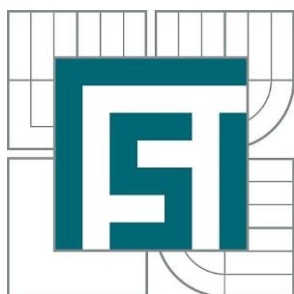


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV PROCESNÍHO A
EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

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

CHARACTERISTIC PARAMETERS OF OXYGEN-ENHANCED COMBUSTION PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ DŘÍMAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR BĚLOHRADSKÝ, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Dřímál

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:

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

v anglickém jazyce:

Characteristic parameters 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 a hlavní zásady bezpečné manipulace s kyslíkem. V rámci přípravy na praktickou část práce bude zapotřebí uvést základní vztahy pro výpočet výkonu hořáku, teoretické a skutečné spotřeby spalovacího vzduchu, teoretické a adiabatické teploty spalování atd. V posledním kroku, který představuje praktickou část práce, bude úkolem studenta provést zkoušky spalování s obohaceným vzduchem, při kterých budou měřeny veličinami průtok paliva, vzduchu a kyslíku, teplota spalin, koncentrace oxidů dusíku, tepelný tok do stěny spalovací komory a rozložení teplot ve spalovací komoře. Na závěr práce bude provedena finanční rozvaha nad použitím OEC ve vztahu k jednotlivým jednotkám spalovacího zařízení, cenám energií (paliva) a ceně čistého kyslíku.

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. Provedení zkoušek spalování.
6. Vyhodnocení zkoušek spalování.
7. Finanční rozvaha nad použitím OEC.

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 25.11.2013

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ANOTACE

Hlavní náplní této diplomové práce je experimentální vyšetření charakteristických parametrů spalování zemního plynu při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %. Jedná se o tzv. kyslíkem obohacené spalování (OEC). Technologie OEC má uplatnění v průmyslových aplikacích, ve kterých se požaduje vyšší tepelná účinnost, zvýšená produktivita, zlepšení charakteru plamene, snížení nákladů, menší objem spalin, či zlepšení kvality výsledného produktu. Přestože tato metoda obnáší řadu výhod, je vhodné zmínit i některé její nevýhody, např. poškození vyzdívky spalovací komory, nejednotné ohřívání, zvýšené emise znečišťujících látek, či zášleh nebo narušení plamene.

Zkoušky spalování s obohaceným vzduchem proběhly na zkušebně hořáků, kde je možné testovat hořáky na plyná, kapalná paliva, ale i hořáky uzpůsobené pro kombinované spalování. V rámci zkoušek byl použit plynový „low-NO_x“ hořák se stupňovitým přívodem paliva. Sledované parametry zahrnovaly vliv obsahu kyslíku ve spalovacím vzduchu na emise oxidů dusíku (NO_x), tepelný tok do stěn spalovací komory, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory a také tvar a rozměry plamene. Zkoušky byly provedeny při výkonu 750 kW a přebytku spalovacího vzduchu 1,1 při jednostupňovém i dvoustupňovém přívodu paliva.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kyslíkem obohacené spalování, air-enrichment, air-oxy/fuel, O₂-lancing, emise NO_x, tepelný tok, teplota ve spalovací komoře.

ANNOTATION

The thesis is focused on the experimental investigation of the oxygen enhanced combustion technology (OEC), which uses the combustion air with higher concentration of oxygen, i.e. more than 21 %. The OEC technology is used in those industrial applications, which requires higher thermal efficiency, increased productivity, improved character of the flame, reduced equipment cost, lower volume of exhaust gases and improved product quality. Although this technology involves a number of advantages, it is appropriate to mention some of its disadvantages such as refractory damage, inconsistent heating, increased pollutant emission or flame disturbance and/or flashback.

The combustion tests of OEC were carried out at the burners testing facility that enables to test many types of burners (gaseous, liquid, or combined). The two-staged low-NO_x burner fired by natural gas was used during the tests. The observed parameters include the effect of oxygen concentration in the combustion air on the NO_x emissions, heat flux into the wall of the combustion chamber, in-flame temperature distribution in the horizontal symmetry plane of the combustion chamber and also the shape and dimensions of the flame. The combustion tests of the air-enrichment, air-oxy/fuel and O₂ lancing OEC methods were carried out at the burner thermal input of 750 kW and air excess of 1,1 for two combustion regimes, namely one-staged and two-staged fuel supply.

KEY WORDS

Oxygen enhanced combustion, air-enrichment, air-oxy/fuel, O₂-lancing, NO_x emission, heat flux, combustion chamber temperature.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DŘÍMAL, J. *Parametry procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Parametry procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu, jenž je součástí této práce.

V Brně dne.....

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Bělohradskému, Ph.D. za jeho odpornou pomoc a připomínky během vypracování práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za jejich trpělivost a hlavně psychickou podporu během celého studia.

Obsah

Seznam symbolů	12
Seznam zkratek	13
Seznam chemických prvků a sloučenin.....	13
1. Úvod	14
1.1. Cíle práce.....	15
2. Proces spalování.....	16
2.1. Kyslík ve spalovacím vzduchu.....	17
2.2. Zemní plyn	17
2.3. Oxidy dusíku	18
2.3.1. Termické NO _x	19
2.3.2. Promptní NO _x	20
2.3.3. Palivové NO _x	20
2.3.4. Převod mezi ppm a mg/m ³	20
2.4. Přenos tepla.....	21
2.4.5. Radiace	21
2.4.6. Konvekce.....	22
2.4.7. Kondukce	22
2.5. Teplota plamene	23
2.5.1. Teoretická a adiabatická teplota plamene.....	23
3. Spalování vzduchu se zvýšeným obsahem kyslíku	24
3.1. Kyslík	24
3.2. Metody OEC	24
3.2.1. Metoda I: obohacování vzduchu kyslíkem	24
3.2.2. Metoda II: vstřikování kyslíku do plamene	25
3.2.3. Metoda III: nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem	26
3.2.4. Metoda IV: samostatný přívod kyslíku a vzduchu do hořáku.....	27
3.3. Výhody OEC	27
3.3.1. Zvýšená produktivita.....	27
3.3.2. Vyšší tepelná účinnost.....	28
3.3.3. Zlepšené charakteristiky plamene.....	28
3.3.4. Menší objem spalin.....	29
3.4. Nevýhody OEC	29
3.4.1. Poškození vyzdívky spalovací komory.....	29
3.4.2. Nerovnoměrné ohřívání	30
3.4.3. Porucha plamene	30

