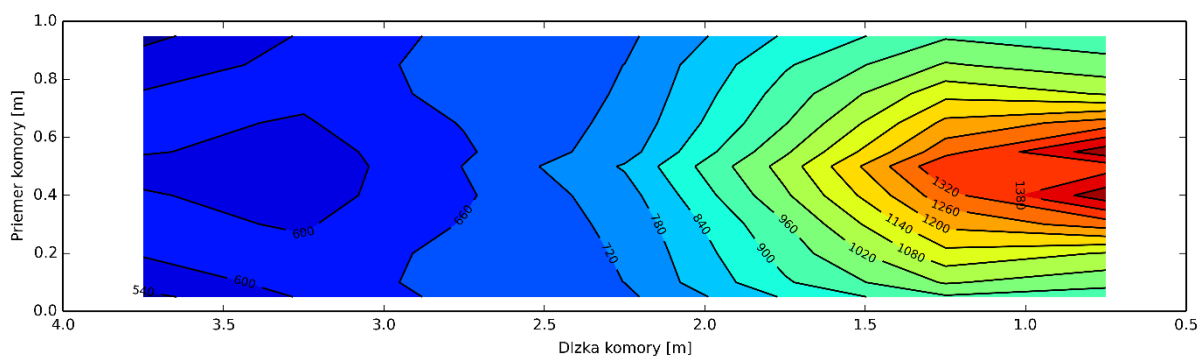
Obr. 5.11 Graf nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$.

c) Prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$

Pri treťom meraní došlo k navýšeniu prietoku kyslíka na hodnotu $80 \text{ mN}^3/\text{h}$, čo predstavuje koncentráciu kyslíka v spaľovacom vzduchu 33,0 %. Namerané hodnoty boli opäť zaznamenávané do tabuľky (tab. 5.3), z ktorej bol následne vytvorený graf (obr. 5.12).

	Term. č.1	Term. č.2	Term. č.3	Term. č.4	Term. č.5	Term. č.6	Term. č.7
Pozícia	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
5 cm	928	952	846	707	679	606	523
10 cm	979	1026	892	720	689	617	571
20 cm	1076	1123	925	724	682	613	604
30 cm	1287	1215	956	735	664	594	615
40 cm	1475	1299	1010	753	652	573	606
50 cm	1349	1375	1045	786	662	558	576

Tab. 5.3 Tabuľka nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.



Obr. 5.12 Graf nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.

Z nameraných hodnôt vyplýva, že zvyšovaním miery obohacovania spaľovacieho vzduchu kyslíkom sa menia charakteristiky plameňa. Pri obohatení dochádza k miernemu skráteniu plameňa a k zvýšeniu jeho intenzity pri ústi horáku (zvýšeniu jeho teploty). Ako je zrejmé z grafov (obr. 5.10, obr. 5.11, obr. 5.12), pri spaľovaní bez obohacovania kyslíkom (meranie *a*) je rozloženie teplôt v komore rovnomernejšie a rozdiely teplôt v jednotlivých miestach komory nie sú až také veľké, ako pri obohacovaní kyslíkom (metódy *b*) a *c*).

5.3 Meranie tepelných tokov

Meranie tepelných tokov prebiehalo súčasne s meraním teploty plameňa. Dáta boli automaticky zaznamenávané každé dve minúty interným systémom zariadenia, no v prípade potreby bola možnosť záznamu dát aj v nami určenom okamžiku. Zaznamenané hodnoty pre meranie tepelných tokov sú uvedené v tab. A 2, A 3, A 4 v prílohe A. Z týchto dát boli následne dopočítané hodnoty hustoty tepelných tokov. Nasledujúce vzťahy platia pre $i = 1, \dots, 7$, kde i je číslo chladenej sekcie spaľovacej komory.

Výpočet vychádzal z bilančnej rovnice pre tepelný tok \dot{Q}_i [W]

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{voda,i} \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i \quad (5.1)$$

Po úpravách má bilančná rovnica pre výpočet hustoty tepelného toku do steny i -tej sekcie \dot{q}_i [kW/m²] tvar

$$\dot{q}_i = \frac{1}{1000} \cdot \dot{m}_{voda,i} \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i / A_i \quad (5.2)$$

$$\dot{q}_i = \frac{1}{1000} \cdot \frac{V_{voda,i}}{3600} \cdot \rho_i \cdot c_{p,i} \cdot (t_{OUT,i} - t_{IN}) / \pi \cdot L_i \quad (5.3)$$

kde:	\dot{q}_i je	hustota tepelného toku do steny i -tej sekcie	[kW/m ²]
	$\dot{m}_{voda,i}$	hmotnostný prietok chladiacej vody i -tou sekciou	[kg/s]
	$V_{voda,i}$	objem vzorky čistého odmasťovača	[m ³ /h]
	$c_{p,i}$	hmotnosť odparku z čistého odmasťovača	[J/kg·K]
	ρ_i	objem vzorky použitého odmasťovača	[kg/m ³]
	Δt_i	teplotný rozdiel medzi výstupnou a vstupnou teplotou chladiacej vody v i -tej sekci	[°C],
	$t_{OUT,i}$	výstupná teplota chladiacej vody z i -tej sekcie	[°C],
	t_{IN}	vstupná teplota chladiacej vody	[°C],
	A_i	plocha i -tej sekcie	[m ²],
	L_i	dĺžka i -tej sekcie	[m].

Vzhľadom na to, že pri výpočte hustoty tepelných tokov sa vychádzalo z predpokladu konštantnej hodnoty mernej tepelnej kapacity a hustoty chladiacej vody, v celom objeme sekcie boli pre ich výpočet použité aproximačné vzťahy [23], kde $\hat{t}_i = t_{IN} + t_{OUT,i}$

$$\rho_i = 1006 - 0,26 \cdot \frac{\hat{t}_i}{2} - 0,0022 \cdot \left(\frac{\hat{t}_i}{2}\right)^2 \quad (5.4)$$

$$c_{p,i} = 4210 - 1,363 \cdot \frac{\hat{t}_i}{2} + 0,014 \cdot \left(\frac{\hat{t}_i}{2}\right)^2 \quad (5.5)$$

5.3.1 Chybová analýza experimentálnych dát

Každé experimentálne meranie je vykonávané s vedomím, že získané dáta obsahujú určité chyby (systematické ale aj náhodné), ktoré sú prevažne spôsobené nedokonalosťou meracích

zariadení. Určovanie týchto chýb vychádza zo základného predpokladu, že všetky chyby sú v medziach intervalu, ktorý je pre každé zariadenie definovaný výrobcom. Absolútna chyba býva vyjadrovaná pomocou smerodajnej odchýlky σ , ktorá je definovaná ako kladná druhá odmocnina z rozptylu (disperzie).

Ako bolo spomínané, každé zariadenie má svoju presnosť, ktorá závisí jednak od typu meracieho zariadenia, od výrobcu, ale taktiež aj od cenovej hladiny zariadenia. Vstupné aj výstupné teploty chladiacej vody boli merané odporovými teplomermi s hlavicou a s prevodníkom 4-20 mA, typ PTP50J s meracím rozsahom 0...+100°C. Výrobca udáva presnosť teplotného čidla $\pm 0,5\%$ z rozsahu (max. $\pm 0,25^\circ\text{C}$). Prietoky chladiacej vody sekciami boli merané pomocou vodomeroch typu XN-RK 04 L300 G2 Q10-BH E K10, ktoré boli vybavené impulzným výstupom 10 litrov/pulz. Vodomery sú primárne určené pre prácu v horizontálnej podobe. Za týchto podmienok je ich najväčšia dovolená chyba $\pm 2\%$ z nameranej hodnoty [24].

Zo štatistiky je známy pojem „zákon šírenia chyby“ (v anglickej terminológii „*propagation of error*“), ktorý je taktiež známy ako „zákon šírenia neistoty“ (v anglickej terminológii „*propagation of uncertainty*“). Tento pojem bol na základe známych chýb teplôt a prietokov aplikovaný na náš experiment za účelom zistenia absolútnej chyby tepelných tokov. Šírenie chyby je vo svojej podstate vplyv chýb meraných veličín na celkovú neistotu funkcie týchto veličín.

Pre rozptyl σ_p^2 produktu P pre nezávislé premenné A a B s rozptylmi σ_a^2 a σ_b^2 platí vzťah [21]

$$\left(\frac{\sigma_p}{P}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 \quad (5.6)$$

V prípade predpokladu konštantných hodnôt hustoty a tepelnej kapacity chladiacej vody pre jednotlivé sekcie, premenná A v rovnici (5.6) zastupuje objemový prietok chladiacej vody V_i a premenná B zastupuje rozdiel teplôt chladiacej vody na vstupe a výstupe Δt_i . V tomto prípade môže byť vzťah smerodajnej odchýlky tepelného toku do steny i -tej sekcie vyjadrený ako [24]

$$\left(\frac{\sigma_{\dot{q}_i}}{\dot{q}_i}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{OUT,i}}^2 + \sigma_{t_{IN}}^2}{\Delta t_i^2} \quad (5.7)$$

Počas meraní tepelných tokov za účelom zníženia neistoty merania došlo k zníženiu prietoku chladiacej vody jednotlivými sekciami. Z dôvodu nižších prietokov chladiacej vody došlo k zvýšeniu výstupnej teploty, čo navýšilo teplotný rozdiel vody na vstupe a na výstupe. Na základe výpočtu zákona šírenia neistoty je neistota merania tepelných tokov nepriamo úmerná teplotnému rozdielu. Rovnica (5.7) môže byť pre $i = 1, \dots, 7$ upravená na tvar [10]

$$\sigma_{\dot{q}_i} = \dot{q}_i \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{OUT,i}}^2 + \sigma_{t_{IN}}^2}{\Delta t_i^2}\right]} \quad (5.8)$$

5.3.2 Vyhodnotenie tepelných tokov

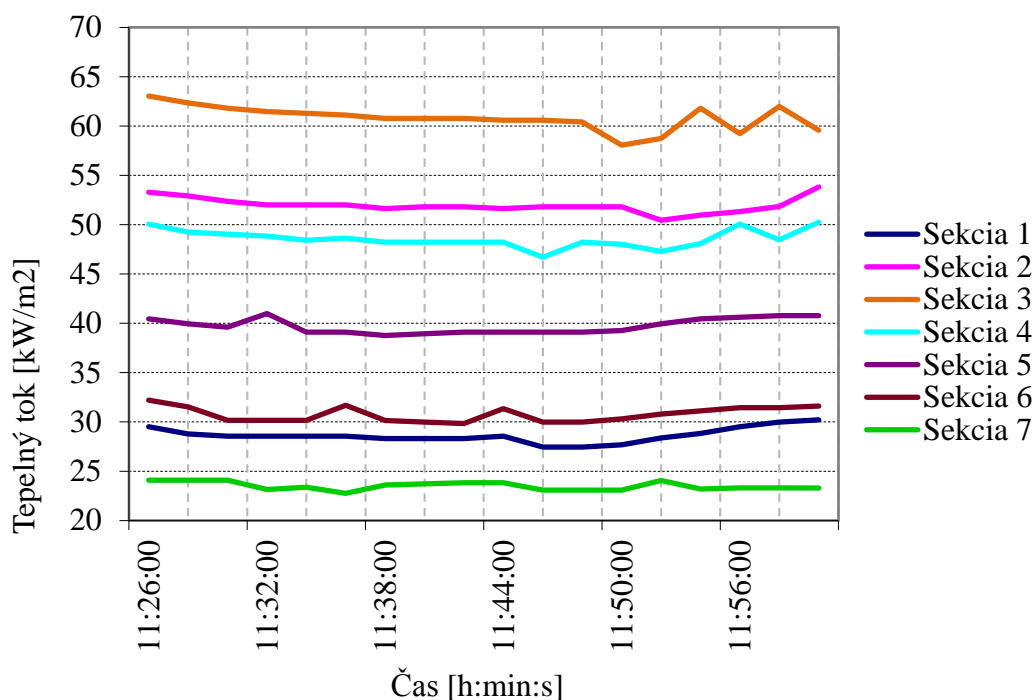
Vypočítané hodnoty tepelných tokov jednotlivými sekciami boli následne vynesené do grafov. Tak ako v predchádzajúcej kapitole, aj v tejto sa budeme venovať spomínaným trom typom obohacovania.

a) Prietok kyslíka $0 \text{ m}_N^3/\text{h}$

Prvé meranie prebiehalo bez obohacovania spaľovacieho vzduchu a hodnoty z neho získané sa použili ako referenčné hodnoty. Namerané hodnoty, ktoré boli automaticky zaznamenávané a následne spracované do tab. A 2 v prílohe A, sa použili na výpočet tepelného toku jednotlivými sekciami pomocou vzťahu (5.3). Keďže, ako bolo spomínané v predchádzajúcej kapitole, pri meraní dochádza k určitej chybe merania, pomocou vzťahu (5.8) boli dopočítané relatívne chyby merania. Tie boli následne spolu s hodnotami tepelných tokov vynesené do tabuľky (tab. 5.4), z ktorej bol vytvorený graf (obr. 5.13) znázorňujúci časovú zmenu tepelných tokov jednotlivými sekciami.

Sekcia	Tepelný tok	Relatívna chyba [%]
1	28,64	3,53
2	51,96	1,57
3	60,80	1,32
4	48,57	1,85
5	39,73	1,88
6	30,77	2,31
7	23,50	2,11

Tab. 5.4 Tabuľka tepelných tokov v jednotlivých sekciami pre prietok kyslíka $0 \text{ m}_N^3/\text{h}$ a relatívne chyby merania.



Obr. 5.13 Graf závislosti tepelných tokov na čase pre prietok kyslíka $0 \text{ m}_N^3/\text{h}$ v priebehu záznamu dát..

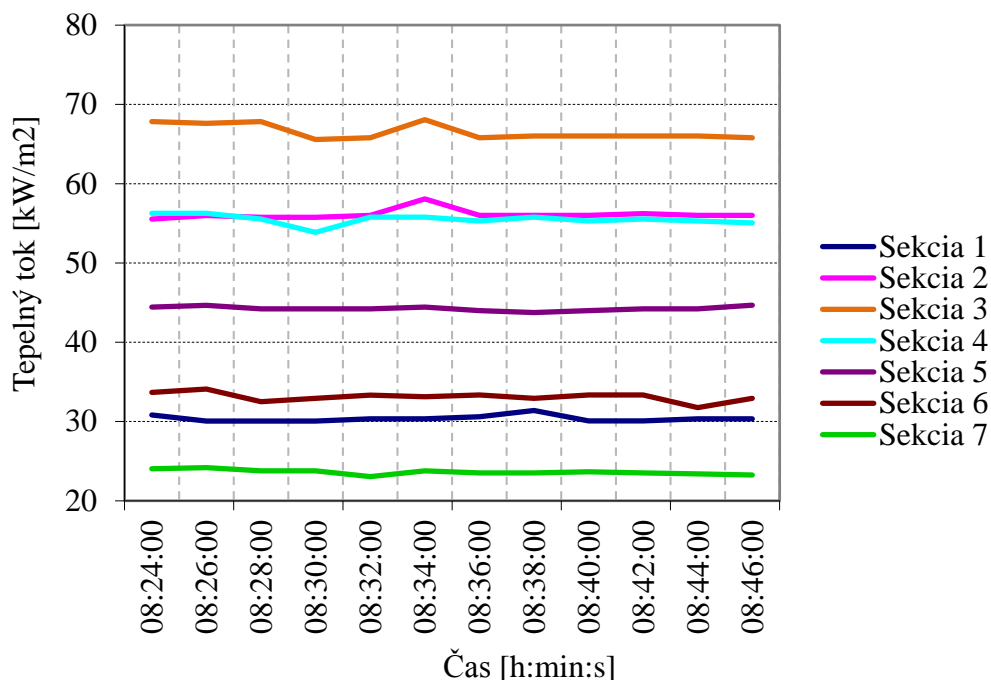
Z grafu na obr. 5.13 je evidentné, že tepelný tok jednotlivými sekciami ustáleného procesu spaľovania sa až na malé odchýlky príliš nemení a jeho hodnota je takmer konštantná s miernymi rozkmitmi. Najvyššie hodnoty tepelných tokov sú v sekciiach 2, 3 a 4 čo je spôsobené prítomnosťou plameňa (zvýšenej teploty) v tejto oblasti.

b) Prietok kyslíka 20 mN³/h

Pri druhom meraní dochádzalo k obohacovaniu spaľovacieho vzduchu kyslíkom pri prietoku kyslíka 20 mN³/h, čo predstavuje koncentráciu kyslíka v spaľovacom vzduchu 23,1 %. Namerané hodnoty boli opäť spracované a následne zaznamenané do tabuľky (tab. 5.5), z ktorej bol následne vytvorený graf (obr. 5.14).

Sekcia	Tepelný tok	Relatívna chyba [%]
1	30,37	3,8
2	56,11	1,75
3	66,53	1,47
4	55,48	1,92
5	44,25	2,25
6	33,11	2,71
7	23,62	2,41

Tab. 5.5 Tabuľka tepelných tokov v jednotlivých sekciiach pre prietok kyslíka 20 mN³/h a relatívne chyby merania.



Obr. 5.14 Graf závislosti tepelných tokov na čase pre prietok kyslíka 20 mN³/h v priebehu záznamu dát.

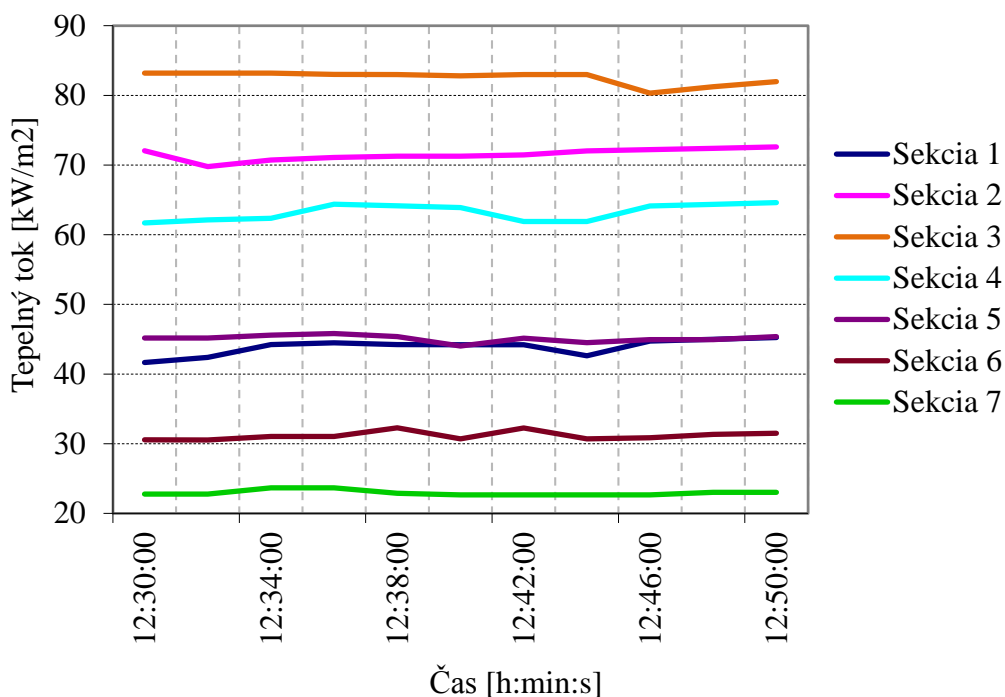
Najvyššie hodnoty tepelných tokov sú z rovnakých dôvodov v sekciách 2, 3 a 4. Avšak pri porovnaní s predchádzajúcim meraním, na grafe na obr. 5.14 možno vidieť mierne zmenšenie rozkmitov.

c) Prietok kyslíka 80 mN³/h

Tretie meranie sa vyznačovalo prietokom kyslíka 80 mN³/h, čo predstavuje koncentráciu kyslíka v spaľovacom vzduchu 33 %. Namerané hodnoty boli opäť spracované a zaznamenané do tabuľky (tab. 5.6), z ktorej bol následne vytvorený graf (obr. 5.15).