3.4.4.	Zvýšené emise znečišťujících látek	30
3.4.5.	Zášleh plamene	30
4.	Využití OEC v průmyslu	31
4.1.	Sklářský průmysl	31
4.2.	Kovozpracující průmysl	31
4.3.	Petrochemický průmysl	32
4.4.	Energetický průmysl	32
4.5.	Řezání a svařování	32
5.	Bezpečnost při OEC	33
5.1.	Spalovací trojúhelník	33
5.2.	Návrh vypracování	33
5.3.	Nebezpečí požáru	33
5.4.	Kontrola meze zápalnosti	34
5.5.	Kontrola zapalování	36
5.6.	Kompatibilita s kyslíkem	36
6.	Produkce kyslíku	37
6.1.	Kryogenní produkce kyslíku	38
6.2.	Adsorpce	39
6.2.1.	Adsorpce za změny tlaku vzduchu	40
6.2.2.	Adsorpce za změny tlaku ve vakuu	41
6.2.3.	Adsorpce za změny tlaku vzduchu i vakua	41
7.	Experimentální část	42
7.1.	Experimentální zařízení	42
7.2.	Hořák	44
7.3.	Kyslík	45
7.4.	Plán zkoušek	46
7.4.1.	Přívod kyslíku při metodě AE	47
7.4.2.	Přívod kyslíku při metodě AO	48
7.4.3.	Přívod kyslíku při metodě OL	48
8.	TEST A	49
8.1.	Koncentrace NO _x	49
8.1.1.	Metoda AE	49
8.1.2.	Metoda AO	50
8.1.3.	Metoda OL	51
8.1.4.	Srovnání AE, AO a OL metod	52
8.2.	Chybová analýza NO _x	53

8.3.	Teplota spalin.....	54
8.4.	Struktura plamene.....	55
8.4.1.	Metoda AE.....	55
8.4.2.	Metoda AO	56
8.4.3.	Metoda OL.....	56
9.	TEST B	57
9.1.	Distribuce tepelného toku.....	57
9.2.	Chybová analýza tepelných toků.....	58
9.3.	Tepelná účinnost.....	59
10.	TEST C	61
10.1.	Teplota ve spalovací komoře.....	61
10.1.1.	Metoda AE.....	61
10.1.2.	Metoda AO	61
10.1.3.	Metoda OL.....	62
11.	Závěr.....	66
	Použitá literatura.....	68
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek	72
	Obsah DVD	73
	Přílohy	74

Seznam symbolů

Symbol	Definice	Jednotka
α	součinitel přestupu tepla	$W/(m^2 \cdot K)$
C_i	koncentrace hořlavých složky i	% obj.
g	rychlostní gradient	s^{-1}
Gr	Grashofovo číslo	–
ε	emisivita	–
k	tepelná vodivost	$W/(m \cdot K)$
λ	součinitel přebytku vzduchu	–
L_d	dolní mez zápalnosti	% obj.
L_h	horní mez zápalnosti	% obj.
LHV_{plynu}	výhřevnost paliva	$kJ \cdot m_N^{-3}$
LHV_i	výhřevnost složky v palivu	$kJ \cdot m_N^{-3}$
MW_{plynu}	molární hmotnost zemního plynu	$kg \cdot kmol^{-1}$
MW_i	molární hmotnost složky plynu	$kg \cdot kmol^{-1}$
n	koncentrace nehořlavých složek	% obj.
Nu	Nusseltovo číslo	–
Ω	celková koncentrace vzduchu	%
Pr	Prandtlovo číslo	–
Q	přenos tepla	$W \cdot s$
q_x	měrný tepelný tok	$W \cdot m^{-2}$
\dot{q}_i	tepelný tok v sekci i	$W \cdot m^{-2}$
R	poloměr potrubí	m
Re	Reynoldsovo číslo	–
S	plocha povrchu	m^2
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W/(m^2 \cdot K^4)$
σ_{NO_x}	směr. odchylka NO_x	mg/m_N^3
σ_{NO}	směr. odchylka NO	mg/m_N^3
σ_{NO_2}	směr. odchylka NO_2	mg/m_N^3
σ_{V_i}	směr. odchylka obj. průtoku	$m^3 \cdot s^{-1}$
$\sigma_{t_{OUT,i}}$	směr. odchylka výstupní teploty vody	$^{\circ}C$
$\sigma_{t_{IN}}$	směr. odchylka vstupní teploty vody	$^{\circ}C$
T	teplota	K
T_a	adiabatická teplota plamene	K
T_t	teoretická teplota plamene	K
T_w	teplota povrchu tělesa	K
\dot{V}	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
X	naměřená koncentrace emisí	ppm
x_i	hmotnostní zlomek složky i	kg/kg
Y	vypočtená koncentrace emisí	mg/m_N^3

Seznam zkratek

Zkratka	Definice
AE	Air Enrichment
AO	Air-oxy/fuel
ASU	Air Separation Unit
FTFT	Furnace-Temperature Fixing Test
GO _x	Gaseous Oxygen
HC-SCR	Hydrocarbon Selective Catalytic Reduction
LHV	Lower Heating Value
LO _x	Liquid Oxygen
LTO	Lehké topné oleje
OEAS	Oxygen-enriched Air Staging
OEC	Oxygen Enhanced Combustion
OL	Oxygen Lancing
PSA	Pressure Swing Adsorbtion
SCR	Selective Catalytic Reduction
SNCR	Selective Non-catalytic Reduction
TTO	Těžké topné oleje
VPSA	Vacuum Pressure Swing Adsorbtion
VSA	Vacuum Swing Adsorbtion

Seznam chemických prvků a sloučenin

Vzorec	Název
CH ₄	Metan
C ₂ H ₆	Etan
C ₃ H ₈	Propan
C ₅ H ₁₂	Pentan
C ₆ H ₁₄	Hexan
CN	Kyanid
CO ₂	Oxid uhličitý
H ₂	Vodík
H ₂ O	Voda
HCN	Kyanovodík
i-C ₄ H ₁₀	Isobutan
N ₂	Dusík
NO	Oxid dusnatý
NO ₂	Oxid dusičitý
N ₂ O ₄	Tetraoxid dusíku
N ₂ O ₅	Pentaoxid dusíku
n-C ₄ H ₁₀	n-Butan
NH ₃	Amoniak
O ₂	Kyslík

1. Úvod

Většina průmyslových procesů potřebuje značné množství energie, která je obvykle generována spalováním uhlovodíkových paliv (zemní plyn aj.). Cena energií se v poslední době rapidně zvyšuje a z tohoto důvodu je nezbytné zvýšit účinnost procesů. Energie získaná z tradičních spalovacích systémů je zejména využita k ohřevu dusíku, který vstupuje do spalovací komory jako inertní plyn z atmosférického vzduchu. Důsledkem je snížená účinnost procesu. Jednou z možností jak snížit cenu nákladů a získat více energie je technologie spalování vzduchu se zvýšeným obsahem kyslíku (OEC). OEC můžeme definovat jako zvýšenou koncentraci kyslíku (více než 21 obj. % kyslíku) ve spalovacím vzduchu nebo v oxidačním proudu. Tímto způsobem dokážeme jednoduše vyřešit problém snížené účinnosti, protože do spalovací komory vstupuje menší množství dusíku. Mezi výhody této metody (v porovnání s tradičními technologiemi) můžeme zařadit vyšší tepelnou účinnost, menší ztráty tepla ze spalin, nebo větší rozsah průtoku paliva [1].