Sekcia	Tepelný tok	Relatívna chyba [%]
1	43,91	2,55
2	71,54	1,25
3	82,54	1,09
4	63,23	1,64
5	45,10	2,07
6	31,17	2,30
7	22,94	2,35

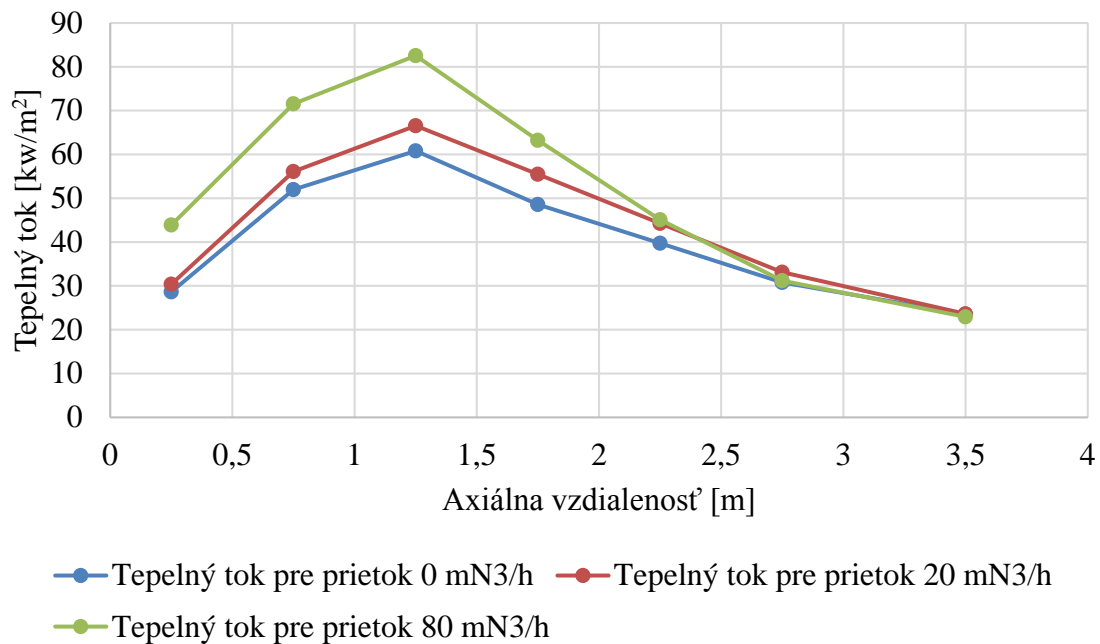
Tab. 5.6 Tabuľka tepelných tokov v jednotlivých sekciách pre prietok kyslíka 80 mN³/h a relatívne chyby merania.



Obr. 5.15 Graf závislosti tepelných tokov na čase pre prietok kyslíka 80 mN³/h v priebehu záznamu dát..

Tak isto ako v predchádzajúcich meraniach, aj v tomto sú najvyššie hodnoty tepelných tokov v sekciách 2, 3 a 4. Pri porovnaní s predchádzajúcimi meraniami, na grafe (obr. 5.15) možno vidieť zmenšenie rozkmitov hodnôt tepelných tokov a takmer ich konštantný priebeh.

Pre porovnanie vplyvu množstva pridaného kyslíka na tepelný tok jednotlivými stenami bol vypracovaný graf (obr. 5.16), na základe ktorého je zrejmé, že zvýšením prietoku čistého kyslíka sa zvýši aj tepelný tok steny v jednotlivých sekciách. Zvýšenie tepelného toku má za následok zníženie teploty spalín, čo je zrejmé z obrázkov v kapitole 5.2.3.



Obr. 5.16 Graf znázorňujúci profil experimentálne nameraných tepelných tokov naprieč jednotlivými sekciami pre prietoky kyslíka 0, 20, 80 mN³/h.

Navyšovanie obsahu kyslíka v spaľovacom vzduchu má vplyv aj na účinnosť procesu spaľovania. Počas prvého merania spaľovania bez navýšenia koncentrácie kyslíka bola účinnosť iba 62,2 %, ako náhle však došlo k obohateniu vzduchu kyslíkom s prietokom 20 mN³/h, účinnosť narástla na hodnotu 67,5 % a pri obohatení kyslíkom s prietokom 80 mN³/h bola hodnota účinnosti až 77,6 %.

6 Matematické modelovanie pomocou metód CFD

Cieľom druhej časti práce bola matematická simulácia procesu spaľovania za rovnakých podmienok, ktoré boli použité počas experimentálnych meraní (viď kapitola 5). Nevyhnutná bola tvorba matematického modelu a následné dopočítanie hodnôt teplôt v plameni, tepelných tokov, tiež teploty spalín a chemického zloženia.

6.1 Charakteristika matematického modelovania

V dnešnej dobe sa pri výpočtoch stávajú čoraz rozšírenejšie počítačové simulačné programy, medzi ktoré patria napr. STAR-CD, ANSYS, FLUENT. Poznáme dve základné metódy modelovania. Prvou je metóda konečných prvkov (FEA alebo MKP) a metóda konečných objemov (FVM alebo CFD) [26]. Princípom uvedených metód je diskretizácia riešených parciálnych diferenciálnych rovníc. Pre simulácie prúdenia tekutín sa využíva druhá z nich, a teda metóda CFD (Computational Fluid Dynamics). Modelovanie touto metódou zohráva dôležitú úlohu pri riešení problémov a optimalizačných výpočtoch. CFD modelovanie má široké využitie a to najmä v týchto oblastiach:

- automobilovom priemysle,
- biomedicíne a farmaceutickom priemysle,
- hutníckom, chemickom, petrochemickom a sklárskom priemysle,
- oblasti čerpadiel a turbín,
- simulovanie prúdenia v hydraulických a pneumatických prvkoch a mechanizmoch,
- oblasti bezpečnosti a životného prostredia,
- ...

Hlavné výhody CFD modelovania:

- Detailné informácie (výpočty poskytujú množstvo detailných informácií, čo sa týkajú chovania danej tekutiny).
- Rýchlosť a znížené náklady (v porovnaní s experimentom je menej ekonomicky náročné).
- Jediné možné riešenie (v niektorých prípadoch nie je možné vytvoriť experimentálny model).
- Urýchlenie vývoja nových alebo optimalizovaných technológií.
- Skúmanie a odstraňovanie príčin nežiaduceho chovania procesov.
- Atraktívna a zaujímavá marketingová prezentácia technológií a výrobkov, čo poukazuje na vysokú odbornú úroveň firmy [25].

Nevýhodou sú však vysoké požiadavky na výpočtovú techniku, čo väčšinou vedie k nutnosti zjednodušovania. Nutnosť a rozsah zjednodušenia však musí zhodnotiť výpočtár na základe znalostí a skúseností. Od miery zjednodušenia teda závisí presnosť výsledkov.

Všetky výpočty CFD vychádzajú z troch základných zákonov zachovania, ktoré majú všeobecnú platnosť. Sú nimi zákon zachovania hmoty, hybnosti a energie. Rovnice popisujúce prúdenie sú formálne rovnaké, pretože sa vždy jedná o konvekčne difúznou rovnicu.

Ak na takúto rovnicu aplikujeme tri zložky hybnosti (ako vektorovú veličinu), dostaneme po malých úpravách Navier- Stokesove rovnice, ktoré popisujú zákon zachovania hybnosti. Dané rovnice boli definované za predpokladu nestlačiteľnosti tekutiny, čiže $\rho = \text{konšt.}$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\
\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\
\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z
\end{aligned} \quad (6.1)$$

pričom u, v a w sú zložky rýchlosti, t je čas, p je tlak, ρ je hustota, ν je kinematická viskozita a $f_{x,y,z}$ označuje zložky vonkajšej objemovej sily. Difúzny koeficient, základná fyzikálna vlastnosť tekutiny, ktorá ovplyvňuje hybnosť, je v týchto rovniciach kinematická viskozita. Prvý člen charakterizuje zrýchlenie tekutiny a ďalšie tri členy nelineárne (konvektívne) zrýchlenie, ktoré pri vyšších Reynoldsových číslach spôsobuje nestabilitu rovnice a jej náhodnosť. Na pravej strane prvý člen predstavuje gradient tlaku. Posledný člen predstavuje šmykové napätia tekutiny spôsobené jej viskozitou. Tieto šmykové napätia majú za následok deformáciu kvapaliny [27].

Zjednodušený zápis:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (6.2)$$

Zákon zachovania hmoty je vyjadrovaný pomocou rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n \frac{\partial u}{\partial x_j} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (6.3)$$

kde u, v a w sú zložky rýchlosti. V danej rovnici neexistuje difúzny koeficient, keďže táto rovnica predstavuje iba konvektívnu zmenu toku hmoty. Ak v tekutine vyberieme ľubovoľný objem, množstvo tekutiny, ktoré do objemu jeho povrchom pritečie, sa musí rovnať množstvu, ktoré v tom istom okamžiku vytečie, a preto musí byť táto zmena toku hmoty rovná nule [27].

Ak však na konvenčne difúznu rovnicu aplikujeme teplotu T za predpokladu konštantnej hustoty ρ , vyjadríme si zákon zachovania energie pomocou rovnice vedenia tepla:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\
&+ 2\alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) \\
&+ \alpha \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right)
\end{aligned} \quad (6.4)$$

pričom T je termodynamická teplota, t je čas, u, v, w sú zložky rýchlosti, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ je teplotná vodivosť, ρ je hustota, c_p je merná tepelná kapacita za konštantného tlaku. Difúzny koeficient, základná fyzikálna vlastnosť tekutiny, ktorá ovplyvňuje taktiež vedenie tepla, je v danom

prípade teplotná vodivosť. Prvý člen rovnice predstavuje akumuláciu tepla v kvapaline. Ďalšie tri členy vyjadrujú prestup tepla v dôsledku prúdenia kvapaliny, teda konvekciu. Na pravej strane prvý člen predstavuje vedenie tepla v tekutine, čiže kondukciu. Zvyšné členy predstavujú teplo vzniknuté pohybom tekutiny a deformáciou [27].

6.2 Súčasný stav poznania v oblasti CFD modelovania OEC

V dnešnej dobe sa CFD modelovanie stáva neoddeliteľnou súčasťou riešenia rozličných projektov, pričom špecializácia na spaľovanie patrí medzi najzložitejšie a najťažšie typy úloh. Môže za to niekoľko skutočností, ako sú napríklad: zložitá geometria horáku (geometria trysiek, pútač plameňa), prenos tepla zahrňujúci radiáciu, dynamika tekutín, rozmery zariadenia (vplyv na veľkosť a zložitosť siete) a v neposlednom rade chemické reakcie, ktorých môžu byť desiatky až stovky [24]. Vzhľadom na náročnosť úlohy tohto typu je nutné použiť zjednodušené matematické modely, ktoré nám čo najvernejšie popisujú daný jav.

CFD analýze kyslíkovo-metánového plameňa sa venoval Breussin a spol. [28]. Spozoroval možnosť predvídania dynamiky tekutín, teploty a koncentračných polí chemických prvkov za použitia jednak modelu Eddy Dissipation Model (prístup „mixed is burned“), a taktiež modelu Eddy Dissipation Concept (prístup chemickej rovnováhy). Rozdiely však nastali pri predikcii CO, kde prvý model zlyhal. Druhý model sa ukázal presnejší taktiež v oblasti predikcie teplôt a koncentrácie zložiek z toho dôvodu, že bral do úvahy molekulárny rozklad. Náhradou za tieto dva modely môže byť aplikácia obmedzenia na chémiu tak, že sa použije schéma obsahujúca jednu alebo viacero všeobecných reakcií. Brick a spol. [29] ponúkli niekoľko metánovo-kyslíkových mechanizmov. Tento prístup testovali za podmienok dokonalého premiešania v reaktore. Porovnávaný bol model chemickej rovnováhy s 3 - krokovým ireverzibilným mechanizmom navrhnutým pánmi Jonesom a Lindstedtom, a tiež s detailným mechanizmom navrhnutým Glarborgom a spol. Došli k záverom, že model chemickej rovnováhy, za podmienok prepojenia turbulentného premiešania a chemických reakcií, popisuje situáciu nedostatočne. Za podmienok zmesi chudobnej na palivo sa globálny mechanizmus podobá detailnému modelu, avšak za podmienok zmesi bohatej na palivo bola presnosť 3-krokového mechanizmu nedostatočná. Ako výkonnejší s rýchlejším dosiahnutím stálosti rovnovážneho zloženia sa ukázal byť 4-krokový mechanizmus, ktorý je vhodným kompromisom medzi presnosťou a výpočtovými nárokmi.

Modely globálneho mechanizmu sú v priemyselnom CFD modelovaní často využívané pre ich jednoduchosť, dostupnosť a nízku cenu [29]. Adekvátne výsledky zjednodušených modelov však môžeme očakávať len v prípade, že nám postačujú hodnoty koncentrácií hlavných prvkov a teploty. Taktiež nemožno očakávať, že zjednodušené modely, primárne určené pre klasické spaľovanie, budú mať rovnako dobré výsledky aj pre spaľovanie s prídavným kyslíkom.

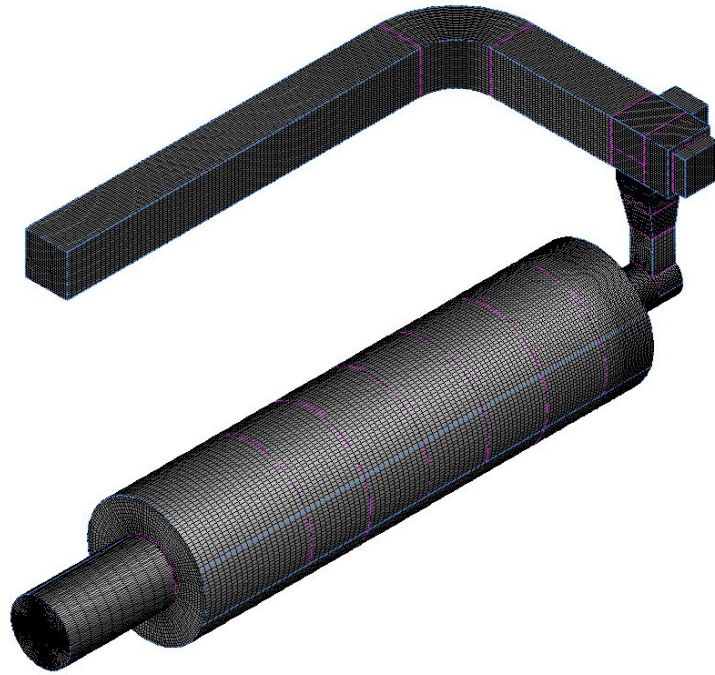
6.3 Model 3D

Proces matematického modelovania začína tvorbou 3D modelu, na ktorý býva aplikované nastavenie pre realizáciu výpočtu. V prípade danej práce bol vytváraný v programe Gambit 2.4.6 [30]. Geometria samotnej pece bola čiastočne prevzatá z dizertačnej práce Vondála [21], ktorá bola následne upravená na obraz súčasného stavu skúšobného zariadenia. Upravované boli najmä sekundárne palivové trysky, ktoré museli byť pootočené o uhol + 20°. Taktiež bola domodelovaná časť spalínovodu na zaistenie stabilného prúdenia spalín a na predídenie problému so spätným prúdením. Následne sa pristúpilo k tvorbe difúzoru, čo bolo dosiahnuté odobratím časti vnútorného objemu prívodného vzduchového potrubia a vytvorením plôch samotných trysiek. Model bol z dôvodu lepšej kontroly a nastavovania výpočtu rozdelený na tri hlavné časti. Prvá (pomenovaná „f_air_duct“) zahŕňala prívodné vzduchové potrubie a taktiež

oblasť difúzoru. Druhá časť (pomenovaná „f_air_swirler“) zahŕňala oblasť víriča a tretia časť (pomenovaná „f_chamber“) je samotná spaľovacia komora spolu s oblasťou primárnych a sekundárnych plynových trysiek. Ďalším krokom bolo pomenovanie vybraných plôch komory a ich rozčlenenie do troch kategórií:

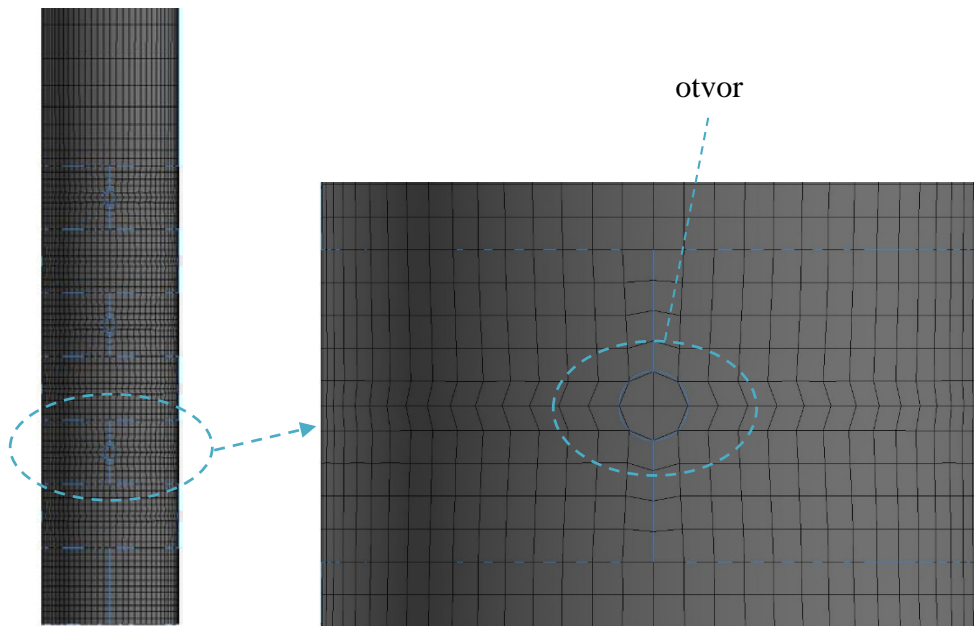
- plochy pri výpočte využité pre zadávanie vstupných a výstupných prúdov,
- steny,
- plochy určené na monitoring veličín (napr. teploty, koncentrácie látok, tepelné toky).

Nakoniec boli vykonané finálne úpravy modelu pre tvorbu siete.



Obr. 6.1 Sieť spaľovacej pece a prírodného potrubia spaľovacieho vzduchu.

Sieť bola vytváraná opäť v programe Gambit 2.4.6. V oblasti víriča bola opäť prevzatá z už spomínanej dizertačnej práce ako záchytný bod a následne bola odtiaľ vytváraná nová sieť. Vytvorená sieť (viď obr. 6.1) má približne 1,677 mil. elementov, z čoho 1,443 mil. elementov (čo tvorí 86 %) je typu hexa a 0,234 mil. elementov (čo tvorí 14 %) je typu tetra. Hlavný dôraz na kvalitu a jemnosť siete sa kládol v oblasti plynových trysiek, a tiež v oblasti výstupných otvorov na difúzore (obr. 6.2). Snahou bolo postupnými krokmi dosiahnuť tzv. „mapped face“ sieť na stene difúzoru, ktorá sa následne pomocou funkcie cooper rozšírila do priestoru, čím vznikla v tejto oblasti hexa sieť.



Obr. 6.2 Detailný pohľad na sieť v oblasti jedného výstupného otvoru na difúzore.

Ako je z daného obrázku zrejme pri tvorbe siete sa tryska nahradila štyrmi štvorhrannými bunkami, a teda kruhový obvod trysky sa aproximoval na osemhran, čím sa zmenšila plocha trysky približne o 10 %. Pre zachovanie nemennej prietokovej plochy došlo k zväčšeniu priemeru každej z trysiek. Plocha osemuholníku sa vypočíta ako [24]

$$P = \frac{1}{2}nr^2 \sin \alpha \quad (6.5)$$

kde n je počet strán, r polomer vpísanej kružnice a α stredový uhol ($\alpha = 360^\circ/n$). Nasledujúca tabuľka znázorňuje postup výpočtu nového priemeru trysky.