Účinnost a provozní náklady však nejsou jedinými aspekty, které jsou probírány a sledovány. Vláda a ekologové stále více diskutují o znečištění životního prostředí ze spalovacích procesů v průmyslu. Nároky na emisní limity se stále zvyšují a stávající technologie („low-NO_x“ hořáky a jiné modifikace) nebudou schopny tyto normy splňovat bez aplikace dalších technologií jako je například selektivní katalytická redukce. Mezi nejvíce diskutované emisní látky patří oxid uhličitý (CO₂), který je zodpovědný za globální oteplování a oxidy dusíku (NO_x), které způsobují kyselé deště. Redukce těchto dvou hlavních emisních látek lze dosáhnout pomocí technologie OEC. V kombinaci se speciálním hořákem lze nejen omezit tvorbu emisí, ale také nahradit část dusíku kyslíkem [2]. Hlavní podíl na emisích oxidů dusíku mají především elektrárny na fosilní paliva, automobilový a chemický průmysl, a proto je nutné vyvíjet nové a vylepšovat dosavadní technologie. Množství oxidů dusíku uniklého do ovzduší lze snížit pomocí technologií, které je zachytí ve spalinách (adsorpce, elektrický odlučovač aj.), nebo pomocí metod, které snižují množství dusíku ještě před samotným spalováním. V podstatě jde o snížení podílu dusíku v palivu (OEC) nebo volby paliva s nízkým podílem dusíku [3].

OEC je nejčastěji používáno v průmyslu, kde je zapotřebí vysokých teplot. Důvodem je fakt, že přidáním kyslíku do spalovacího systému se také zvýší teplota ve spalovací komoře. Této výhody se využívá především v odvětvích jako je kovozapracující průmysl (tavení kovů, předehřev pánví), sklářský průmysl (tavení skla), spalování odpadu nebo výroba energie. Technologie OEC má však také řadu nevýhod. Jedním z důvodů, proč je použití této metody v průmyslu limitováno, jsou vysoké náklady na výrobu kyslíku [4].

Procesy spalování jsou nejčastěji obohacovány kyslíkem pomocí čtyř základních metod: obohacování vstupního proudu vzduchu kyslíkem (tzv. „air-enrichment“), vstřikování O₂ do plamene (tzv. „O₂-lancing“), nahrazení spalovacího vzduchu čistým kyslíkem (tzv. „oxy/fuel combustion“) a samostatný přívod kyslíku a spalovacího vzduchu do hořáku (tzv. „air-oxy/fuel combustion“) [1].

Technologii OEC lze použít u mnoha typů paliv a to ve všech skupenstvích (plynné, kapalné, pevné). Pro plynná paliva je nejběžnější zemní plyn. Nejčastějším zástupcem u technologií na kapalná paliva jsou lehké a těžké topné oleje. Mezi

nejpoužívanější pevná paliva patří uhlí a odpad. Přestože je využití, co se týče druhů paliv, velmi velké, přináší to také některé překážky. Palivo může obsahovat mnoho rozdílných komponentů a důsledkem vyšších teplot u technologie OEC se mohou vytvořit různé nežádoucí sloučeniny, jako jsou např. furany, dioxiny.

Při obohacování vstupního proudu vzduchu kyslíkem můžeme ušetřit náklady na palivo a rekonstrukci stávajících hořáků. Byly provedeny studie, kde se zkoumal vliv koncentrace kyslíku (v rozmezí 21–30 %) na rychlost ohřevu, emise, distribuci tepla a spotřebu paliva. Podle výzkumu se čas potřebný k ohřátí na teplotu 1 200 °C snížil o 54 % (v porovnání s koncentrací 21 % O₂ ve vzduchu). Avšak emisní koncentrace NO_x se 4,4 krát zvýšila a množství CO₂ vzrostlo téměř lineárně s koncentrací O₂, která se zvýšila z 21 % na 30 %. Při udržování stejné teploty v peci se při obohacování 30 % O₂ snížila spotřeba paliva o 26 % (v porovnání s koncentrací 21 % O₂ ve vzduchu) [4].

Tvorbu NO_x lze značně snížit instalací „low-NO_x“ hořáků (obvykle o 30–50 %). Díky dalším výzkumům byl navržen experimentální hořák v kombinaci se stupňovitým přívodem paliva a spalovacího vzduchu. Použitím tohoto hořáku došlo ke snížení tvorby emisních NO_x o více než 70 % v porovnání s původním hořákem, který byl v kotli instalován [5].

1.1. Cíle práce

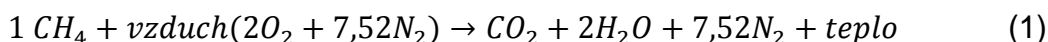
Diplomová práce se zabývá procesem spalování při využití technologie OEC. Výzkum je zaměřen na zjištění parametrů tohoto procesu, a jak lze přidáním kyslíku ovlivnit spalování. Práce je rozdělena na dvě části. V první části je problematika OEC řešena na teoretické úrovni. Úvodem je popsáno spalování plyných paliv (konkrétně zemní plyn) a změna chování po přidání čistého kyslíku. Další kapitola zahrnuje emise oxidů dusíku. Dále jsou znázorněny základní principy přenosu tepla, technologie OEC a její metody. U technologie OEC jsou zmíněny její výhody a nevýhody a také využití v průmyslu. V závěru této části jsou popsány metody průmyslové produkce kyslíku.

V druhé části práce jsou zkoumány a porovnávány parametry tří metod OEC. Konkrétně se jedná o přidávání O₂ do vstupního vzduchového proudu, vstřikování O₂ do plamene a metoda samostatného přívodu kyslíku a vzduchu do hořáku. Práce je zaměřena na zkoumání vlivu koncentrace kyslíku (21–46 %) na emise NO_x, teplotu spalin, tepelný tok ze spalin do stěny spalovací komory, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory a charakter plamene. Během zkoušek spalování byl použit dvoustupňový „low-NO_x“ hořák a palivem byl zemní plyn. Zkoušky proběhly pro všechny tři metody za stálého výkonu 750 kW a ve dvou spalovacích režimech – jednostupňové spalování a dvoustupňové spalování.