	Plynová tryska 1	Plynová tryska 2	Tryska difúzoru
Pôvodný polomer trysky	$r_1 = 1,3 \text{ mm}$	$r_2 = 1,5 \text{ mm}$	$r_3 = 1,05 \text{ mm}$
Pôvodná plocha trysky $P_0 = \pi r^2$	$P_{01} = 5,3094 \text{ mm}^2$	$P_{02} = 7,0686 \text{ mm}^2$	$P_{03} = 3,4636 \text{ mm}^2$
Plocha vpísaného osemuholníku	$P_1 = 4,78 \text{ mm}^2$	$P_2 = 6,364 \text{ mm}^2$	$P_3 = 3,1183 \text{ mm}^2$
Zmenšenie plochy ústia trysky $\Delta_1 = 100 \cdot (P_{01} - P_1)/P_{01}$ $\Delta_2 = 100 \cdot (P_{02} - P_2)/P_{02}$	$\Delta_1 = 9,97 \%$	$\Delta_2 = 9,96 \%$	$\Delta_3 = 9,97 \%$
Nový polomer trysky $P_{01} = P_1, P_{02} = P_2$ $r_1 = \sqrt{\frac{2P_{01}}{n \cdot \sin \alpha}}, r_2 = \dots, r_3$ $= \dots$	$r_1 = 1,37 \text{ mm}$	$r_2 = 1,58 \text{ mm}$	$r_3 = 1,11 \text{ mm}$

Tab. 6.1 Tabuľka výpočtu polomerov trysiek [24].

V prírodnom potrubí spaľovacieho vzduchu a v samotnej spaľovacej komore nebolo nutné použitie veľmi jemnej siete, a preto, pre skrátenie doby výpočtu, bol v tejto oblasti použitý „*mesh*“ s väčšími elementami.

6.4 Popis použitej výpočtovej techniky

Samotný výpočet bol realizovaný na výpočtovom clustery, ktorý je súčasťou NETME centra. Cluster je určený pre riešenie náročných úloh prúdenia tekutín a analýz pružnosti-pevnosti v komplexných geometriách. Cluster obsahuje 35 uzlov (t01-t35), pričom 30 z nich je určených na CFD úlohy. Využitie uzlov je nasledujúce:

t01 - t15: CFD: interaktívne výpočty, testovanie, priame prihlasovanie,

t16 - t25: CFD: dávkové úlohy pomocou SGE,

t26 - t30: CFD: správa pomocou Remote Solver Manageru,

t31 - t35: FEM: rýchly diskový priestor: /mnt/scratch, RSM.

Každý uzol je tvorený dvomi osemjadrovými procesormi s taktovaciou frekvenciou 2,6 GHz a celkovou operačnou pamäťou 64 GB RAM. Chod clusteru je zabezpečovaný operačným systémom typu unix CentOS 6. Pomocou rozhrania InfiniBand je zabezpečovaný prenos a správa dát počas paralelných výpočtov. Cluster umožňuje nainštalovanie rôznych simulačných nástrojov, v dnešnej dobe sú nimi napr. Ansys (verzia 14.5.7), COMSOL, Matlab atď. Pre naše potreby bol však využitý nástroj ANSYS Fluent [31].

6.5 Matematický model Fluent

Vhodné nastavenie matematického výpočtového modelu má kritický vplyv na výsledky simulácie. Preto pred spustením výpočtu musel byť model vhodne nastavený. Nastavenie obsahovalo voľbu modelov pre výpočet energie, chemickej kinetiky, turbulencie a v neposlednom rade radiácie. Dôležitou časťou je aj výber vhodných materiálov a správne nastavenie ich parametrov. V neposlednom rade musia byť vhodne nastavené monitory a metódy riešenia rovníc. Pred samotným nastavovaním modelov však došlo ešte ku kontrole mierky siete a k zapnutiu vplyvu gravitačného zrýchlenia.

6.5.1 Modely

a) Energia

Pre získanie hodnôt energie bol zapnutý model výpočtu energie.

b) Turbulencia

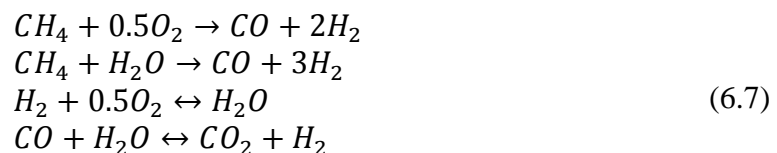
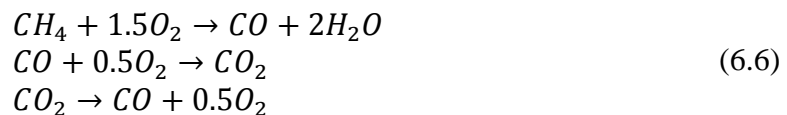
Z dôvodu zníženia výpočtového času bol na modelovanie prúdenia aplikovaný model typu RANS, ktorý predpokladá homogénne izotropné vlastnosti turbulentnej viskozity. Na simuláciu turbulencie sa použil „Realizovateľný“ k- ϵ model (Realizable k- ϵ model) [32]. Jedná sa o modifikovaný k- ϵ model, pričom „realizovateľný“ znamená, že model taktiež spĺňa isté matematické obmedzenia týkajúce sa Reynoldsových napätí, ktoré sú v súlade s fyzikálnou podstatou turbulentného prúdenia. V porovnaní s obyčajným k- ϵ modelom je výrazne lepší v predikcii prúdenia so silnou vírivosťou a rotáciou. Jedným zo zlepšení je nový model pre výpočet rozptylu kinetickej energie turbulencie, ktorý lepšie reprezentuje prenos energie a disipačný člen sa nevyznačuje singularitou. K ďalšiemu zlepšeniu dochádza pri výpočte rovnice pre turbulentnú viskozitu, kde v tomto prípade člen C_{μ} nie je konštantný, ale je funkciou rýchlosti rotácie, uhlovej rýchlosti systému rotácie priemerného napätia a charakteristík turbulencie [24].

c) Radiácia

Prenos tepla radiáciou bol simulovaný pomocou modelu „discrete ordinates“ (DO), ktorý bol volený vzhľadom na nízku optickú hrúbku študovanej aplikácie. Počas spaľovania sa tepelné žiarenie vyžaruje jednak stenami spaľovacej komory, ale taktiež aj spalinami. Ich emisivita závisí od teploty, tlaku a chemického zloženia v danom mieste. Pre výpočet celkovej emisivity spalín bol použitý model „WSGGM domain-based“, ktorý predpokladá, že lokálny emisný a absorpčný koeficient sú funkciou teploty a lokálnej koncentrácie CO_2 a H_2O [24]. Voľba tohto modelu je rozumným kompromisom medzi zjednodušeným modelom šedého plynu a kompletným modelom, ktorý zohľadňuje jednotlivé pásy absorpcie [31].

d) Chemická kinetika

Pre modelovanie chemických reakcií procesu spaľovania s prídavným kyslíkom boli použité dva typy modelov. Spočiatku bol použitý dvoj krokový model (viď rovnica (6.6)) a následne pre upresnenie výsledkov bol využitý štvorkrokový model (viď rovnica (6.7)) [33].



Chemická kinetika reakcií bola riadená pomocou modelu „*eddy-dissipation concept*“ (EDC). Jedná sa o nadstavbu modelu „*eddy-dissipation model*“ (EDM), ktorá umožňuje použitie detailnejších chemických mechanizmov. Predpokladá tiež dostatočný čas pre dosiahnutie chemickej rovnováhy.

6.5.2 Použité materiály

Model využíva tri typy médií, ktorými sú tekutina (fluid), pevná látka (solid) a zmes (mixture). Z dôvodu časovej a výpočtovej náročnosti modelovania daného procesu sa pristúpilo k zjednodušeniu zloženia. Zemný plyn bol nahradený čistým metánom, a taktiež sa zjednodušovalo zloženie spaľovacieho vzduchu. V okrajových podmienkach sa následne definovalo zloženie spaľovacieho vzduchu, paliva a taktiež spalín.

a) Fluid

- Spaľovací vzduch (nastavenie hodnôt fyzikálnych vlastností ostalo východzie). Zjednodušené zloženie pozostávalo z kyslíka, dusíka a vodnej pary (hodnoty zloženia boli prevzaté z meteorologických dát),
- Metán (nastavenie hodnôt fyzikálnych vlastností prebraté z databázy programu FLUENT),

b) Solid

- Oceľ (plášť spaľovacej komory z ocele 11 416 [34], tepelná vodivosť ocele bola nastavená na hodnotu $\lambda_{\text{ocel}} = 47 \text{ W/m}\cdot\text{K}$),

c) Mixture

- Metán-vzduch, kde medzi zložky patrí: O₂, N₂, CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄. Materiálové charakteristiky v tomto prípade boli značne upravované voči východným nastaveniam, hustota bola počítaná zo stavovej rovnice ideálneho plynu pre stlačiteľné prúdenie, merná tepelná kapacita je počítaná ako mólový vážený priemer z jednotlivých zložiek tzv. „*mixing-law*“, tepelná vodivosť a dynamická viskozita boli počítané podľa zákona miešania jednotlivých zložiek pre ideálny plyn, tzv. „*ideal-gas-mixing-law*“. Hodnota absorpčného koeficientu \bar{k}_a bola v jednotlivých simuláciách volená rôzne. Pri hlavných výpočtoch bola hodnota absorpčného koeficientu dopočítavaná v UDF pomocou vzťahu [33]

$$\bar{k}_a = -1/L \cdot \ln(1 - \varepsilon) \quad (6.8)$$

kde L je charakteristická dĺžka domény (pohybuje sa v rozmedzí 0,001-60 m), ε je celková emisivita zmesi plynov získaná zo vzťahu

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^I a_{\varepsilon,i}(T_g)(1 - e^{-k_i PL}) \quad (6.9)$$

kde $a_{\varepsilon,i}$ je emisný váhový faktor pre i -ty šedý plyn [-], $i = 0, \dots, n$,
 T_g teplota plynu [K], (500 – 3000 K),
 k_i absorpčný koeficient i -teho šedého plynu [m^{-1}], $i = 0, \dots, n$,
 P suma parciálnych tlakov všetkých plynov v zmesi [Pa].

Zvyšné charakteristiky zmesi ostali nezmenené.

6.5.3 Okrajové podmienky

Okrajové podmienky boli rozdelené na dve hlavné skupiny. Do prvej boli zaradené všetky plochy typu stena, kde vo všetkých prípadoch bola nastavená jej hrúbka na hodnotu 0,01 m. Ich teplota bola nastavená na 353,15 K a hodnota internej emisivity steny na 0,9. Do druhej skupiny patrili prietochné plochy médií, ktoré boli špecificky nastavované na základe jednotlivých simulácií pre prietoky kyslíka 0, 20 a 80 mN^3/h . Odlišovali sa nielen v hodnote prietoku prídavného kyslíka, ale taktiež aj v ostatných parametroch, medzi ktoré patrili prietoky, teploty a zloženia vstupných a výstupných prúdov (prívod kyslíka, prívod spaľovacieho vzduchu, jednotlivé prívody metánu a odvod spalín). Konkrétne hodnoty parametrov sú uvedené v tab. B 1, B 2, B 3 v prílohe B, pričom ako hodnoty pre výpočet boli volené priemerné hodnoty [21].

6.5.4 Riešič

Po nastavení okrajových podmienok a fyzikálnych vlastností materiálov došlo k hybridnej inicializácii výpočtu. Následne bola nutnosť použitia funkcie „*Patch*“ pre zaistenie vzplanutia horáku. Iniciačná teplota v komore bola nastavená na 1200 K a mólové koncentrácie jednotlivých chemických prvkov a zlúčenín v komore na jednotnú hodnotu 0,01 mol/ mm^3 .

Nastavenie výpočtu prebiehalo na základe doporučených postupov [21], [31], [33]. Nakoľko sú však simulácie OEC spaľovania zriedkavé a sú s ním minimálne skúsenosti, bolo nutné výpočet priebežne kontrolovať a prípadne reagovať na jeho nestálosť a prípadné problémy s ním.

Na riešenie prepojenia rovníc rýchlosti a tlaku bola použitá metóda SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations - Consistent) a hodnota korektúry skreslenia bola 1.

Pre výpočet gradientov premenných bola zvolená metóda „Last Squares Cell Based“ a na realizáciu výpočtu tlakového poľa sa použila schéma „PRESTO!“, ktorá je vhodná pre prúdenie charakteristické vysokou vírivosťou.

Začiatok výpočtu prebiehal v stacionárnom režime. V jeho prvej fáze boli zvyšné rovnice (rovnica hustoty, rýchlosti, energie, prenosu tepla radiáciou a turbulencie a chémie) diskretizované schémou prvého rádu. Pre zaistenie správneho rozbehu výpočtu a následnej konvergencie boli rovnice výpočtu zapínané postupne a na tieto potreby boli vytvorené tzv. „journal files“, ktoré na základe zadaného postupu riadili výpočet, počet iterácií v jednotlivých krokoch a taktiež priebežné ukladanie výpočtu. Príklad je uvedený v tab. B 4 v prílohe B.

V druhej polovici stacionárneho režimu došlo k zvýšeniu rádu diskretizácie rovníc pre výpočet hustoty a rýchlosti na QUICK. Následne po niekoľkých iteráciách došlo k prepnutiu výpočtu do nestacionárneho režimu s časovým krokom 0,0005 s. V prvej fáze sa opäť počítalo so schémou diskretizácie prvého rádu, ktorá sa časom pre rovnice hustoty a rýchlosti zvýšila na QUICK.

Jednotlivé fázy výpočtu:

- I. Stacionárny režim prúdenia
 - a) Rovnice diskretizácie prvého rádu
 1. Spustenie výpočtu prúdenia
 2. Pripojenie výpočtu energie
 3. Pripojenie výpočtu chémie
 4. Pripojenie výpočtu teplôt
 5. Pripojenie výpočtu radiácie
 - b) Zvýšenie rádu diskretizácie rovníc hustoty a rýchlosti
 6. Spustenie výpočtu prúdenia, energie, chémie a teplôt
 7. Pripojenie výpočtu radiácie
- II. Nestacionárny režim prúdenia
 - a) Rovnice diskretizácie prvého rádu
 8. Spustenie výpočtu prúdenia
 9. Pripojenie výpočtu energie
 10. Pripojenie výpočtu chémie
 11. Pripojenie výpočtu teplôt
 12. Pripojenie výpočtu radiácie
 - b) Zvýšenie rádu diskretizácie rovníc hustoty a rýchlosti
 13. Spustenie výpočtu prúdenia, energie, chémie a teplôt
 14. Pripojenie výpočtu radiácie

6.6 Výsledky simulácií a ich porovnanie s experimentálnymi dátami

Celkový čas jednotlivých simulácií bol 2 s. Po ich uplynutí výpočet skončil a nasledovalo spracovávanie dát. Výsledné hodnoty boli vyexportované a následne spracovávané programom CFD-Post 14.5, ktorý je súčasťou balíku ANSYS 14.5. Hlavným zámerom bolo spracovanie a vyhodnotenie rozloženia teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory a približný tvar plameňa. Okrem teplôt plameňa boli spracovávané dáta tepelných tokov jednotlivými sekciami komory a hodnoty koncentrácie kyslíka v prívodnom potrubí spaľovacieho vzduchu.

6.6.1 Premiešavanie kyslíka so spaľovacím vzduchom

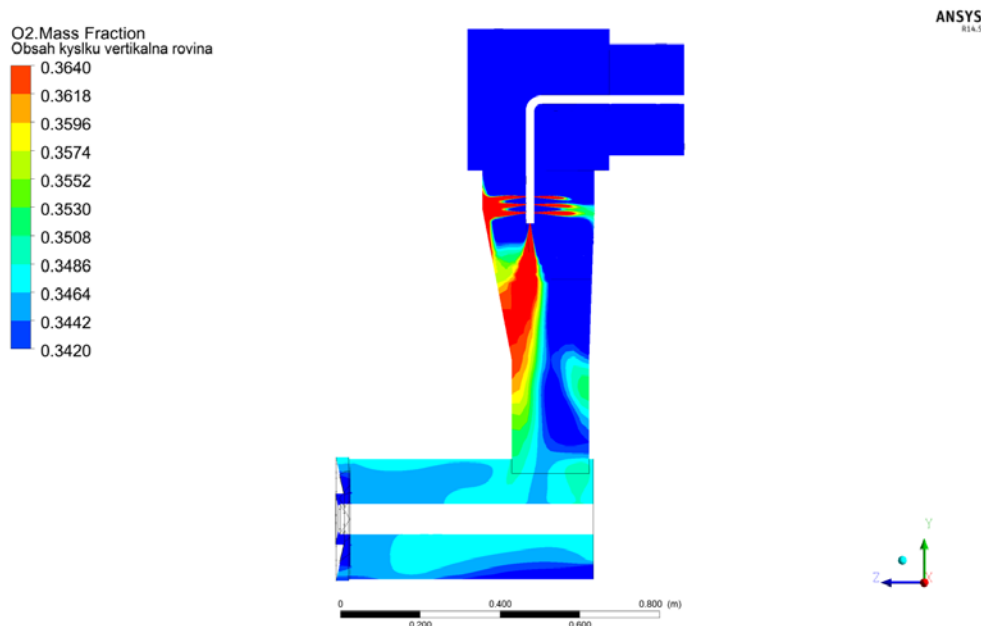
Na OEC spaľovanie má značný vplyv miera premiešania kyslíka so spaľovacím vzduchom. Z výsledkov simulácií je zrejmé, že pri prívode kyslíka tryskami difúzoru dochádza k nerovnomernému premiešaniu. Hoci k výpočtom miery premiešania došlo aj v prípade prietoku kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$, pre demonštráciu nerovnomernosti bol zvolený prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$, na ktorom je daný stav zreteľnejší (obr. 6.3). Pre popis miery premiešania na predom definovanom priereze bol použitý tzv. „uniformity index“, ktorého hodnota 1 znamená dokonalé premiešanie. Pre potreby zahrnutia premenlivosti toku bol konkrétne zvolený „uniformity index mass- weighted“ γ_m , ktorý je charakterizovaný vzťahom

$$\gamma_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(|\phi_i - \bar{\phi}_m|)(|\rho_i \vec{v}_i A_i|)]}{2|\bar{\phi}_m| \sum_{i=1}^n [(|\rho_i \vec{v}_i A_i|)]} \quad (6.10)$$

kde ϕ_i je špecifikovaná premenná na ploche i , $\bar{\phi}_m$ je priemerný tok premennou plochou vyjadrený zo vzťahu

$$\bar{\phi}_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\phi_i (|\rho_i \vec{v}_i A_i|)]}{\sum_{i=1}^n [(|\rho_i \vec{v}_i A_i|)]} \quad (6.11)$$

Pre určenie jeho hodnoty sú volené tri plochy a to na hranici víriča, kde $\gamma_m = 0,7154$, vo vzdialenosti 20 cm, kde $\gamma_m = 0,7290$ a vo vzdialenosti 35 cm, kde $\gamma_m = 0,7805$. Poukazujú na to, že miera premiešania je nízka čo je zrejmé aj z obr. E 2 v prílohe E.

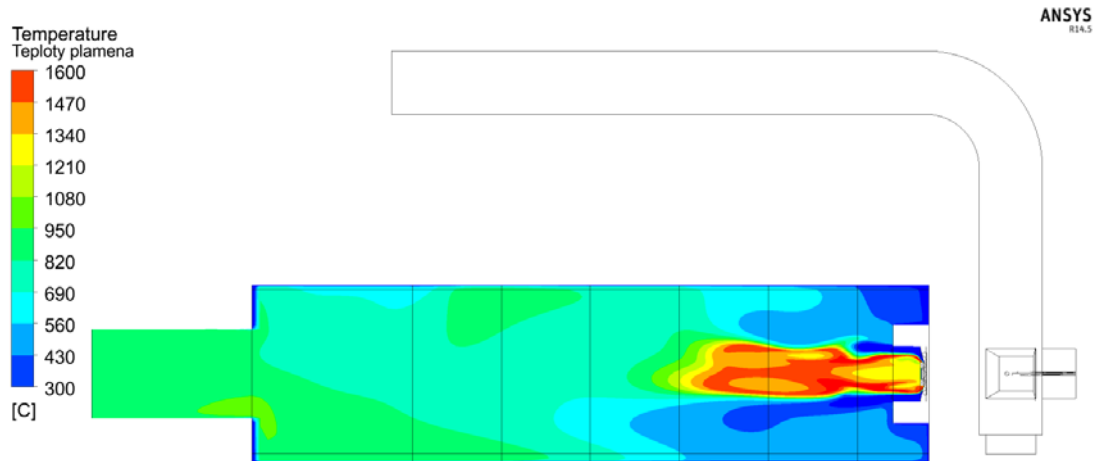


Obr. 6.3 Rozloženie kyslíka vo vertikálnom reze osou prívodného potrubia spaľovacieho vzduchu pre prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.