Tato práce vznikla díky finanční podpoře Grantové agentury České republiky v rámci projektu „Vliv vyššího obsahu kyslíku ve spalovacím vzduchu a nástřik vysoce čistého kyslíku do spalovacího prostoru“ (reg. č. P101/12/P747) a Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy v rámci projektu „NETME centre – Nové technologie pro strojírenství“ (reg. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0002).

2. Proces spalování

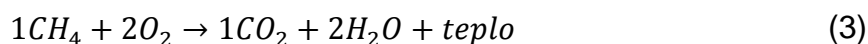
Atmosférický vzduch obecně obsahuje přibližně 79 % N₂ a 21 % O₂. Oba tyto plyny proudí do spalovací komory, kde následně reagují s uhlovodíkovým palivem. Hlavní složkou zemního plynu je metan (CH₄). Při procesu spalování tyto plyny mezi sebou reagují a jako produkt vzniká oxid uhličitý (CO₂), voda (H₂O) a energie ve formě tepla. Zmíněná reakce je znázorněna v rovnici (1) [1].



Z rovnice (1) je patrné, že reakce potřebuje ke stechiometrickému spálení 1 jednotky paliva přibližně 10 jednotek spalovacího vzduchu. Aby bylo spalování dokonalé, musí být množství spalovacího vzduchu o něco větší než za těchto stechiometrických podmínek. Toto přidané množství spalovacího vzduchu se nazývá přebytek vzduchu a často se udává ve formě součinitele přebytku vzduchu, obvykle označovaného jako λ [6]:

$$\lambda = \frac{\text{skutečná \% O}_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}}{\text{stechiometrická \% O}_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}} \quad (2)$$

Přebytek vzduchu je důležitý k zajištění spálení veškerého paliva. Díky tomu nehrozí, že se budou ve spalínách vyskytovat částice oxidu uhelnatého (CO) či nespálené uhlovodíky (C_xH_y). Je zde však jedna nevýhoda. Se zvýšeným množstvím spalovacího vzduchu klesá účinnost procesu, protože do reakce vstupuje také větší množství inertního dusíku (N₂), který se ohřívá a v procesu působí jako balast. Pokud by byl veškerý dusík ze vzduchu odstraněn, vypadala by spalovací reakce takto:



Z této rovnice (3) je zřejmé, že na 1 jednotku metanu jsou potřeba 2 jednotky O₂. V porovnání s rovnicí (1) můžeme vidět dva rozdílné stavy spalování. Rovnice (1) reprezentuje spalování s atmosférickým vzduchem a rovnice (3) znázorňuje spalování čistého kyslíku, tzv. „oxy/fuel combustion“. Nicméně rovnice popsané výše jsou velmi zjednodušené, protože spalovací vzduch ve většině průmyslových aplikací obsahuje mnoho dalších látek. Detailní složení atmosférického vzduchu můžeme vidět v tab. 1 [7]:

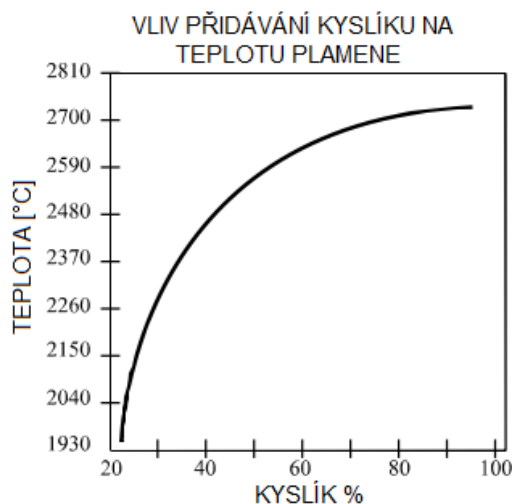
Složka	Symbol	% obj.	% hmot.
Dusík	N ₂	78,09	75,47
Kyslík	O ₂	20,95	23,14
Argon	Ar	0,93	1,3
Oxid uhličitý	CO ₂	0,033	0,05
Neon	Ne	1,8·10 ⁻³	1,2·10 ⁻³
Helium	He	5,0·10 ⁻⁵	8,0·10 ⁻⁵
Krypton	Kr	1,0·10 ⁻⁴	2,9·10 ⁻⁴
Vodík	H ₂	5,0·10 ⁻⁵	3,0·10 ⁻⁶
Xenon	Xe	9,0·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁴
Celkem		100,00	100,00

Tab. 1 – Chemické složení atmosférického vzduchu.

2.1. Kyslík ve spalovacím vzduchu

Atmosférický vzduch je složen z několika plynů, které se přímo nepodílí na reakci spalování (např. dusík, argon) a mají negativní vliv na účinnost procesu, což vede ke značnému plýtvání energií. To znamená, že u spalování je výhodné tyto plyny (zejména dusík) nahradit čistým kyslíkem. Tím se sníží množství inertních plynů vstupujících do reakce. Např. společnost AGC Glass Europe deklaruje, že při kyslíkovém spalování se spotřeba energie u výroby skla snižuje o 15 %. Společně s další technologií, která spočívá v rekuperaci tepla ze spalin pro předehřev plynů před jejich vstříkáním do pece, se úspora snižuje o dalších 10%, tudíž celkem o 25 % [8].

Přidáním čistého kyslíku do spalovacího procesu se významně zvyšuje teplota v plameni. Pro názornost při spalování zemního plynu s atmosférickým vzduchem je teplota v plameni 1938 °C, ale s koncentrací 23 % O₂ v přívodním vzduchu roste teplota v plameni na 2004 °C. Na obr. 1 je znázorněna závislost mezi teplotou v plameni a množstvím přidaného kyslíku [9]. Kyslík se nepřidává jen z důvodu zvýšení teploty plamene, ale může mít také pozitivní dopad na tvorbu NO_x (v závislosti na volbě hořáku a technologických podmínkách jako je množství přidaného kyslíku, metodě OEC atd.).



Obr. 1 – Vliv přidávání kyslíku na teplotu plamene.

2.2. Zemní plyn

Zemní plyn je bezbarvý, sám o sobě nezapáchající, hořlavý plyn. Patří do skupiny topných plynů. Využívá se k vytápění, vaření a ohřevu vody, v elektrárnách, teplárnách, v kogeneračních jednotkách a v dopravě (jako pohon motorových vozidel) [10]. Jako plynné palivo je široce využíván především ve Spojených státech a v Evropě. Zemní plyn má při hoření nesvítlivý plamen a množství sazí či jiných částic vzniklých po spálení je zanedbatelné. Plamen má při hoření modrou barvu se žlutými konci. Pokud je do spalovacího vzduchu přidán čistý kyslík, přechází barva plamene z modré na svítivě žlutou a to v závislosti na koncentraci O₂ ve vzduchu. Na výhřevnost zemního plynu má vliv jeho složení. Při spalovacích zkouškách byl použit zemní plyn obsahující z velké části metan a nepatrné množství vyšších uhlovodíků. Přesné složení zemního plynu je uvedeno v tab. 2. Z tabulky lze vyčíst, že palivo

obsahuje i malé množství dusíku, který je zodpovědný za tvorbu palivových NO_x (viz kapitola 2.3).

K určení molární hmotnosti směsi plynu můžeme použít rovnici (4).

$$MW_{\text{plynu}} = \sum \frac{x_i}{100} \cdot MW_i \quad (4)$$

kde x_i je hmotnostní zlomek složky i [kg/kg],
 MW_i je molární hmotnost složky i [kg/kmol].

Výhřevnost paliva lze vypočítat pomocí následující rovnice (5):

$$LHV_{\text{plynu}} = \sum \frac{x_i}{100} \cdot LHV_i \quad (5)$$

kde x_i je hmotnostní zlomek složky i [kg/kg],
 LHV_i je výhřevnost složky i [kJ/kmol].

Složka		MW	LHV	MW Složek	LHV Složek
	[% obj.]	Molární hmotnost	Výhřevnost	ve směsi	ve směsi
		[kg/kmol]	[kJ/m _N ³]	[kg/kmol]	[kJ/m _N ³]
N ₂	0,83	28,01	0	0,233	0,00
CO ₂	0,07	44,01	0	0,031	0,00
CH ₄	98,24	16,04	35 718	15,761	35 151,72
C ₂ H ₆	0,59	30,07	63 687	0,177	375,75
C ₃ H ₈	0,17	44,10	91 176	0,075	155,00
n-C ₄ H ₁₀	0,04	58,12	118 584	0,023	47,43
i-C ₄ H ₁₀	0,03	58,12	118 279	0,017	35,48
C ₅ H ₁₂	0,02	72,15	145 957	0,014	29,19
C ₆ H ₁₄	0,01	86,18	173 458	0,009	17,35
Celkem	100,00	-	-	16,340	35 812,00

Tab. 2 – Typické složení zemního plynu a jeho výhřevnost.

2.3. Oxidy dusíku

Mezi hlavní produkty, které vznikají spalováním fosilních paliv, patří oxid uhličitý a vodní pára. Nicméně další prvky nebo sloučeniny obsažené v palivu či spalovacím vzduchu mohou reagovat a tvořit nové sloučeniny jako jsou oxidy dusíku (NO_x), oxidy síry (SO_x), popel a jiné pevné částice, obecně nazývané jako emise. Množství NO_x je přísně monitorováno, protože tvorba NO_x může být ve srovnání s tvorbou SO_x velmi vysoká.

Pojem oxidy dusíku zahrnuje širokou skupinu sloučenin obsahujících dusík jako je např. NO, NO₂, N₂O₃, N₂O₄ nebo N₂O₅. Avšak pojem NO_x představuje pouze dvě skupiny oxidů dusíku, které se ve spalinách vyskytují nejvíce, zejména oxid dusnatý (NO) a oxidu dusičitý (NO₂). NO je bezbarvý plyn, který má tendenci reagovat s kyslíkem v atmosféře za vzniku NO₂. Oxid dusnatý je pro člověka velmi nebezpečný, protože dráždí oči, dýchací cesty a může způsobit nevolnost a bolesti hlavy [6].

Oxid dusičitý je druhým zástupcem NO_x. NO₂ vzniká reakcí NO s volnými kyslíkovými radikály, které vznikly štěpením O₂ nebo H₂O. Předešlé výzkumy prokázaly, že přibližně 90 % všech NO_x vzniklých při spalování tvoří NO a zbytek NO₂. Následná oxidace na NO₂ probíhá v komíně nebo v atmosféře reakcí s ozónem [11]. NO₂ je červenohnědý plyn štiplavého zápachu. Oxid dusičitý je také velmi toxický a nebezpečný, protože může poškodit dýchací cesty a vyvolat plicní edém. Je také označován jako skleníkový plyn, který přispívá k ničení ozónu ve stratosféře [12].

Proto je nutné vyvíjet technologie schopné redukovat tvorbu NO_x na úroveň, která je dána legislativou (v České Republice je pro stacionární zdroje s tepelným výkonem mezi 0,3 a 50 MW emisní limit 200 mg/mN³) [13]. Hlavní technologie, která se uplatňuje po spalování, je selektivní katalytická redukce (SCR) a selektivní nekatalytická redukce (SNCR). SCR přináší výhodu větší redukce NO_x a je široce využívána v průmyslových zemích s nízkými emisními limity. SNCR je ekonomicky méně náročnější technologie a je rozšířena v rozvojových zemích. Další technologie jako je uhlovodíková selektivní katalytická redukce (HC-SCR) a přímý katalytický rozklad NO_x slibují další posun v redukci NO_x, ale stále nejsou komerčně životaschopné [14].

Další metodou je znovuspalování, kdy jsou uhlovodíky v plynném, kapalném či pevném stavu vstříkovány do spodního proudu oblasti spalování a dochází k redukci NO na HCN. Typické množství použitého paliva na znovuspalování je 10–30 % z celkového množství paliva. Znovuspalování zemního plynu bez využití dalších technologií snižuje tvorbu NO_x o 35–65 %. Souběžně klesá i tvorba SO_x a CO₂. Přidáním dalších aplikací jako je low-NO_x hořák, vícestupňové spalování aj. můžeme snížit tvorbu emisí až o 85 % [15].

Tvorba těchto konkrétních emisních látek lze popsat třemi základními způsoby: termický, promptní a palivový. Přestože můžeme tvorbu NO_x popsat pomocí těchto mechanismů, celá problematika je daleko složitější a je mnoho dalších proměnných, které ovlivňují jejich tvorbu.