Obdobné výsledky boli dosiahnuté aj pri simulácii obohacovania s prietokom kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$ vid' obr. D 2 a D 3 v prílohe D. Pri ďalších simuláciách by pre porovnanie bolo vhodné aplikovať mieru obohacovania navýšením percentuálneho podielu kyslíka vo vzduchu na prívode do potrubia.

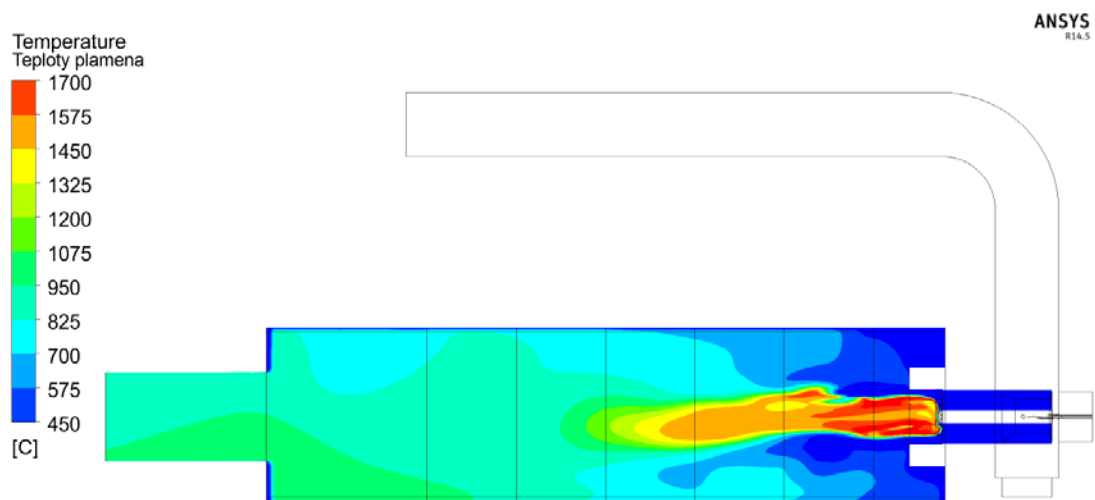
6.6.2 Teploty plameňa

Súčasťou modelovania bola simulácia teplôt v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre jednotlivé prietoky. Ako prvá bola vykonaná simulácia pre prietok $0 \text{ mN}^3/\text{h}$, ktorá slúžila ako referenčná simulácia pre porovnanie vplyvu kyslíka na plameň. Ako je zrejmé z obr. 6.4 spaľovací vzduch sa ihneď po vstupe do komory premiešava s metánom a dochádza k intenzívnemu spaľovaniu. Na základe rozloženia teplôt v oblasti druhej sekcie je evidentné, že v tomto mieste dochádza k ochladzovaniu jadra plameňa vplyvom vzduchu, ktorý obteká výrič. Tento jav sa objavuje vo všetkých troch simuláciách. Predikované teploty (hlavne teplotné špičky) sú nadhodnotené, čo vyplýva aj z porovnania s experimentálnymi dátami na obr. 5.10.



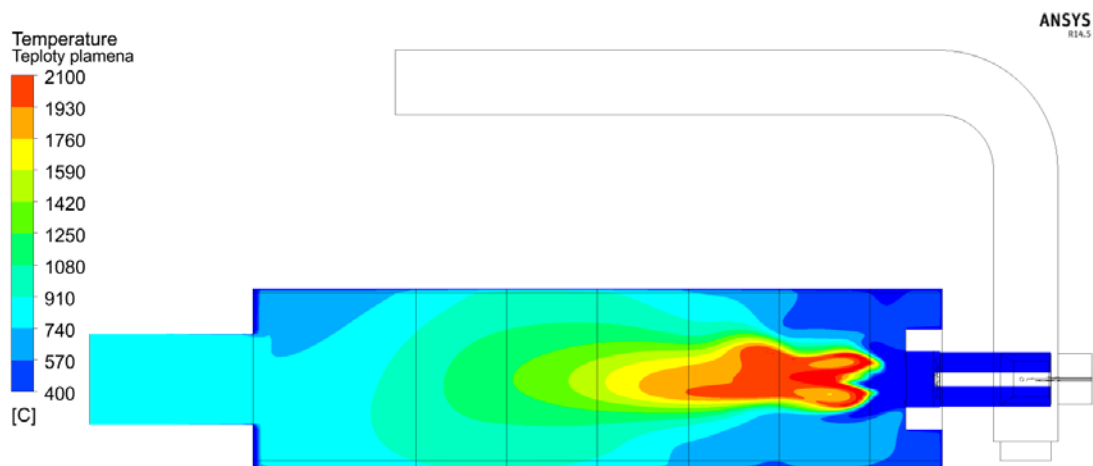
Obr. 6.4 Rozloženie teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre prietok kyslíka $0 \text{ mN}^3/\text{h}$.

Pri obohacovaní s prietokom kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$ (obr. 6.5) nedošlo v porovnaní s prietokom $0 \text{ mN}^3/\text{h}$ ku skráteniu plameňa ako v prípade experimentálnych dát. Došlo k zúženiu plameňa, a taktiež k zvýšeniu jeho intenzity, čo je spôsobené prítomnosťou vyššieho množstva kyslíka. Pri porovnaní rozloženia teplôt s experimentálnymi dátami na obr. 5.11 možno usúdiť, že rozloženie je síce mierne nadhodnotené, ale tvar plameňa je obdobný. Došlo však k jeho predĺženiu, čo má za následok zlá simulácia premiešavania.



Obr. 6.5 Rozloženie teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre prietok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$.

Pri zvýšení miery obohacovania na hodnotu prietoku kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$ dochádza k premiešaniu a následnému vzplanutiu paliva a zmesi kyslíka so vzduchom až v oblasti za víričom (v druhej sekcii spaľovacej komory). Príčinou môže byť neschopnosť modelu RANS predikovať silné vírivé prúdenie v oblasti za víričom. Tento fakt sa odzrkadľuje aj na hodnotách tepelných tokov, čo je popísané v nasledujúcej kapitole.



Obr. 6.6 Rozloženie teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.

Pre vizualizáciu predbežného tvaru plameňa bola použitá isoplocha znázorňujúca miesta, v ktorých je hodnota hmotnostného zlomku paliva (v tomto prípade CH_4) konštantná. Táto hodnota sa spravidla volí veľmi nízka (charakterizuje teda oblasť úplného vyhorenia, tzv. obálka plameňa), aby isoplocha čo najdôveryhodnejšie zobrazila tvar plameňa, pričom pre zafarbenie sa použila teplota v danom mieste. Isoplochy pre jednotlivé prietoky sú zobrazené na obr. C 3, D 5 a E 4 v prílohách C, D a E.

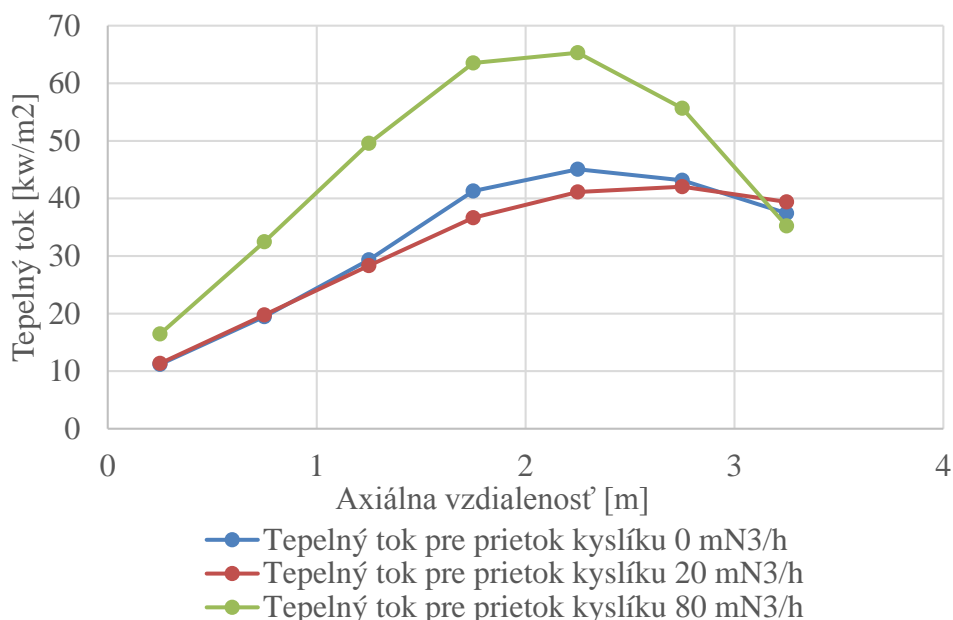
6.6.3 Tepelné toky

Meranie tepelných tokov pre jednotlivé sekcie spaľovacej komory prebiehalo až od piateho kroku výpočtu (viď. fáza výpočtu v kapitole 6.5.4). Hodnota jednotlivých tepelných tokov spočiatku kolísala, no po čase došlo k jej ustáleniu. Pre zobrazenie tepelných tokov jednotlivými sekciami boli použité priemerné hodnoty dlhšieho časového úseku v ustálenej časti. Profily tepelných tokov jednotlivými sekciami sú znázornené v grafe na obr. 6.7. Z tvaru kriviek a z hodnôt tepelných tokov v jednotlivých sekciiach je zrejme, že sa značne odlišujú od experimentálnych dát. Hlavnou odlišnosťou je nižšia hodnota celkového tepelného výkonu pri jednotlivých prietokoch čo je porovnané v tab. 6.2. Druhou významnou odlišnosťou je posunutie maximálnej hodnoty tepelného toku sekciiou do oblasti druhej polovice komory.

	Celkový tepelný výkon získaný experimentálne [kW]	Celkový tepelný výkon získaný simuláciou [kW]
Prietok kyslíka $0 \text{ mN}^3/\text{h}$	446,4	406,7
Prietok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$	506,0	395,9
Prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$	580,9	539,6

Tab. 6.2 Tabuľka porovnania hodnôt celkových tepelných tokov získaných experimentálne a simuláciou.

Jednou z príčin, ako sme sa dozvedeli v predchádzajúcej kapitole, môže byť jednak fakt, že v simulácii s obohatením dochádza k horeniu až kúsok za horákom ale taktiež aj rozdielna hodnota teploty plameňa. Odlišnosťou oproti experimentu je v našom prípade aj fakt, že boli zanedbané tepelné straty inšpekčnými otvormi a čelá komory boli nastavené ako adiabatické. Ich hodnota je však podľa [21] približne 1 %.



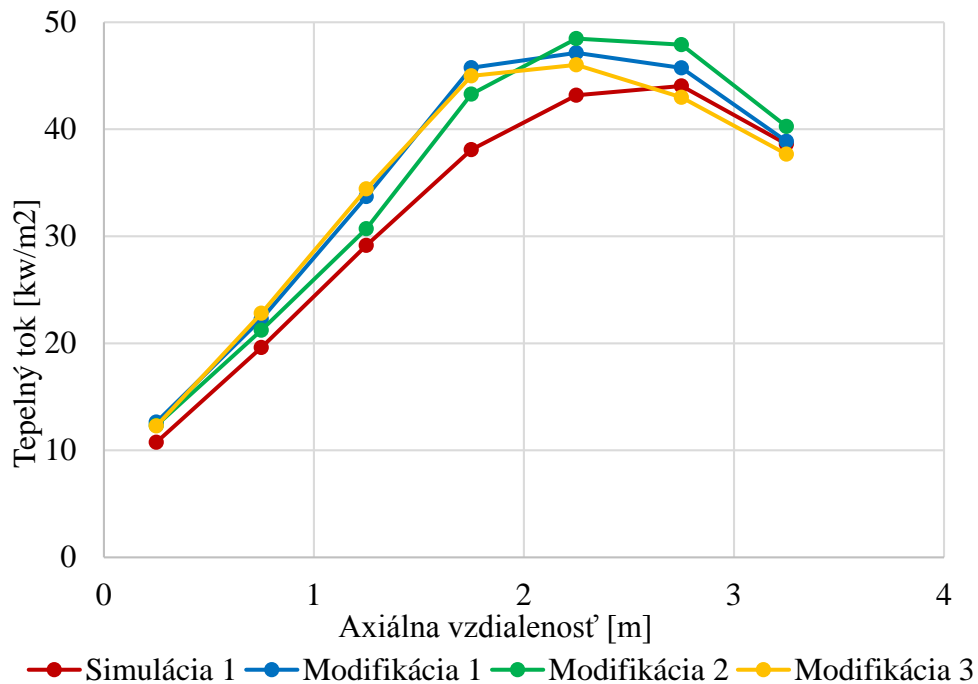
Obr. 6.7 Graf znázorňujúci profily tepelných tokov naprieč jednotlivými sekciami získanými simuláciou pre prietoky kyslíka 0, 20, 80 mN³/h.

Pri prietoku kyslíka 0 mN³/h nie je zrejma odlišnosť numerických výsledkov od experimentálnych dát vzhľadom na to, že nastavenie výpočtového modelu bolo zhodné s nastavením modelu v dizertačnej práci Vondála [21]. V snahe o dosiahnutie prijateľnejších a presnejších výsledkov boli pre prietok kyslíka 20 mN³/h vykonané tri simulácie s rôznymi modifikáciami v nastaveniach modelu. Došlo pri nich k zmene nastavení predovšetkým chémie, kde bol v niektorých prípadoch využitý 4-krokový mechanizmus, ktorý je popísaný v rovnici (6.7). V poslednej modifikácii simulácie došlo k zmene EDC modelu na EDM model, ktorý nezohľadňuje čas pre dosiahnutie chemickej rovnováhy. Ďalšou zamieňanou veličinou bola hodnota absorpčného koeficientu, ktorá bola vybraná z troch dostupných variantov (UDF, WSGGM Domain Based a WSGGM User specified). Kombinácie nastavení pre jednotlivé modifikované výpočty sú zobrazené v tab. 6.3.

	Chémia	EDC/EDM	Absorpčný koeficient
Simulácia 1	2- kroková	EDC	Počítaný z UDF
Modifikácia 1	4-kroková	EDC	WSGGM Domain Based
Modifikácia 2	4-kroková	EDC	WSGGM User specified L = 0,6 m
Modifikácia 3	2-kroková	EDM	WSGGM Domain Based

Tab. 6.3 Tabuľka nastavení výpočtov pre modifikáciu výpočtu tepelných tokov spaľovania s prietokom kyslíka 20 mN³/h.

Z grafu výsledkov modifikačných simulácií (obr. 6.8) je zrejme, že zmena určitých nastavení mala priaznivý vplyv na hodnotu tepelných tokov. Tieto hodnoty sú však len informačné, pretože z dôvodu časovej náročnosti boli dané modifikačné výpočty simulované iba pre stacionárny režim a rovnice (rovnica hustoty, rýchlosti, energie, prenosu tepla radiáciou a turbulencie a chémie) boli diskretizované schémou prvého rádu. Celkový tepelný výkon sekciami spaľovacej komory počas experimentu bol 506 kW. Počas prvého simulačného výpočtu bola hodnota celkového tepelného toku iba 396 kW, avšak počas prvej modifikácie sme sa dostali až na hodnotu 431 kW, počas druhej na hodnotu 430 kW a počas tretej modifikácie na hodnotu tepelného toku 422 kW. Z toho vyplýva, že vhodným nastavením simulačného modelu sa možno priblížiť k experimentálnym dátam.



Obr. 6.8 Graf znázorňujúci profily tepelných tokov naprieč jednotlivými sekciami získanými modifikáciou simulácie pre prietok kyslíka $20 \text{ m}_N^3/\text{h}$.

6.6.4 Zhrnutie možných dôvodov odlišnosti experimentu a simulácie

V predchádzajúcich kapitolách bolo poukázané na odlišnosti experimentálnych dát v porovnaní s dátami získanými simuláciou. Existuje niekoľko možných príčin daného stavu:

- 1) Nedostatočná predikcia modelov RANS vírivého prúdenia v oblasti horáku tesne za víričom.
- 2) Nerovnomerné premiešanie kyslíka a spaľovacieho vzduchu v prívodnom vzduchovom potrubí.
- 3) Zanedbanie tepelných strát inšpekčnými otvormi do okolia a čelá komory boli nastavené ako adiabatické.
- 4) Nepresne nastavená hodnota absorpčného koeficientu.
- 5) Chyba zdrojového kódu použitého simulačného programu Fluent (málo pravdepodobné).
- 6) Krátky čas nestacionárneho výpočtu. Podľa [24] sú potrebné približne 4 s.

7 Záver

Výskum spaľovania je v dnešnej dobe možné robiť dvomi základnými spôsobmi. Prvým spôsobom je experimentálne meranie, ktoré je spravidla presnejšie a má vyššiu výpovednú hodnotu, ale na druhej strane výstavba takéhoto zariadenia je finančne aj časovo náročnejšia. Druhý, rýchlo sa rozvíjajúci spôsob, je matematické modelovanie pomocou metód CFD. Tento spôsob je však značne obmedzený skúsenosťami výpočtára a vhodnou voľbou výpočtových modelov, pričom nesprávna voľba môže viesť k diametrálne odlišným výsledkom. Z tohto dôvodu je vhodné kombinovať oba uvedené spôsoby výskumu. Táto diplomová práca sa zaoberá obidvomi spôsobmi a ich porovnaním, pre spaľovanie s obohatením spaľovacieho vzduchu kyslíkom s prietokom 0, 20 a 80 mN³/h pri konštantnom obsahu kyslíka v suchých spalinách (3 %).

Začiatok práce je venovaný stručnej charakteristike a zákonitostiam všeobecne platiacim pre spaľovanie. Nasledujúca časť sa už venuje špeciálnemu typu spaľovania s obohacovaním kyslíkom (OEC). Bola vypracovaná rešerš v oblasti danej problematiky a následne popis jeho rôznych metód a nutnej bezpečnosti pri práci s čistým kyslíkom.

Experiment bol zameraný na metódu obohacovania kyslíkom vstrekaním čistého kyslíka do prírodného potrubia spaľovacieho vzduchu. Na tieto účely bol vyrobený kyslíkový difúzor obsahujúci 13 trysiek, ktorý bol umiestnený do vertikálnej časti prírodného potrubia. Hlavnými časťami na ktoré bol experiment zameraný, bolo meranie tepelných tokov do stien jednotlivých sekcií spaľovacej komory a meranie teplôt v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory. Výsledky tejto časti poukazujú na značný vplyv obohacovania na teplotu a tvar plameňa. Pri zvyšovaní miery obohacovania došlo k navýšeniu teploty plameňa a taktiež k skráteniu jeho dĺžky. Obohacovanie má taktiež vplyv aj na tepelné toky do steny plameňa, ktoré pri zvýšení prietoku kyslíka značne narastajú.

Druhou zásadnou časťou práce je matematické modelovanie obohacovania kyslíkom pre vyššie spomínané prietoky. Na začiatku bola vypracovaná krátka rešerš týkajúca sa matematického modelovania OEC spaľovania. Následne došlo k vytvoreniu vhodnej výpočtovej siete, ktorá bola vzhľadom na rozsah výpočtovej oblasti veľmi dôležitá, a na čo nadväzovali jednotlivé simulácie. Výsledky boli porovnané s experimentálnymi dátami, pričom sa zistili značné odlišnosti. Z tohto dôvodu bola skúmaná miera premiešania kyslíka vo vzduchu, kde sa zistili drobné nedostatky a bolo preukázané, že obohatený vzduch nemá na vstupe do spaľovacej komory rovnomerné zloženie. To malo následne vplyv aj na tvar a teplotu plameňa, ktorá bola mierne nadhodnotená. Pri obohacovaní s prietokom kyslíka 80 mN³/h došlo k posunutiu plameňa smerom do komory, čo bolo pravdepodobne spôsobené zlou predikciou chemických reakcií pri silne vírivom prúde. Krivky simulovaných tepelných tokov taktiež poukazujú na odlišnosti voči experimentálnym hodnotám. Odlišnosť je jednak v posunutí špičky smerom do vnútra komory, a tiež v hodnote celkového prestupu tepla.