2.3.1. Termické NO_x

Vznikají z molekul N₂ obsažených ve vzduchu, který se účastní spalování. Vlivem vysoké teploty (více než 1100 °C) je tento atmosférický dusík rozštěpen a s přítomnými atomy kyslíku vznikají oxidy dusíku. Jejich množství je závislé na teplotě spalování a na době zdržení ve spalovacím prostoru. Emise proto lze snížit vhodným uspořádáním spalování [16]. Proces tvorby termických NO_x byl poprvé vysvětlen Zeldovichem [17]:



Tento mechanismus je obvyklý zejména ve vysokoteplotních procesech. Obvykle při využití technologie předehřevu spalovacího vzduchu nebo OEC se tento způsob podílí na tvorbě NO₂ nejvíce. Technologie OEC však může mít pozitivní dopad na úroveň NO_x ve spalinách [1], [18]. Zeldovichův mechanismus lze rozšířit další rovnicí, která zahrnuje vliv hydroxidů ve směsích bohatých na palivo. Rovnice (7) znázorňuje rozšířený Zeldovichův mechanismus:



Existuje mnoho technik, které dokážou omezit tvorbu termických NO_x. Společným cílem všech technik je omezit koncentraci kyslíku a dusíku v oblasti plamene kde je nejvyšší teplota, snížit dobu zdržení látek v této oblasti nebo snížit teplotní špičku plamene [6].

2.3.2. Promptní NO_x

Promptní NO_x vznikají tak, že molekulární dusík je přeměňován přes meziprodukty na NO na rozhraní plamene radikálovými reakcemi za přítomnosti uhlovodíků. Emise lze snížit obtížně, avšak jejich podíl je obvykle malý [16]. Tvoří se rychlou reakcí dusíku ve spalovacím vzduchu s kyslíkem a radikály v palivu. Reakce probíhá díky kyanovodíkům, které se vyskytují ve spalovací komoře po reakci dusíku se zbytkovým množstvím uhlovodíků. Prvním, kdo pozoroval tvorbu promptních NO_x, byl Feminore [19], který se zabýval spalováním plynného pyridinu a amoniaku. Feminore zjistil, že v oblastech s přebytkem paliva roste úroveň NO_x. Rovnice, která popisuje tvorbu promptních NO_x, pak vypadá takto [1]:

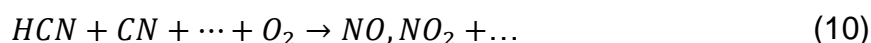


2.3.3. Palivové NO_x

Hlavním zdrojem těchto oxidů dusíku jsou paliva obsahující dusíkaté látky. Tento dusík je pak během hoření oxidován na oxidy dusíku a odchází společně s dalšími produkty hoření do ovzduší. Tento druh oxidů dusíku může tvořit až 50 % z celkové produkce oxidů dusíku při spalování olejů (LTO) a až 80 % při spalování uhlí. Emise lze snížit či vyloučit používáním bezdusíkatých paliv [16]. Tvorba palivových NO_x není přímá a musí proběhnout několik reakcí, aby se NO_x vytvořil. Hlavní složky podílející se na reakci jsou kyanovodík (HCN) a amoniak (NH₃). Samozřejmě vznik palivových NO_x závisí na složení paliva [1]. Podle složení paliva, které je znázorněno v tabulce 2, je možné předpokládat, že se tento mechanismus podílí na tvorbě NO_x i během zkoušek spalování. Avšak vzhledem k nízké koncentraci dusíku v palivu bude tento jev probíhat ve velmi malé míře.



Rovnice (9) popisuje vznik meziproduktů, které jsou následně podle rovnice (10) oxidovány kyslíkem za vzniku NO_x:



2.3.4. Převod mezi ppm a mg/m³

Koncentrace oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO₂) jsou měřeny v jednotkách [ppm], které je posléze nutno převést na jednotky [mg/m³] vztažené k referenční hodnotě kyslíku (u plyných a kapalných paliv 3 %, u pevných paliv 6 %). Pro převod mezi ppm a mg/m³ je použita následující rovnice [20]:

$$Y = X \cdot \frac{\sum x_i \cdot MW_i}{22,414} \quad (11)$$

kde Y je vypočtená koncentrace NO nebo NO₂ [mg/m_N³],
 X je naměřená koncentrace NO nebo NO₂ [ppm],
 x_i je hmotnostní zlomek složky i [kg/kg],
 MW_i je molární hmotnost složky i [kg/kmol].

Pro názornost je uveden převod 1 ppm NO a 1 ppm NO₂ na mg/m_N³:

$$1 \text{ ppm NO} = \frac{14,01 + 16}{22,414} = 1,34 \text{ mg/m}_N^3 \quad (12)$$

$$1 \text{ ppm NO}_2 = \frac{14,01 + 2 \cdot 16}{22,414} = 2,05 \text{ mg/m}_N^3 \quad (13)$$

Jelikož NO_x reprezentuje sumu NO a NO₂ v jednotkách mg/m_N³, koncentrace NO musí být ještě převedena na ekvivalentní množství NO₂, které určíme podle následujícího vzorce [20]:

$$[NO_2] \frac{\text{mg}}{\text{m}_N^3} = [NO] \frac{\text{mg}}{\text{m}_N^3} \frac{m_{NO_2}}{m_{NO}} = [NO] \frac{\text{mg}}{\text{m}_N^3} \cdot 1,533 \quad (14)$$

Pak výsledná suma NO_x [mg/m_N³] je: 1,34 · 1,533 + 2,05 mg/m_N³, tedy 4,1 mg/m_N³.

2.4. Přenos tepla

Energie může být přenesena interakcí systému s jeho okolím. Tyto interakce jsou buď práce, nebo teplo. Pro přenos tepla z okolí do soustavy a naopak však musí existovat teplotní gradient nebo rozdíl teplot. Jinak nedojde k přenosu tepla. U spalování se jedná o teplotu plamene a teplotu spalovací komory. Přenos tepla lze popsat třemi mechanismy.

2.4.5. Radiace

Z každého povrchu, který má nějakou konečnou teplotu, je emitována energie. Tomuto procesu říkáme tepelné záření (radiace). Je to hlavní mechanismus přenosu tepla u spalování, jelikož je teplota závislá na čtvrté mocnině. Tepelné záření se může také objevit u plynů a kapalin. Zatímco přenos tepla vedením a konvekcí vyžaduje přítomnost hmotné látky, záření je proces, který může probíhat i v absolutním vakuu. Přenos tepla, který může být z povrchu emitován, je dán tzv. Stefan-Boltzmannovým zákonem [21]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (15)$$

kde Q je přenos tepla [W · s],
 ε je emisivita (poměrná zářivost) [-],
 σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$) [W/(m² · K⁴)],
 S je plocha povrchu [m²],
 T je teplota [K].

Poměrná zářivost nabývá hodnot v rozmezí $0 \leq \varepsilon \leq 1$ a říká nám, jak efektivní je záření z povrchu v porovnání s ideálním zářičem – absolutně černým tělesem.

2.4.6. Konvekce

Přenos tepla konvekcí je složen ze dvou mechanismů. Základní je náhodný pohyb molekul (difúze) jako u kondukce. Druhým mechanismem je objemový, makroskopický pohyb tekutiny. To značí, že v kterémkoliv okamžiku se velké množství molekul pohybuje kolektivně, ve velkých objemech. Tomuto mechanismu říkáme advekce. Protože molekuly si v tomto proudícím objemu ponechávají svůj náhodný pohyb, je přenos energie důsledkem superpozice těchto dvou mechanismů. A to se projevuje v pojmu konvekce. Nejtypičtější je přenos tepla konvekcí mezi proudící tekutinou a nějakým omezujícím povrchem, mají-li oba různou teplotu. V blízkosti povrchu se vytvoří vrstva tekutiny, v níž se rychlost proudění mění od hodnoty 0 až po rychlost nazývanou rychlost volného proudu. Při konvektivním přenosu tepla první mechanismus dominuje v blízkosti povrchu, kde je rychlost tekutiny nízká, přímo na povrchu rychlost klesá na nulu. Druhý mechanismus se uplatní tak, že tekutina je strhávána z volného proudu do mezní vrstvy kde odebírá teplo a pak je jakoby „smetena“ dolů po proudu [21].

Konvekce může být klasifikována podle povahy proudění:

- nucená – vyvozená ventilátorem, kompresorem, čerpadlem
- přirozená – vyvozená rozdílem hustot (v důsledku rozdílu teplot)

Pro určení přenosu tepla konvekcí platí tato zjednodušená Newtonova rovnice:

$$Q = S \cdot \alpha \cdot (T - T_w) \quad (16)$$

kde Q je přenos tepla [$W \cdot s$],
 S je plocha přestupu tepla [m^2],
 α je součinitel přestupu tepla [$W/(m^2 \cdot K)$],
 T je teplota tekutiny [K],
 T_w je teplota povrchu tělesa, které je v přímém kontaktu s tekutinou [K].

Ve skutečnosti je tato rovnice daleko složitější, protože součinitel přestupu tepla α ovlivňuje mnoho proměnných jako je Nusseltovo číslo Nu, Reynoldsovo číslo Re, Prandtlovo číslo Pr, Grashofovo číslo Gr.

2.4.7. Kondukce

Vedení tepla lze charakterizovat jako přenos energie od více energetických k méně energetickým částicím. Tyto částice mohou být molekuly (u kapalin a plynů) nebo atomy (u tuhých látek). Vyšší teplota je spojena s vyšší energií částice. Existuje-li v látce teplotní gradient, pak se přenos tepla uskutečňuje ve směru klesající teploty. U plynů nebo kapalin lze pozorovat náhodný pohyb molekul z oblastí s vyšší energií do oblastí s nižší energií. Tomuto pohybu s předáváním energie říkáme difúze energie, a proto se také vedení tepla často označuje jako proces tepelné difúze. Podle Fourierova zákona platí pro tepelný tok, který je vedený z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě, že je přímo úměrný teplotnímu gradientu. Koeficientem úměrnosti je tepelná vodivost, což je fyzikální vlastnost látky. Měrný tepelný tok (množství tepla za jednotku času na jednotku plochy přenášené ve směru osy x) je dán vztahem [21]:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (17)$$

kde q_x je měrný tepelný tok [W/m²],
 k je tepelná vodivost [W/(m · K)],
 dT je rozdíl teplot mezi dvěma místy [K],
 dx je vzdálenost mezi dvěma místy [K].

2.5. Teplota plamene

Spalování se technologicky nejčastěji využívá jako zdroj tepelné energie k ohřevu různých látek. Z hlediska praktického využití spalovacího procesu má teplota plamene zásadní význam, protože představuje limitní hodnotu, které se může teplota ohřívaného materiálu více či méně blížit. Kromě toho velikost teploty plamene ovlivňuje volbu materiálů použitých pro stavbu spalovacího prostoru [22].

2.5.1. Teoretická a adiabatická teplota plamene

Maximální hodnota teploty plamene při spalování určitého topného plynu se vzduchem nebo s kyslíkem, které se dá dosáhnout pouze za adiabatických podmínek, se nazývá teoretická teplota plamene T_t . Tato teplota plamene předpokládá dokonalé spalování paliva s teoretickým množstvím vzduchu nebo kyslíku a využívá veškerého přivedeného tepla k ohřátí spalin (tab. 3) [22].

Plyn	Se vzduchem [°C]	S kyslíkem [°C]
Koksárenský plyn	1 955	2 660
Zemní plyn	1 925	2 720
Propan	2 000	2 795

Tab. 3 – Teoretická teplota plamene topných plynů.

Adiabatická teplota plamene T_a předpokládá opět adiabatický průběh spalování, tedy žádné tepelné ztráty do okolí, avšak na rozdíl od teoretické teploty plamene se může jednat o dokonalé spalování s definovaným přebytkem vzduchu.

3. Spalování vzduchu se zvýšeným obsahem kyslíku

3.1. Kyslík

Kyslík je při standardních podmínkách ($T = 273,15 \text{ K}$, $p = 101,325 \text{ kPa}$) plyn bez barvy, chuti a zápachu. V nejběžnější podobě je kyslík dvouatomová molekula, označována jako O_2 , s molekulovou hmotností $32,00 \text{ g/mol}$. Kyslík v plynném skupenství (označován jako GO_x) je nepatrně těžší než vzduch. Za atmosférického tlaku se při teplotě nižší než 90 K (-183 °C) kyslík dostává do kapalného skupenství [23]. Kapalný kyslík je (označován jako LO_x) světle modré barvy, bez zápachu, průhledný a lehce těžší než voda. Kyslík je silné oxidační činidlo, což znamená, že je nehořlavý, ale dokáže velmi zrychlit rychlost spalování. Čistý kyslík je vysoce reaktivní. Kyslík je také důležitý pro lidský život, avšak dýchání čistého O_2 může způsobit kašel a trvalé poškození plic. Kyslík má schopnost tvořit s dalšími prvky kyseliny, proto se také často nazývá jako tvůrce kyselin. Je to nejhojnější prvek na Zemi a čtvrtý nejhojnější prvek ve vesmíru po vodíku, heliu a neonu [1].