Pre získanie kvalitatívne obdobných výsledkov simulácie a experimentu bolo pre prietok kyslíka 20 mN³/h vykonaných niekoľko modifikačných výpočtov, ktoré poukazujú na vplyv odlišnosti nastavení na tepelné toky do stien spaľovacej komory. Tieto výpočty však boli realizované len ako stacionárne z dôvodu časovej náročnosti. Vzhľadom na rozsiahlosť danej problematiky a časovú náročnosť výpočtov, budú možné modifikácie predmetom ďalšieho výskumu.

Použitá literatura

- [1] S. R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, McGraw-Hill, New York, 1996; Second Edition, 2000.
- [2] Baukal C.E., *Industrial Combustion, Pollution and Control*, USA, Marcel Dekker, 2004, ISBN 0-8247-4694-5.
- [3] *Optimal Combustion Processes - Fuels and Excess Air* [online]. [cit. 2013-11-12]. Dostupné z WWW: <http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d_167.html>.
- [4] Baukal C.E., *Oxygen-Enhanced combustion*, USA, CRC Press LLC, 1998, ISBN 0-8493-1695-2.
- [5] *Center for Climate and Energy Solutions* [online]. 2000 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.c2es.org/docUploads/Air%20Products%20--%20When%20does%20oxy%20fuel%20make%20sense.pdf>>.
- [6] Nadř, M. *Hořáky pro vysokoteplotní průmyslové aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 39 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.
- [7] *Plynárenská příručka – 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*, Praha, GAS s.r.o., 1997, ISBN 80-902339-6-1.
- [8] Zhen, H. S., C. W. Leung a C. S. Cheung, *Combustion characteristics of a swirling inverse diffusion flame upon oxygen content variation*. *Applied Energy*, Vol. 88, 2011, p. 2925–2933. Dostupné z WWW: <doi:10.1016/j.apenergy.2011.02.041>.
- [9] Wu KK, Chang YC, Chen CH, Chen YD. *High-efficiency combustion of natural gas with 21e30% oxygen-enriched air*. *Fuel* 2010;89:2455e62.
- [10] Bělohradský P., et al., *Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics*, *Energy* (2014), Dostupné z WWW: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.026>>.
- [11] MERLOA N. et al. *Combustion characteristics of methane–oxygen enhanced air turbulent non-premixed swirling flames*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 56, July 2014, p. 53 – 60.
- [12] Tan Y, Douglas MA, Thambimuthu KV. *CO₂ capture using oxygen enhanced combustion strategies for natural gas power plants*. *Fuel* 2002; 81:1007-1016.
- [13] Sánchez M, Cadavid F, Amell A. *Experimental evaluation of a 20 kW oxygen enhanced self-regenerative burner operated in flameless combustion mode*. *Appl. Energy* 2013; 111:240-246.
- [14] Linde AG [online]. 2010 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.linde-gas.com.ph/en/>>.
- [15] *Air Products and Chemicals, Inc.* [online]. 1996 [cit. 2013-12-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.airproducts.cz/glass/sklarstvi/druhyHoraku.htm>>.
- [16] *Diskretizace východících rovnic–numerické modelování*, [online]. [cit.2014-01-03]. Dostupné z WWW: <http://209.85.135.132/search?q=cache:oS23_mQQAokJ:knc.czu.cz/~vachm/fluid/NS_diskr.doc+Diskretizace+východících+rovníc&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>.
- [17] *Messe Düsseldorf GmbH* [online]. [cit. 2014-1-03]. Dostupné z WWW: <http://www.glasstec.de/cipp/md_glasstec/custom/pub/content,oid,6896/lang,2/ticket_g_u_e_s_t/~Burner_Innovation_for_Glass_Melting.html>.
- [18] Beeson, H.D., Stewart, W.F., Woods, S.S., *Safe Use of Oxygen and Oxygen Systems*, USA, American Society for Testing and Materials, 2005, ISBN 0-8031-2083-4.
- [19] *Safe Pro, s.r.o.* [online]. [cit. 2014-2-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.safepro.sk/tepelne-rizika/>>.

- [20] ČSN 38 6461: *Kyslíkovody*, 2005.
- [21] Vondál, J. *Computational Modeling of Turbulent Swirling Diffusion Flames*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2012. 221 p. Supervisor doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.
- [22] G. van Rossum and F.L. Drake (eds), *Python Reference Manual*, PythonLabs, Virginia, USA, 2001. Dostupné z WWW: <<http://www.python.org>>.
- [23] Bašta J., *Otopné plochy*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001, ISBN 80-01-02365-6.
- [24] Bělohradský, P. *Metody pro určování charakteristických parametrů procesů spalování na bázi experimentů a modelování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 143 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [25] Hájek, J. *Modelování s využitím CFD - I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008.
- [26] Kodajková, Z. *Analýza tepelných ztrát pasivního manekýna ve větrané místnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Matěj Forman, Ph.D.
- [27] Blejchar, Tomáš. *Turbulence-Modelování proudění –CFX*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010, 262 s. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [28] F. Breussin and others, *Computing of oxy-natural gas flames using both a global combustion scheme and a chemical equilibrium procedure*, Combustion Science and Technology, Vol. 160, 2000, p. 369-397.
- [29] Brink, A.; Kilpinen, P.; Hupa, M.; Kjaldman, L. F. Breussin and others, Computing of oxy-natural gas flames using both a global combustion scheme and a chemical equilibrium procedure, Combustion Science and Technology. 1999, vol. 141, no. 1-6, p. 59-81. Dostupné z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/88197777/Methane-Oxyfuel-Comb>>.
- [30] GAMBIT 2.3.16, *User's Guide*, Fluent Inc., Lebanon, USA, 2004.
- [31] FLUENT. *FLUENT 6.3.26, User's Guide*. 2006. S.l.: Fluent Inc., Lebanon, USA, 2006.
- [32] Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J., *A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation*, Computers & Fluids 1995; 24:227-238.
- [33] Chungen Yin, Lars C. R. Johansen, 2010. *New Weighted Sum of Gray Gases Model Applicable to Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Oxy-Fuel Combustion: Derivation, Validation, and Implementation*. Energy & Fuels Vol. 24, 2010, p. 6275–6282. Dostupné z WWW: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef101211p?journalCode=enfuem>>
- [34] ČSN 41 1416: *Ocel' 11 416*, 1993.

Zoznam obrázkov

Obr. 2.1	Graf závislosti prebytku O_2 v spaľovacom vzduchu a v suchých spalinách ako funkcia prebytku vzduchu pre spaľovanie metánu.....	17
Obr. 2.2	Graf závislosti prebytku O_2 v oxidačnom činitele (obsahujúcom O_2 a N_2) a v suchých spalinách ako funkcia O_2 v oxidačnom činitele, pre spaľovanie metánu s prebytkom oxidačného činiteľa 15 %.....	17
Obr. 3.1	Schéma obohacovania vzduchu kyslíkom.....	21
Obr. 3.2	Schéma injektovania kyslíka do pece.....	21
Obr. 3.3	Schéma nahradzovania spaľovacieho vzduchu kyslíkom.....	22
Obr. 3.4	Schéma samostatného prívodu vzduchu a kyslíka do horáku.....	22
Obr. 4.1	Spaľovací trojuholník.....	23
Obr. 4.2	Limity zápalnosti pre metán vo vzduchu obohatenom o O_2 v závislosti na množstve kyslíka.....	25
Obr. 4.3	Vplyv tlaku na minimálne požiadavky hodnôt kyslíka pre šírenie zemného plynu, etánu a propánu v zmesi vzduchu s dusíkom pri teplote $25\text{ }^\circ\text{C}$	25
Obr. 5.1	Zariadenie skúšobne horákov.....	28
Obr. 5.2	Schéma zariadenia skúšobne horákov.....	29
Obr. 5.3	Zariadenie určené na reguláciu toku kyslíka.....	30
Obr. 5.4	Umiestnenie difúzoru do prívodného potrubia spaľovacieho vzduchu: a) model b) reálny stav.....	30
Obr. 5.5	Nákres koncovej časti difúzorovej trubky s tryskami.....	30
Obr. 5.6	Model dvojstupňového plynového horáku.....	31
Obr. 5.7	Termočlánokový drôt v ochrannnej keramickej trubici.....	32
Obr. 5.8	Datalogger midi LOGGER GL2220.....	33
Obr. 5.9	Experimentálne meranie teploty plameňa.....	33
Obr. 5.10	Graf nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka $0\text{ mN}^3/\text{h}$	34
Obr. 5.11	Graf nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka $20\text{ mN}^3/\text{h}$	35
Obr. 5.12	Graf nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka $80\text{ mN}^3/\text{h}$	35
Obr. 5.13	Graf závislosti tepelných tokov na čase pre prietok kyslíka $0\text{ mN}^3/\text{h}$ v priebehu záznamu dát.....	38
Obr. 5.14	Graf závislosti tepelných tokov na čase pre prietok kyslíka $20\text{ mN}^3/\text{h}$ v priebehu záznamu dát.....	39
Obr. 5.15	Graf závislosti tepelných tokov na čase pre prietok kyslíka $80\text{ mN}^3/\text{h}$ v priebehu záznamu dát.....	40
Obr. 5.16	Graf znázorňujúci profil experimentálne nameraných tepelných tokov naprieč jednotlivými sekciami pre prietoky kyslíka 0, 20, $80\text{ mN}^3/\text{h}$	41
Obr. 6.1	Sieť spaľovacej pece a prívodného potrubia spaľovacieho vzduchu.....	45
Obr. 6.2	Detailný pohľad na sieť v oblasti jedného výstupného otvoru na difúzore.....	46
Obr. 6.3	Rozloženie kyslíka vo vertikálnom reze osou prívodného potrubia spaľovacieho vzduchu pre prietok kyslíka $80\text{ mN}^3/\text{h}$	51
Obr. 6.4	Rozloženie teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre prietok kyslíka $0\text{ mN}^3/\text{h}$	52
Obr. 6.5	Rozloženie teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre prietok kyslíka $20\text{ mN}^3/\text{h}$	52
Obr. 6.6	Rozloženie teplôt plameňa v horizontálnej rovine symetrie spaľovacej komory pre prietok kyslíka $80\text{ mN}^3/\text{h}$	53
Obr. 6.7	Graf znázorňujúci profily tepelných tokov naprieč jednotlivými sekciami získanými simuláciou pre prietoky kyslíka 0, 20, $80\text{ mN}^3/\text{h}$	54

Obr. 6.8 Graf znázorňujúci profily tepelných tokov naprieč jednotlivými sekciami získanými modifikáciou simulácie pre prietok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$ 55

Zoznam tabuliek

Tab. 1.1	Prebytok spaľovacieho vzduchu v závislosti na použítom palive.....	12
Tab. 5.1	Tabuľka nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka 0 mN ³ /h.....	34
Tab. 5.2	Tabuľka nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka 20 mN ³ /h.....	34
Tab. 5.3	Tabuľka nameraných teplôt plameňa pre prietok kyslíka 80 mN ³ /h.....	35
Tab. 5.4	Tabuľka tepelných tokov v jednotlivých sekciách pre prietok kyslíka 0 mN ³ /h a relatívne chyby merania.....	38
Tab. 5.5	Tabuľka tepelných tokov v jednotlivých sekciách pre prietok kyslíka 20 mN ³ /h a relatívne chyby merania.....	39
Tab. 5.6	Tabuľka tepelných tokov v jednotlivých sekciách pre prietok kyslíka 80 mN ³ /h a relatívne chyby merania.....	40
Tab. 6.1	Tabuľka výpočtu polomerov trysiek.	46
Tab. 6.2	Tabuľka porovnania hodnôt celkových tepelných tokov získaných experimentálne a simuláciou.....	53
Tab. 6.3	Tabuľka nastavení výpočtov pre modifikáciu výpočtu tepelných tokov spaľovania s prietokom kyslíka 20 mN ³ /h.	54

Zoznam symbolov

Symbol	Jednotka	Význam
K	[mg/m ²]	stupeň kontaminácie
V	[l]	celkový objem použitého odmasťovača
m ₁	[mg]	hmotnosť odparku z čistého odmasťovača
V ₁	[l]	objem vzorky čistého odmasťovača
m ₂	[mg]	hmotnosť odparku z čistého odmasťovača
V ₂	[l]	objem vzorky použitého odmasťovača
S	[m ²]	veľkosť odmasťovanej plochy
P	[kW]	výkon horáku
α	[-]	prebytok vzduchu
LHV	[kJ/m _N ³]	výhrevnosť paliva
S ₁	[-]	stechiometria reakcie 1
S ₂	[-]	stechiometria reakcie 2
S ₁ ^P	[-]	stechiometrický pomer 1 pre teoreticky dokonalé spaľovanie
S ₂ ^P	[-]	stechiometrický pomer 2 pre teoreticky dokonalé spaľovanie
Ω	[-]	hodnota podielu kyslíka v oxidačnom činidle
V	[m _N ³ /h]	objemový prietok plynu
L _(h,d)	[%]	horná alebo dolná medza zápalnosti vykurovacieho plynu
C _i	[obj %]	koncentrácia jednotlivých horľavých zložiek,
L _{i(h,d)}	[%]	tabuľková hodnota hornej alebo dolnej medze zápalnosti pre zložku <i>i</i>
n	[obj %]	súčet koncentrácií nehorľavých zložiek vykurovacieho plynu
u, v, w	[m/s]	zložky rýchlosti
t	[s]	čas
p	[Pa]	tlak
ρ	[kg/m ³]	hustota
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
f _{x,y,z}	[N]	zložky vonkajšej objemovej sily
\dot{Q}_i	[W]	tepelný tok

\dot{q}_i	[kW/m ²]	hustota tepelného toku do steny <i>i</i> -tej sekcie
$m_{\text{voda},i}$	[kg/s]	hmotnostný prietok chladiacej vody <i>i</i> -tou sekciou
$V_{\text{voda},i}$	[m ³ /h]	objem vzorku čistého odmasťovača
$c_{p,i}$	[J/kg·K]	hmotnosť odparku z čistého odmasťovača
ρ_i	[kg/ m ³]	objem vzorku použitého odmasťovača
Δt_i	[°C]	teplotný rozdiel medzi výstupnou a vstupnou teplotou chladiacej vody v <i>i</i> -tej sekcii
$t_{\text{OUT},i}$	[°C]	výstupná teplota chladiacej vody z <i>i</i> -tej sekcie
t_{IN}	[°C]	vstupná teplota chladiacej vody
A_i	[m ²]	plocha <i>i</i> -tej sekcie
L_i	[m]	dĺžka <i>i</i> -tej sekcie
$\sigma_{p/A/B^2}$		rozptyl pre produkt P alebo pre nezávislé premenné A a B
σ		smerodajná odchýlka premennej
V_i	[m ³ /h]	objemový prietok chladiacej vody
$\bar{k}a$	[m ⁻¹]	absorpčného koeficientu
L	[m]	charakteristická dĺžka domény
ε	[-]	celková emisivita
$a_{e,i}$	[-]	emisný váhový faktor pre <i>i</i> -ty šedý plyn
T_g	[K]	teplota plynu
k_i	[m ⁻¹]	absorpčný koeficient <i>i</i> -teho šedého plynu
P	[Pa]	suma parciálnych tlakov všetkých plynov v zmesi
γ_m	[-]	„uniformity index mass- weighted“
ϕ_i		je špecifikovaná premenná na ploche <i>i</i>
$\bar{\phi}_m$		je priemerný tok premennou plochou

Zoznam skratiek

CFD	Computational Fluid Dynamics
DO	Discrete-Ordinates Radiation Model
EDC	Eddy-dissipation concept
EDM	Eddy-dissipation model
FEA	Finite Element Analysis
FVM	Finite volume method
HHV	Higher heating value
LFL	Dolná medza zápalnosti
LHV	Lower heating value
MinO ₂	Najnižší percentuálny podiel spaľovacieho kyslíka v zmesi s oxidantom
MKP	Metóda konečných prvkov
OEAS	Oxygen enriched air staging
OEC	Oxygen enhanced combustion
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations - Consistent
UDF	User defined function
UFL	Horná medza zápalnosti
WSGGM	Weighted-Sum-of-Gray-Gases model
XSO	Percentuálny prebytok oxidačného činidla

Zoznam chemických prvkov a zlúčenín

CH ₄	metán
O ₂	kyslík
N ₂	dusík
CO ₂	oxid uhličitý
H ₂ O	voda
CO	oxid uhoľnatý
H ₂	vodík
C _x H _y	všeobecný vzorec pre uhľovodík
GO _x	kyslík v plynnom skupenstve
LO _x	kyslík v kvapalnom skupenstve
NO _x	emisie oxidu dusíku

Príloha A

Tabuľky nameraných hodnôt pre meranie tepelných tokov stenami spaľovacej komory

Senzor podľa PID	Jednotka	Popis	Senzor podľa PID	Jednotka	Popis
F52	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 1	T02	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe z 2. sekcie
F53	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 2	T03	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe z 3. sekcie
F54	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 3	T04	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe zo 4. sekcie
F55	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 4	T05	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe z 5. sekcie
F56	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 5	T06	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe zo 6. sekcie
F57	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 6	T07	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe zo 7. sekcie
F58	[m ³ /h]	Prietok chladiacej vody sekciou 7	T09	[°C]	Teplota spalín meraná termočlánkom TESTO
F60	[m ³ /h]	Prietok zemného plynu pri adiabatických podmienkach	T15	[°C]	Teplota spaľovacieho vzduchu
F60U	[m _N ³ /h]	Prietok zemného plynu pri normálových podmienkach (t = 0°C, p = 101,325 kPa)	T16	[°C]	Teplota chladiacej vody na vstupe
F61	[m ³ /h]	Prietok spaľovacieho vzduchu	Q91	[kW]	Výkon horáku
T01	[°C]	Teplota chladiacej vody na výstupe z 1. sekcie	Q92	[% ss]	Koncentrácia O ₂ v suchých spalinách

A 1 Zoznam senzorov na skúšobni horáku podľa PID diagramu.

ČAS	F52 [m ³ /h] Sekcia 1	F53 [m ³ /h] Sekcia 2	F54 [m ³ /h] Sekcia 3	F55 [m ³ /h] Sekcia 4	F56 [m ³ /h] Sekcia 5	F57 [m ³ /h] Sekcia 6	F58 [m ³ /h] Sekcia 7	F60U [mN ³ /h] Prietok plynu	F61 [mN ³ /h] Vzduch	T01 [°C] Sekcia 1	T02 [°C] Sekcia 2	T03 [°C] Sekcia 3	T04 [°C] Sekcia 4	T05 [°C] Sekcia 5	T06 [°C] Sekcia 6	T07 [°C] Sekcia 7
11:26:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,3	2,9	75,5	806,6	32,4	49,1	55,9	44,4	44,0	39,1	40,4
11:28:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,3	2,9	75,3	846,4	32,2	49,0	55,6	44,1	43,8	38,8	40,5
11:30:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,9	75,2	894,8	32,1	48,7	55,3	44,0	43,6	38,8	40,5
11:32:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,4	2,2	2,8	75,2	866,6	32,1	48,5	55,1	43,9	43,4	38,8	40,4
11:34:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,8	75,2	854,3	32,1	48,5	55,0	43,7	43,3	38,8	40,6
11:36:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,3	2,7	75,4	887,6	32,1	48,5	54,9	43,8	43,3	38,9	40,8
11:38:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,8	75,6	894,1	32,1	48,4	54,8	43,7	43,2	38,9	40,9
11:40:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,8	75,3	863,0	32,1	48,5	54,8	43,7	43,3	38,8	41,0
11:42:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,8	75,6	852,1	32,1	48,5	54,8	43,7	43,4	38,7	41,1
11:44:00	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,3	2,8	75,3	876,7	32,2	48,4	54,7	43,7	43,4	38,8	41,1
11:46:00	2,5	2,5	2,4	2,7	2,3	2,2	2,7	75,5	863,0	32,2	48,5	54,7	43,8	43,4	38,8	41,2
11:48:00	2,5	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,7	75,3	855,8	32,2	48,5	54,6	43,7	43,4	38,8	41,2
11:50:00	2,5	2,5	2,3	2,8	2,3	2,2	2,7	75,7	836,2	32,3	48,5	54,7	43,6	43,5	39,0	41,2
11:52:00	2,5	2,4	2,3	2,7	2,3	2,2	2,8	75,2	894,8	32,6	48,9	55,1	44,1	43,9	39,3	41,3
11:54:00	2,5	2,4	2,4	2,7	2,3	2,2	2,7	75,5	885,4	32,9	49,3	55,5	44,6	44,3	39,6	41,4
11:56:00	2,5	2,4	2,3	2,8	2,3	2,2	2,7	75,5	870,2	33,2	49,5	55,5	44,7	44,4	39,8	41,5
11:58:00	2,5	2,4	2,4	2,7	2,3	2,2	2,7	75,3	876,7	33,4	49,8	55,6	44,8	44,5	39,8	41,5
12:00:00	2,5	2,5	2,3	2,8	2,3	2,2	2,7	75,6	844,9	33,6	49,8	55,8	44,9	44,6	40,0	41,6
Priemer	2,6	2,5	2,4	2,8	2,3	2,2	2,8	75,4	865,0	32,4	48,8	55,1	44,1	43,7	39,1	41,0

A 2 Tabuľka nameraných hodnôt pri prietoku kyslíka 0 mN³/h (1. časť).

T09 [°C] Spaliny	T15 [°C] Vzduch	T16 [°C] Voda vstup	Q92 [% ss] O ₂	Q91 [kW] Výkon	Odvedená tepla po sekcích							Výkon [kW/m ²] Suma- všetky sekcie	Účinnosť %
					[kW/m ²] Sekcia 1	[kW/m ²] Sekcia 2	[kW/m ²] Sekcia 3	[kW/m ²] Sekcia 4	[kW/m ²] Sekcia 5	[kW/m ²] Sekcia 6	[kW/m ²] Sekcia 7		
742,2	12,4	20,1	3,0	751,6	29,51	53,28	63,04	50,07	40,45	32,20	24,09	480,68	63,95
748,0	12,4	20,2	2,9	748,5	28,79	52,92	62,34	49,24	39,95	31,52	24,09	474,95	63,45
748,2	12,4	20,2	3,1	748,6	28,55	52,37	61,81	49,04	39,61	30,15	24,09	469,96	62,78
739,3	12,4	20,2	3,0	748,3	28,55	52,00	61,46	48,84	40,98	30,15	23,14	468,00	62,54
751,0	12,6	20,2	3,0	748,4	28,55	52,00	61,29	48,43	39,11	30,15	23,37	464,78	62,10
743,5	12,6	20,2	3,0	751,5	28,55	52,00	61,12	48,63	39,11	31,69	22,76	465,51	61,94
747,0	12,6	20,3	3,1	751,9	28,31	51,64	60,76	48,22	38,77	30,15	23,60	462,86	61,56
747,0	12,6	20,3	3,0	749,1	28,31	51,82	60,76	48,22	38,93	29,99	23,71	463,48	61,87
753,4	12,7	20,3	3,3	751,8	28,31	51,82	60,76	48,22	39,10	29,83	23,83	463,81	61,69
742,2	12,7	20,3	3,0	747,7	28,55	51,64	60,59	48,22	39,10	31,35	23,83	465,94	62,32
746,7	12,8	20,3	3,4	751,1	27,45	51,82	60,59	46,69	39,10	29,99	23,09	458,22	61,01
742,7	12,8	20,3	3,0	748,4	27,45	51,82	60,41	48,22	39,10	29,99	23,09	460,34	61,51
743,5	12,9	20,3	3,0	752,7	27,68	51,82	58,06	48,01	39,27	30,31	23,09	457,39	60,77
741,8	13,1	20,3	3,1	747,8	28,37	50,45	58,73	47,29	39,94	30,80	24,06	460,56	61,59
748,4	13,2	20,4	3,0	751,3	28,83	50,97	61,81	48,07	40,45	31,12	23,20	466,89	62,14
751,9	13,3	20,4	3,0	751,3	29,52	51,32	59,23	50,06	40,62	31,44	23,30	468,46	62,35
747,4	13,3	20,4	3,0	749,7	29,98	51,85	61,98	48,47	40,78	31,44	23,30	471,95	62,95
748,0	13,4	20,5	3,0	752,6	30,20	53,82	59,56	50,26	40,78	31,60	23,30	474,60	63,06
746,2	12,8	20,3	3,1	750,1	28,64	51,96	60,80	48,57	39,73	30,77	23,50	466,58	62,20

A 2 Tabuľka nameraných hodnôt pri prietoku kyslíka 0 mN³/h (2. časť).

ČAS	F52	F53	F54	F55	F56	F57	F58	F60U	F61	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07
	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Sekcia 1	Sekcia 2	Sekcia 3	Sekcia 4	Sekcia 5	Sekcia 6	Sekcia 7	Prietok plynu	Vzduch	Sekcia 1	Sekcia 2	Sekcia 3	Sekcia 4	Sekcia 5	Sekcia 6	Sekcia 7
08:24:00	3,0	3,0	3,0	3,3	3,1	2,9	3,2	75,5	648,9	26,2	40,2	45,8	38,2	34,5	30,8	33,4
08:26:00	2,9	3,0	3,0	3,3	3,1	2,9	3,2	75,4	667,7	26,1	40,2	45,5	38,0	34,4	30,8	33,3
08:28:00	2,9	3,0	3,0	3,3	3,1	2,8	3,2	75,6	673,5	26,1	40,1	45,6	37,7	34,2	30,6	33,0
08:30:00	2,9	3,0	2,9	3,2	3,1	2,8	3,2	75,6	680,0	26,0	40,0	45,5	37,6	34,1	30,7	32,9
08:32:00	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,1	75,5	668,4	26,0	40,0	45,5	37,6	34,0	30,8	32,8
08:34:00	2,9	3,1	3,0	3,3	3,1	2,8	3,2	75,4	703,1	25,9	40,0	45,4	37,5	34,0	30,6	32,7
08:36:00	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,2	75,3	680,0	26,0	39,9	45,4	37,3	33,8	30,7	32,5
08:38:00	3,0	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,2	75,3	687,2	25,8	39,8	45,4	37,4	33,6	30,4	32,4
08:40:00	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,2	75,4	691,6	25,7	39,8	45,4	37,2	33,7	30,6	32,5
08:42:00	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,2	75,2	685,0	25,7	39,9	45,4	37,3	33,8	30,6	32,4
08:44:00	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,7	3,2	75,5	693,7	25,9	39,9	45,5	37,3	33,9	30,5	32,4
08:46:00	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,2	75,5	825,4	25,9	39,9	45,4	37,2	34,1	30,5	32,3
Priemer	2,9	3,0	2,9	3,3	3,1	2,8	3,2	75,4	692,0	25,9	40,0	45,5	37,5	34,0	30,6	32,7

A 3 Tabuľka nameraných hodnôt pri prietoku kyslíka 20 m³/h (1. časť).

T09 [°C]	T15 [°C]	T16 [°C]	Q92 [% ss]	Q91 [kW]	Odvedená tepla po sekcích							Výkon [kW/m ²]	Účinnosť %
					[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]		
Spaliny	Vzduch	Voda vstup	O ₂	Výkon	Sekcia 1	Sekcia 2	Sekcia 3	Sekcia 4	Sekcia 5	Sekcia 6	Sekcia 7		
675,4	-2,1	15,1	3,1	751,0	30,82	55,54	67,83	56,26	44,43	33,67	24,04	511,53	68,11
679,9	-2,0	14,9	3,2	749,7	30,06	55,99	67,62	56,26	44,66	34,10	24,17	512,37	68,34
685,7	-2,0	14,9	3,0	751,9	30,06	55,77	67,84	55,54	44,20	32,51	23,78	506,91	67,42
683,7	-1,9	14,8	3,0	752,0	30,06	55,77	65,58	53,86	44,20	32,92	23,78	501,39	66,67
685,2	-2,0	14,7	2,9	750,8	30,33	55,99	65,80	55,78	44,21	33,34	23,04	504,00	67,13
687,8	-1,9	14,6	3,0	749,9	30,33	58,09	68,07	55,79	44,44	33,13	23,78	513,01	68,41
685,5	-1,9	14,6	3,1	749,2	30,60	56,00	65,80	55,30	43,98	33,34	23,52	504,60	67,35
686,7	-1,9	14,5	3,0	749,5	31,38	56,00	66,02	55,79	43,76	32,93	23,52	505,70	67,47
683,5	-1,9	14,5	3,1	749,3	30,07	56,00	66,02	55,31	43,98	33,34	23,65	504,66	67,35
685,9	-1,9	14,5	3,1	747,3	30,07	56,22	66,02	55,55	44,21	33,34	23,52	505,38	67,63
684,0	-1,8	14,6	3,0	751,1	30,33	56,00	66,01	55,30	44,21	31,75	23,39	502,09	66,85
697,8	-1,7	14,6	3,4	750,5	30,33	56,00	65,80	55,06	44,67	32,93	23,26	503,57	67,10
685,1	-1,9	14,7	3,1	750,2	30,37	56,11	66,53	55,48	44,25	33,11	23,62	506,27	67,49

A 3 Tabuľka nameraných hodnôt pri prietoku kyslíka 20 mN³/h (2. časť).

ČAS	F52	F53	F54	F55	F56	F57	F58	F60U	F61	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07
	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
	Sekcia 1	Sekcia 2	Sekcia 3	Sekcia 4	Sekcia 5	Sekcia 6	Sekcia 7	Prietok plynu	Vzduch	Sekcia 1	Sekcia 2	Sekcia 3	Sekcia 4	Sekcia 5	Sekcia 6	Sekcia 7
12:30:00	2,7	2,7	2,6	3,1	2,9	2,2	3,0	75,4	373,3	32,3	51,9	59,2	42,6	36,7	34,4	34,1
12:32:00	2,7	2,6	2,6	3,1	2,9	2,2	3,0	75,7	374,7	32,7	52,2	59,3	42,9	36,8	34,5	34,2
12:34:00	2,8	2,6	2,6	3,1	2,9	2,2	3,1	75,5	403,6	32,8	52,7	59,3	43,0	37,0	34,8	34,3
12:36:00	2,8	2,6	2,6	3,2	2,9	2,2	3,1	75,3	386,3	32,9	52,9	59,2	43,0	37,1	34,8	34,3
12:38:00	2,8	2,6	2,6	3,2	2,9	2,3	3,0	75,1	409,4	32,9	53,1	59,3	43,0	37,0	34,8	34,4
12:40:00	2,8	2,6	2,6	3,2	2,8	2,2	3,0	75,5	402,2	33,1	53,3	59,4	43,1	37,3	34,9	34,4
12:42:00	2,8	2,6	2,6	3,1	2,9	2,3	3,0	75,5	436,2	33,2	53,5	59,6	43,2	37,2	35,1	34,5
12:44:00	2,7	2,6	2,6	3,1	2,9	2,2	3,0	75,1	419,6	33,3	53,9	59,7	43,3	37,0	35,1	34,6
12:46:00	2,8	2,6	2,5	3,2	2,9	2,2	3,0	75,2	364,6	33,5	54,0	60,0	43,4	37,2	35,2	34,6
12:48:00	2,8	2,6	2,5	3,2	2,9	2,2	3,0	74,9	403,6	33,5	54,0	60,4	43,4	37,1	35,4	34,8
12:50:00	2,8	2,6	2,5	3,2	2,9	2,2	3,0	75,2	394,2	33,5	54,0	60,7	43,4	37,2	35,4	34,7
Priemer	2,8	2,6	2,6	3,2	2,9	2,2	3,0	75,3	397,1	33,1	53,2	59,6	43,1	37,1	34,9	34,4

A 4 Tabuľka nameraných hodnôt pri prietoku kyslíka 80 m³/h (1. časť).

T09 [°C]	T15 [°C]	T16 [°C]	Q92 [% ss]	Q91 [kW]	Odvedená tepla po sekcích							Výkon [kW/m ²]	Účinnosť %
					[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]		
Spaliny	Vzduch	Voda vstup	O ₂	Výkon	Sekcia 1	Sekcia 2	Sekcia 3	Sekcia 4	Sekcia 5	Sekcia 6	Sekcia 7		
686,3	8,2	15,6	3,0	750,4	41,65	72,06	83,20	61,69	45,17	30,55	22,78	576,47	76,82
682,0	8,7	15,7	2,8	751,6	42,40	69,77	83,19	62,14	45,17	30,55	22,77	574,49	76,44
686,9	8,9	15,7	2,8	748,1	44,22	70,72	83,19	62,37	45,59	31,03	23,66	582,56	77,87
681,8	9,1	15,7	3,1	748,1	44,48	71,10	83,00	64,38	45,81	31,03	23,66	586,68	78,42
684,6	9,4	15,8	2,9	747,0	44,22	71,28	83,00	64,14	45,38	32,27	22,90	585,38	78,36
682,0	9,5	16,0	3,0	750,2	44,22	71,27	82,80	63,90	44,01	30,70	22,65	579,37	77,23
681,2	9,6	16,1	3,0	750,2	44,21	71,46	82,99	61,90	45,16	32,27	22,65	581,05	77,45
682,2	9,6	16,2	3,1	747,3	42,63	72,02	82,98	61,90	44,52	30,70	22,65	576,47	77,14
682,0	9,7	16,2	3,1	747,9	44,73	72,21	80,34	64,13	44,94	30,86	22,65	579,67	77,51
684,2	9,7	16,1	3,0	745,8	44,99	72,41	81,25	64,37	44,94	31,35	23,02	583,91	78,29
679,5	9,8	16,0	3,1	748,0	45,25	72,60	81,98	64,60	45,37	31,51	23,02	586,99	78,47
683,0	9,3	15,9	3,0	748,6	43,91	71,54	82,54	63,23	45,10	31,17	22,94	581,18	77,64

A 4 Tabuľka nameraných hodnôt pri prietoku kyslíka 80 mN³/h (2. časť).

Príloha B

Meracie listy s dátami

Číslo merania	45
Dátum merania	7.3.2013
Čas merania	11:25

Poznámky: čas merania 11:25 - 12:00

stage-2 stupňový prívod paliva
clona 5,5 mm

trysky: radiál 50 mm, natočenie 20°

Nastavenie :

Výkon horáku [kW]	Prietok O2	Tlak O2 [bar]
750	0,00	0,00

číslo odberu	Meraná veličina	Zemný plyn						Spaľovací vzduch			Kyslík	Spaliny								Spaliny	Spaľovací vzduch		
		Prietok ZP na plynomery	Prietok na plynomery	Teplota ZP	Výkon horáku	Tlak ZP v rozvode	Tlak ZP na horáku	Prietok vzduchu	Pretlak na ventilátore	Teplota vzduchu		Teplota spalín	Podtlak spalínovod	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂		Objem spalín	Dopočítaný prietok	Dopočítaná koncentrácia O ₂
		m ³ /h	m ³ /h	°C	kW	kPa	kPa	m ³ /h	Pa	°C		°C	Pa	%	ppm	ppm	ppm	mg/m ³	%		m ³ /h	m ³ /h	%
Jednotka	PID	F60	F60U	T12	Q91	P35	P39	F61	P48	T15	-	T09	P47	Q92	Q93	Q94	Q95	-	-	-	-		
1	40,6	75,7	15,1	751	198,9	38,7	880	-4	12,4	0,0	742	-75	3,03	1	44	2	88	10,2	943,74	868,04	20,75		
čas	11:25																						
2	40,4	75,3	15,1	750	199,1	38,5	844	0	12,5	0,0	742	-90	2,82	3	41	2	91	10,2 ₂	927,75	852,45	20,75		
čas	11:27																						
3	40,5	75,5	15,2	752	199,1	38,6	894	-8	12,6	0,0	742	-65	3,07	1	42	2	93	10,2 ₁	943,38	867,88	20,75		
čas	11:29																						
Priemer	40,5	75,5	15,1	751,0	199,0	38,6	872,7	-4,0	12,5	0,0	742,0	-76,7	3,0	1,7	42,3	2,0	90,7	10,2	938,3	862,8	20,7		

B 1 Tabuľka nameraných prietokov jednotlivých médií a ich fyzikálne vlastnosti pri prietoku kyslíka 0 m_N³/h.

Číslo merania	90
Dátum merania	28.11.2013
Čas merania	8:25

Poznámky: čas merania 8:25 - 8:45

stage-2 stupňový prívod paliva
clona 5,5 mm

trysky: radiál 50 mm, natočenie 20°

Nastavenie :

Výkon horáku [kW]	Prietok O2	Tlak O2 [bar]
750	20,00	6,00

Meraná veličina	Zemný plyn						Spaľovací vzduch			Kyslík	Spaliny							Spaliny	Spaľovací vzduch			
	Prietok ZP na plynometry	Prietok na plynometry	Teplota ZP	Výkon horáku	Tlak ZP v rozvode	Tlak ZP na horáku	Prietok vzduchu	Pretlak na ventilátore	Teplota vzduchu	Prietok	Teplota spalín	Podtlak spalínovod	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	Objem spalín	Dopočítaný prietok	Dopočítaná koncentrácia O ₂	
	Jednotka	m ³ /h	m ³ /h	°C	kW	kPa	kPa	m ³ /h	Pa	°C	m ³ /h	°C	Pa	%	ppm	ppm	ppm	mg/m ³	%	m ³ /h	m ³ /h	%
číslo odberu	1	39,7	75,4	8,0	746	198,2	36,4	690	-1	-2,0	20	680	-100	3,09	0	81	0,8	168	10,1			
čas	8:25																					
číslo odberu	2	39,7	75,6	9,3	752	199,0	36,7	670	-3	-1,9	20	682	-90	2,93	0	79	0,8	165	10,25			
čas	8:30																					
číslo odberu	3	39,7	75,4	8,6	749	198,5	36,5	645	3	-1,9	20	686	-90	3,08	0	80	0,8	169	10,16			
čas	8:35																					
Priemer		39,7	75,5	8,6	749	198,6	36,53	668	0	-1,9	20	683	93	3,03	0	80	0,8	167	10,16			

B 2 Tabuľka nameraných prietokov jednotlivých médií a ich fyzikálne vlastnosti pri prietoku kyslíka 20 m³/h.

Číslo merania	49
Dátum merania	11.3.2013
Čas merania	12:30

Poznámky: čas merania 12:30 - 12:50

stage-2 stupňový prívod paliva
clona 5,5 mm

trysky: radiál 50 mm, natočenie 20°

Nastavenie :

Výkon horáku [kW]	Prietok O2	Tlak O2 [bar]
750	80,00	5,00

Meraná veličina	Zemný plyn						Spaľovací vzduch			Kyslík	Spaliny							Spaliny	Spaľovací vzduch			
	Prietok ZP na plynomery	Prietok na plynomery	Teplota ZP	Výkon horáku	Tlak ZP v rozvode	Tlak ZP na horáku	Prietok vzduchu	Pretlak na ventilátore	Teplota vzduchu	Prietok	Teplota spalín	Podtlak spalínovod	O ₂	CO	NO	NO ₂	NO _x	CO ₂	Objem spalín	Dopočítaný prietok	Dopočítaná koncentrácia O ₂	
	Jednotka	m ³ /h	m ³ /h	°C	kW	kPa	kPa	m ³ /h	Pa	°C	m ³ /h	°C	Pa	%	ppm	ppm	ppm	mg/m ³	%	m ³ /h	m ³ /h	%
číslo odberu	1	40,4	75,3	13,6	749	198,7	39,6	400	400	8,9	80,0	683	-70	3,00	3	721	15	1472	10,17	582,11	426,81	33,26
čas	12:34																					
číslo odberu	2	40,4	75,4	13,7	750	198,6	39,8	380	400	9,4	80,0	682	-70	3,17	1	704	15	1482	10,12	589,00	433,60	33,09
čas	12:40																					
číslo odberu	3	40,2	75,1	13,7	748	198,7	39,7	400	400	9,6	80,0	676	-70	3,06	3	721	14	1509	10,1	581,59	426,49	33,26
čas	12:45																					
Priemer		40,3	75,3	13,7	749,0	198,7	39,7	393,3	400,0	9,3	80,0	680,3	-70,0	3,1	2,3	715,3	14,7	1487,7	10,1	584,2	429,0	33,2

B 3 Tabuľka nameraných prietokov jednotlivých médií a ich fyzikálne vlastnosti pri prietoku kyslíka 80 m³/h.

```

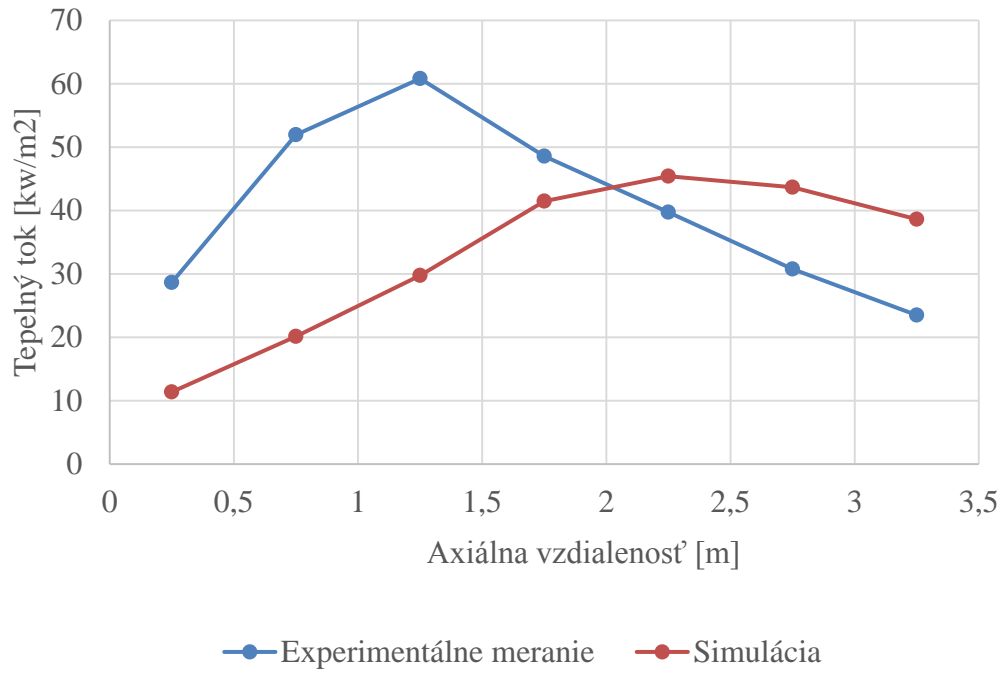
/file/set-batch-options y y n
/file/read-c ./OEC_AE0.cas.gz
/file/read-d ./OEC_AE0.dat.gz
y
/solve/set/equations/flow y
/solve/set/equations/ke n
/solve/set/equations/species-0 n
/solve/set/equations/species-1 n
/solve/set/equations/species-2 n
/solve/set/equations/species-3 n
/solve/set/equations/species-4 n
/solve/set/equations/temperature n
/solve/set/equations/disco n
/it 500
y
y
y
y
y
y
y
y
wd ./OEC_AE-%i.dat.gz
/solve/set/equations/ke y
/it 300
wd ./OEC_AE-%i.dat.gz
/solve/set/equations/species-0 y
/solve/set/equations/species-1 y
/solve/set/equations/species-2 y
/solve/set/equations/species-3 y
/solve/set/equations/species-4 y
/it 500
wd ./OEC_AE-%i.dat.gz
/solve/set/equations/temperature y
/it 500
wd ./OEC_AE-%i.dat.gz
/solve/set/equations/disco y
/it 1000
wd ./OEC_AE-%i.dat.gz
exit
yes

```

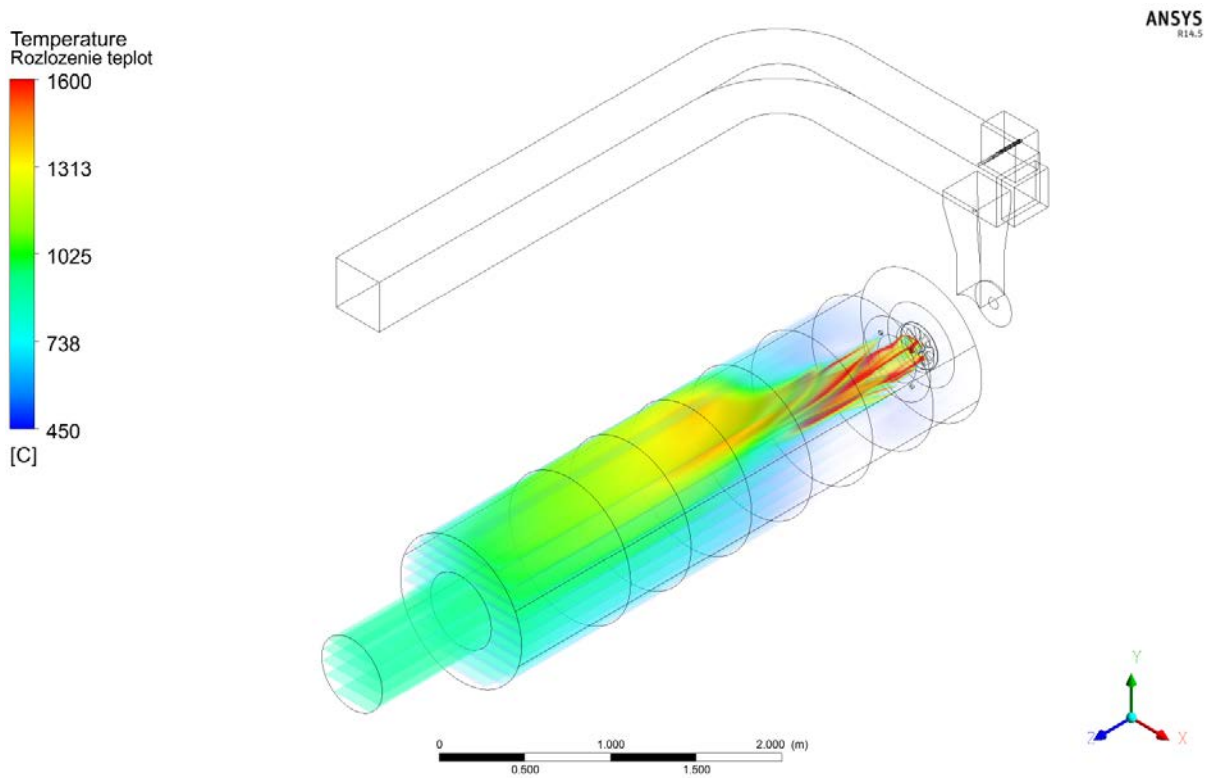
B 4 Journal file pre steady mód spaľovania bez obohacovania kyslíkom.

Príloha C

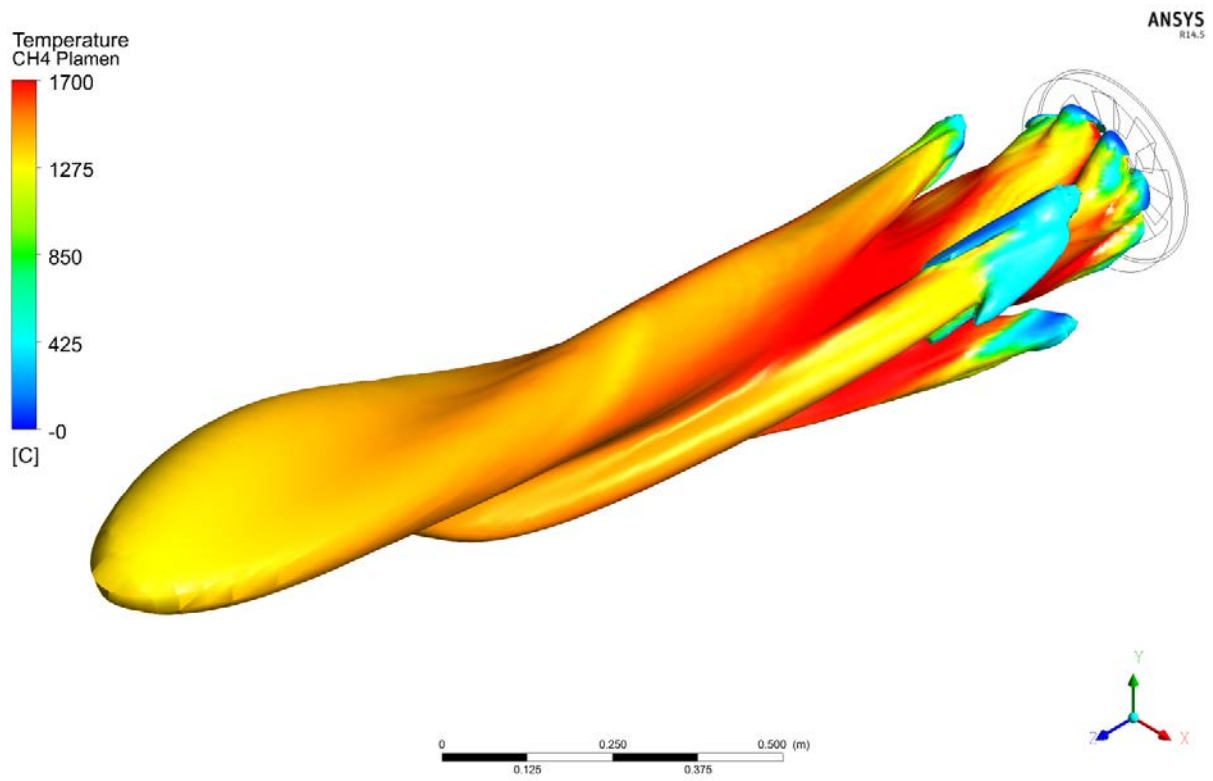
Matematické modelovanie založené na metódach CFD pre spaľovanie s prietokom kyslíka
0 mN³/h.



C 1 Graf hodnôt tepelných tokov z experimentálnych meraní a zo simulácie pre prietok kyslíka 0 mN³/h.



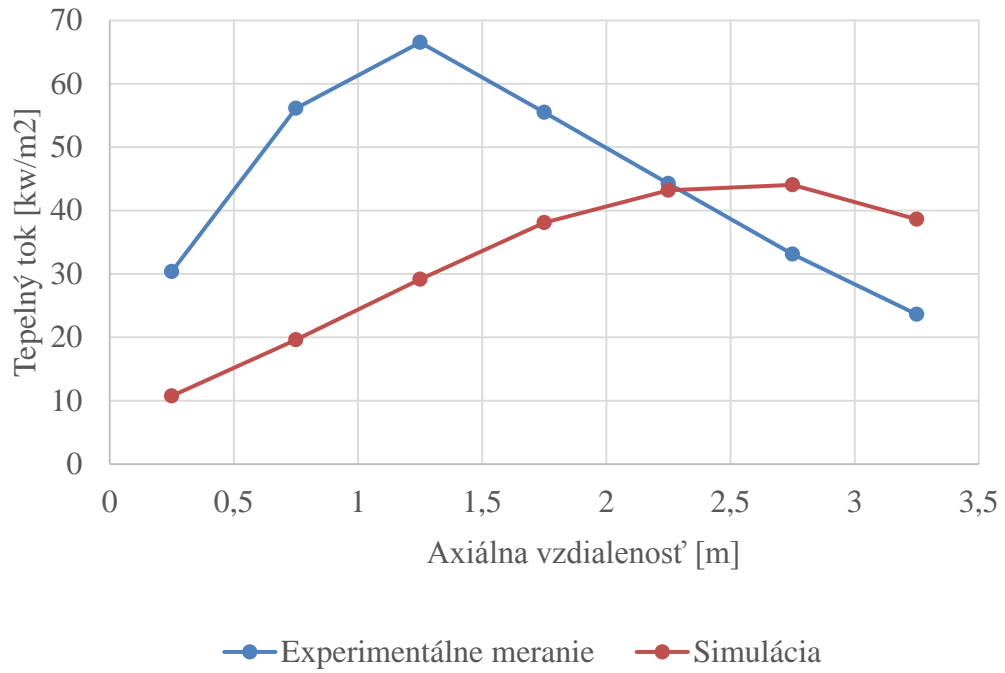
C 2 Rozloženie teplôt v spaľovacej komore pre prietok kyslíka 0 mN³/h.



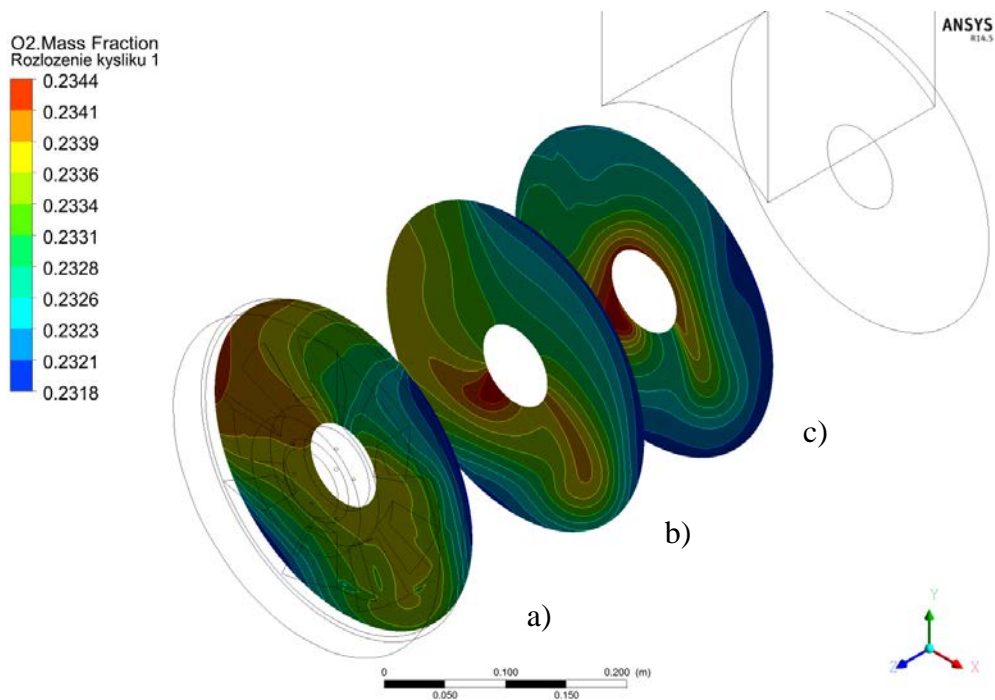
C 3 Isoplocha metánu ($w_{CH_4} = 0,007$) ofarbená teplotou pre prietok kyslíka $0 \text{ mN}^3/\text{h}$.

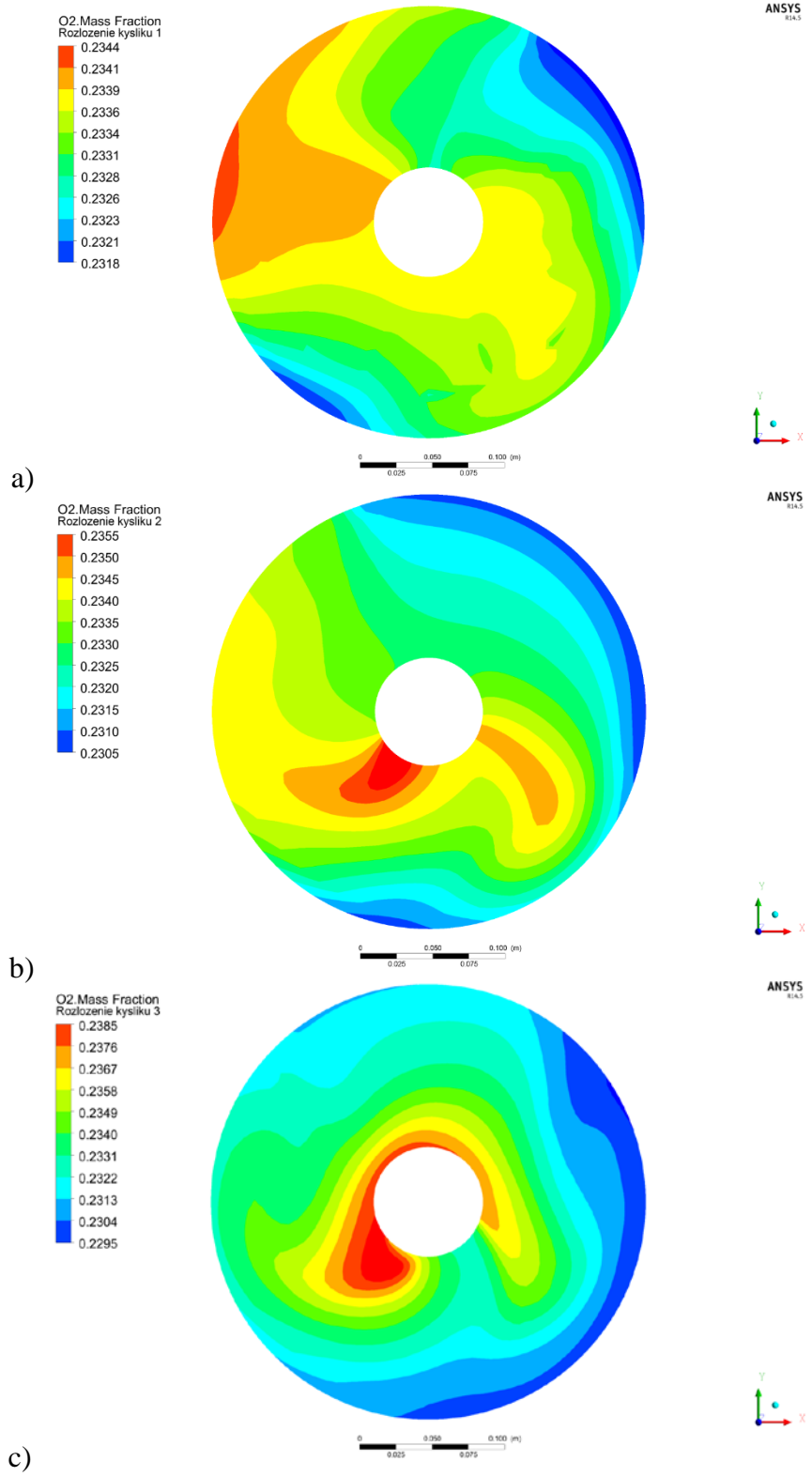
Príloha D

Matematické modelovanie založené na metódach CFD pre spaľovanie s prietokom kyslíka
20 mN³/h.

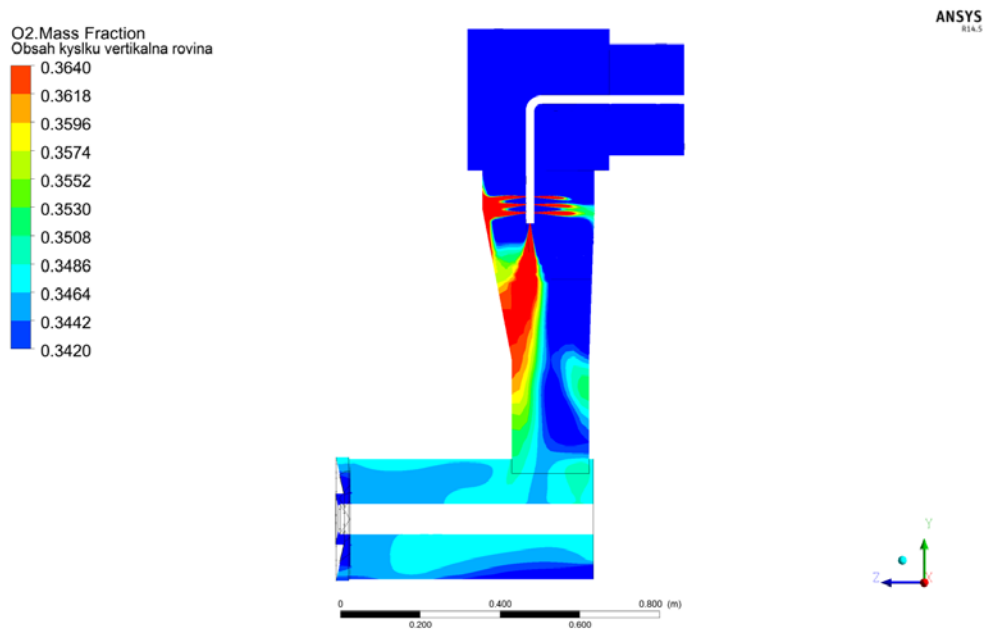


D 1 Graf hodnôt tepelných tokov z experimentálnych meraní a zo simulácie pre prietok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$.

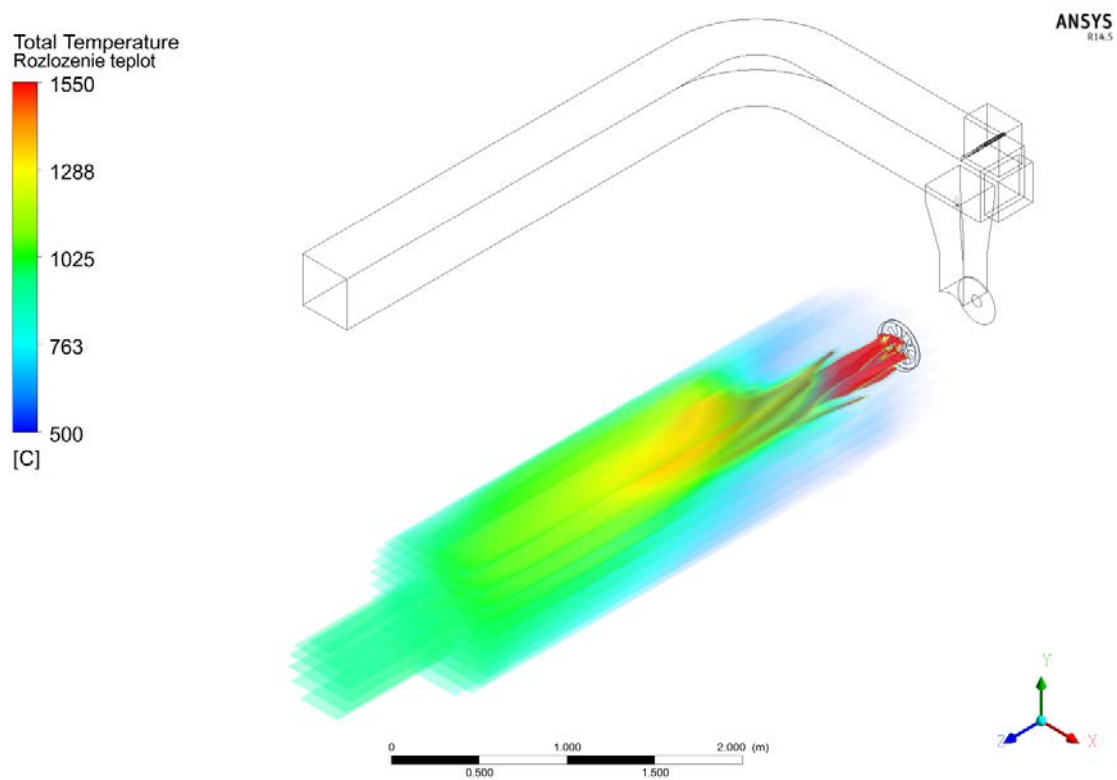




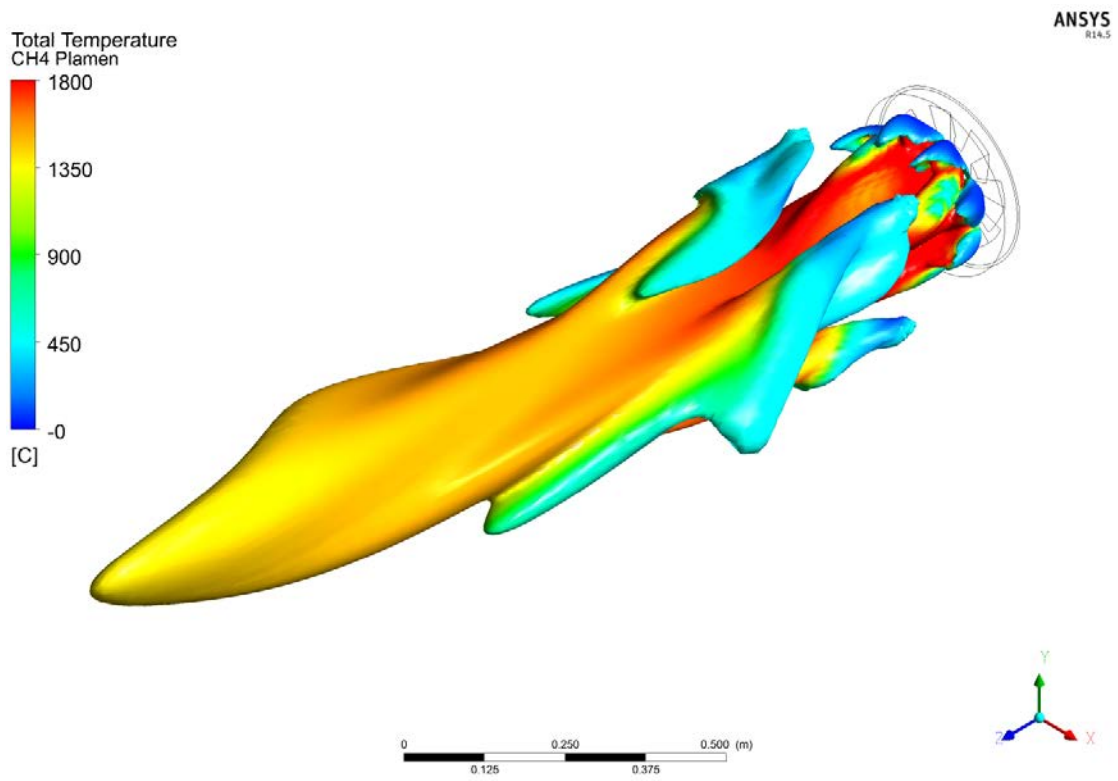
D 2 Obsah kyslíka na priereze pred víričom pričom a) pozícia na hrane víriču, b) pozícia 20 cm pred víričom c) pozícia 35 cm pred víričom.



D 3 Rozloženie kyslíka vo vertikálnom reze osou prívodného potrubia spaľovacieho vzduchu pre prítok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.



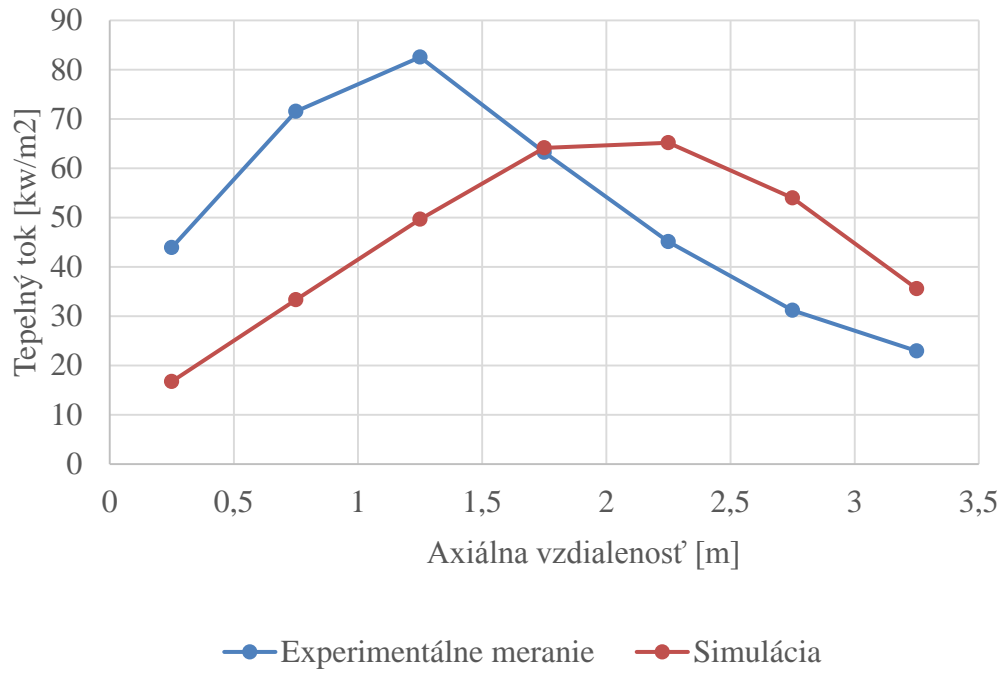
D 4 Rozloženie teplôt v spaľovacej komore pre prítok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$.



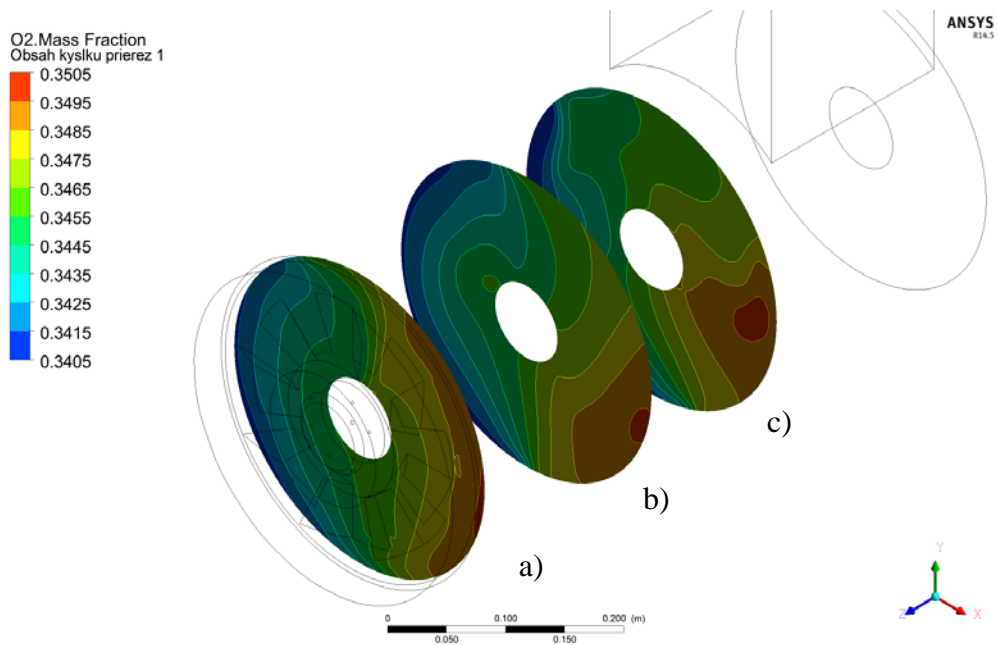
D 5 Isoplocha metánu ($w_{CH_4} = 0,011$) ofarbená teplotou pre prietok kyslíka $20 \text{ mN}^3/\text{h}$.

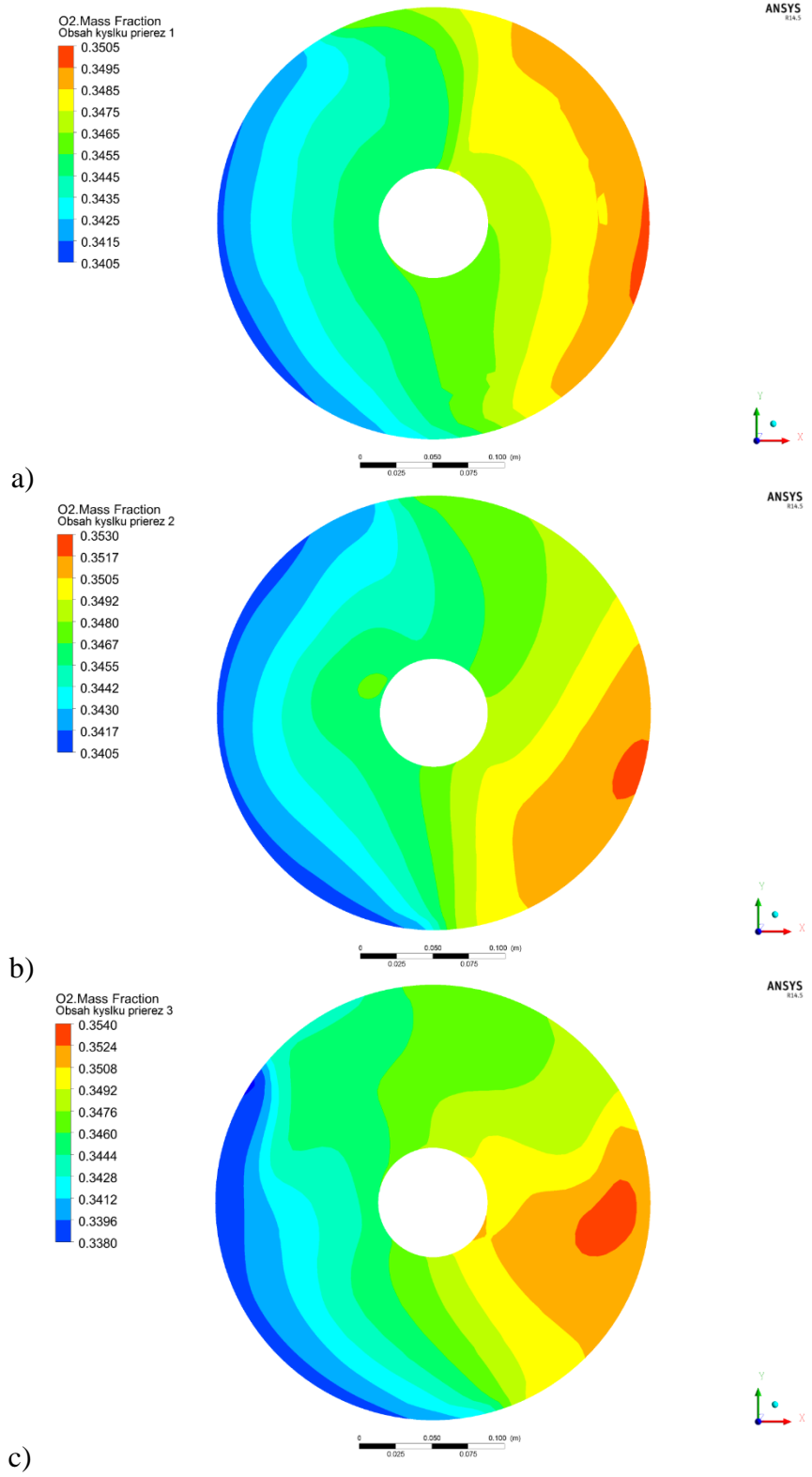
Príloha E

Matematické modelovanie založené na metódach CFD pre spaľovanie s prietokom kyslíka
80 mN³/h.

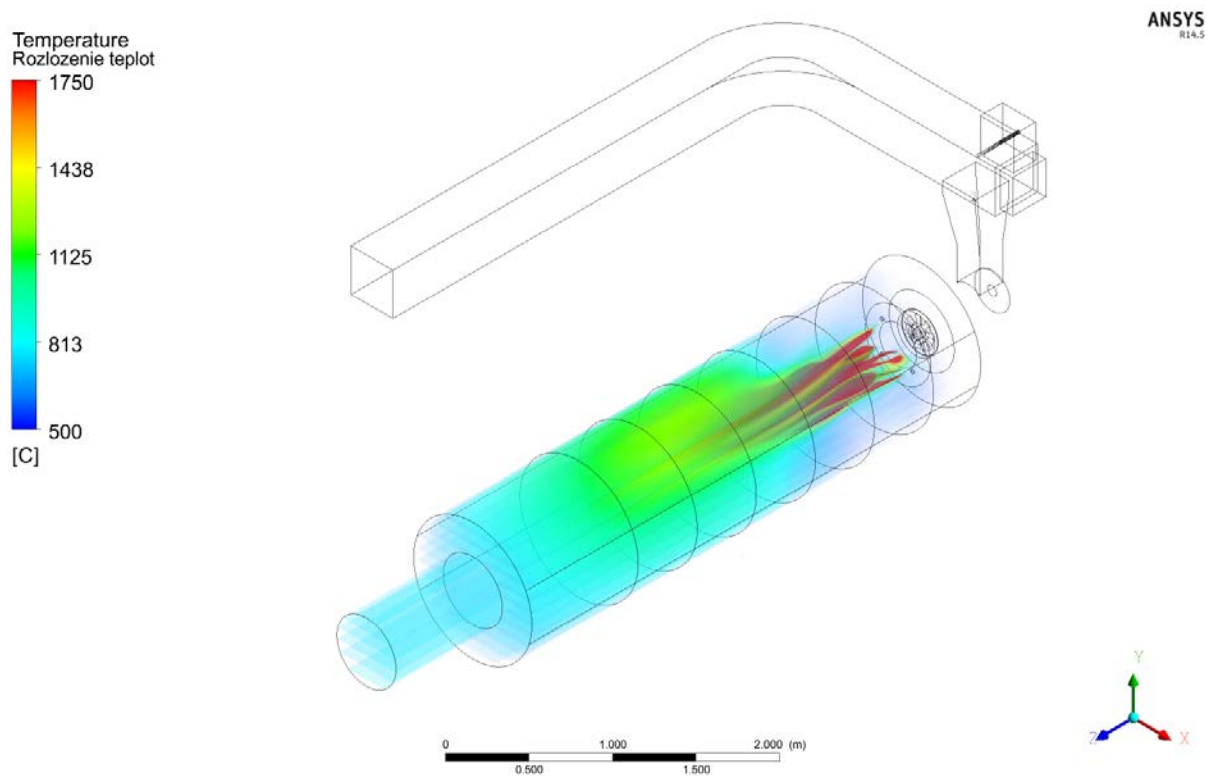


E 1 Graf hodnôt tepelných tokov z experimentálnych meraní a zo simulácie pre prietok kyslíka 80 mN³/h.

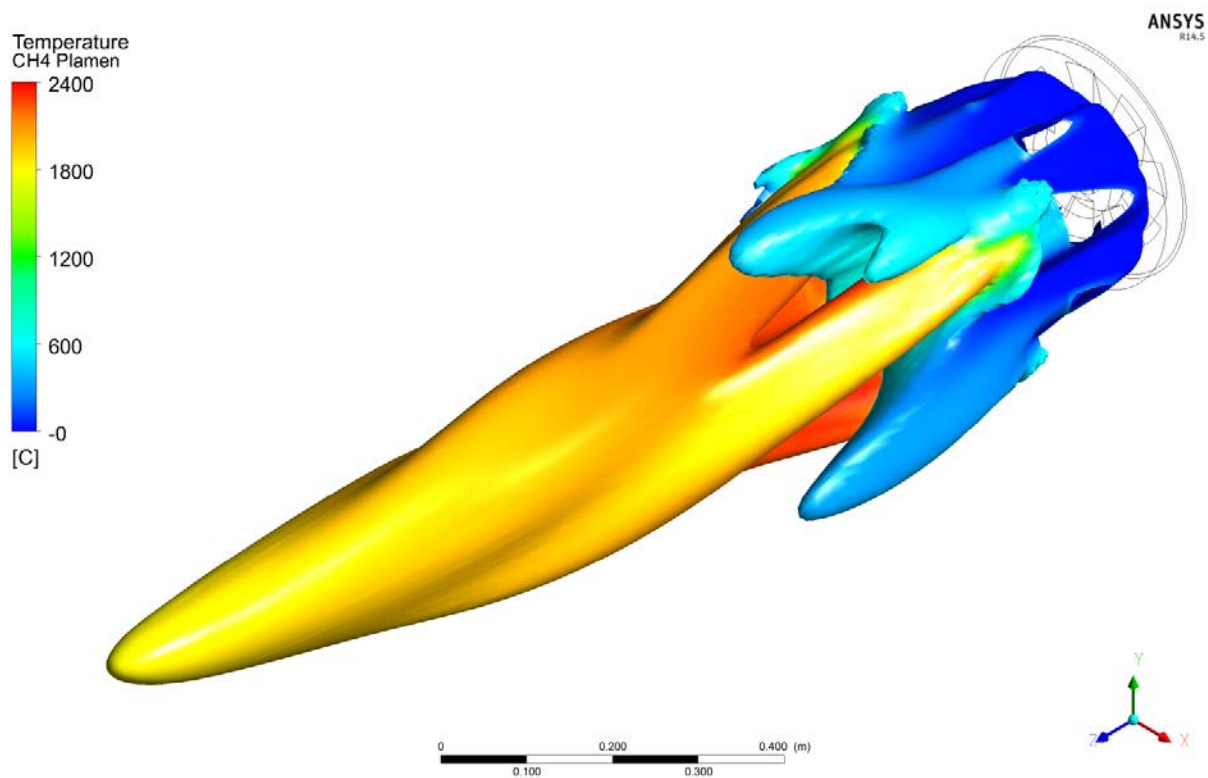




E 2 Obsah kyslíka na priereze pred víričom pričom a) pozícia na hrane víriču, b) pozícia 20 cm pred víričom c) pozícia 35 cm pred víričom.



E 3 Rozloženie teplôt v spaľovacej komore pre prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.



E 4 Isoplocha metánu ($w_{\text{CH}_4} = 0,017$) ofarbená teplotou pre prietok kyslíka $80 \text{ mN}^3/\text{h}$.