V průmyslu je kyslík využíván v širokém okruhu odvětví. V kovozpracujícím průmyslu je používán při řezání, svařování, ohřevu, tavení a výrobě mnohých druhů kovů. V průmyslu zabývajícím se zpracováním nerostů a minerálů je kyslík důležitý při výrobě skla, keramiky, cihel, vápence, cementu. Využití také najdeme v chemickém průmyslu, kde se kyslík používá nejen na ohřev, ale také na chemickou syntézu. V ekologii se využívá k čištění odpadních vod a ke spalování odpadu. Mnoho průmyslových procesů může být zefektivněno nahrazením části nebo všeho vzduchu vysoce čistým kyslíkem. Například při ohřevu a tavení kovů, výrobě skla, nebo kalcinace. Obecně můžeme technologii OEC využít v procesech, které mají tyto vlastnosti [1]:

- vysoká teplota spalin přesahující 1400 K ,
- nízká tepelná účinnost díky omezení přenosu tepla,
- omezená propustnost kde může být výhodné zvýšit přenos tepla,
- znečištěné spaliny, vysoké NO_x emise nebo omezení objemu spalin.

3.2. Metody OEC

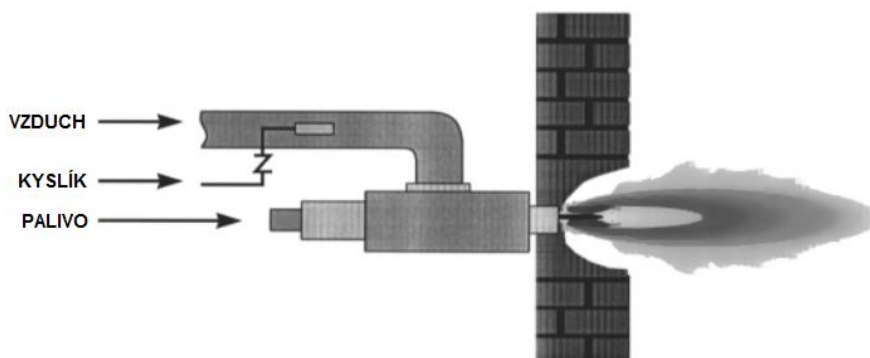
Obohacování spalovacího procesu kyslíkem může být provedeno [1]:

- 1) přidávání O_2 do vstupního vzduchového proudu (tzv. „air-enrichment“),
- 2) vstřikování O_2 do plamene (tzv. „ O_2 -lancing“),
- 3) nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem (tzv. „oxy/fuel combustion“),
- 4) samostatným přívodem kyslíku a vzduchu do hořáku (tzv. „air-oxy/fuel combustion“).

3.2.1. Metoda I: obohacování vzduchu kyslíkem

Tento typ obohacování lze považovat jako nízko úroňové obohacování O_2 . Pro tuto metodu lze použít velké množství hořáků, původně uzpůsobených na spalování paliva s atmosférickým vzduchem. Kyslík je vstřikován do vstupního proudu spalovacího vzduchu obvykle přes difuzor, aby se zajistilo dostatečné promíchání směsi. Tento způsob spalování je finančně nenáročnou metodou přizpůsobení systému a zajišťuje značné výhody. Mezi typické znaky vzniklé přidáváním O_2 patří

snížená délka a zvýšená intenzita plamene. Avšak pokud se do hořáku určeného na spalování paliva s atmosférickým vzduchem přivede nepřiměřené množství O_2 , může se délka plamene zkrátit na neúnosnou hranici, která je již nežádoucí, protože může dojít k zášlehu plamene. Také větší teplota plamene může poškodit hořák nebo tvarovku hořáku. Kvůli zvýšenému množství přidaného kyslíku je někdy potřeba z bezpečnostních důvodů upravit přívodní potrubní systém. Tato metoda je znázorněna na obr. 2 [1].

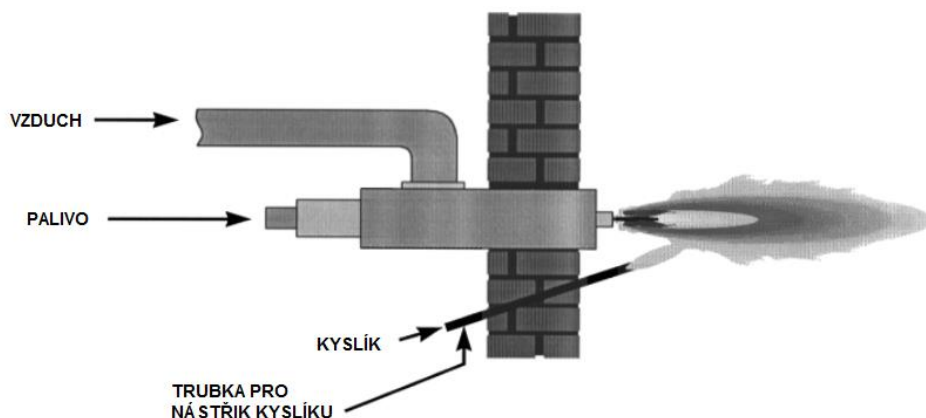


Obr. 2 – Schéma obohacování vzduchu kyslíkem [1].

3.2.2. Metoda II: vstřikování kyslíku do plamene

Tato metoda je stejně jako metoda předcházející využívána převážně pro nízko úroňové obohacování O_2 . Přímé vstřikování kyslíku do plamene může přinést několik výhod oproti obohacování vzduchu. Např. nemusí být provedeny žádné modifikace již existujících hořáků pro spalování paliva s atmosférickým vzduchem. Tvorba NO_x emisí je nižší oproti obohacování vzduchu, protože se jedná o formu stupňovitěho spalování, což je technika používaná pro redukci NO_x . V závislosti na místě vstřikování se může kvůli stupňovitému spalování délka plamene prodloužit [22]. Díky této metodě je možné oproti předmíchání O_2 se vzduchem uvolněné teplo z plamene lépe a rovnoměrněji distribuovat, čímž se zamezí přehřívání hořáku nebo materiálu. Za určitých okolností O_2 vstřikovaný do místa mezi plamenem a ústím hořáku, může přitáhnout plamen směrem k materiálu. To zapříčiní větší účinnost přenosu tepla do materiálu. Další variantou je vstřikování O_2 do některého jiného místa ve spalovací komoře. Tato metoda se nazývá „oxygen enriched air staging“ (OEAS) [1].

Jeden ze specifických způsobů vstřikování O_2 je tzv. spodní obohacování, kde O_2 je do plamene vstřikován zespodu (obr. 3). Zatímco čisté obohacování vzduchu kyslíkem zvyšuje teplotu plamene rovnoměrně, tato metoda obohacuje hlavně spodní část plamene, kde je také největší koncentrace tepla. Přestože není promíchání O_2 se spalovacím vzduchem na takové úrovni jako při metodě I, je tato nevýhoda vyvážena efektivnějším umístěním přidaného tepla. Další výhodou je, že strop pece je vystaven nižším teplotám v porovnání s technologií obohacování vzduchu a tím se prodlužuje její životnost [1].

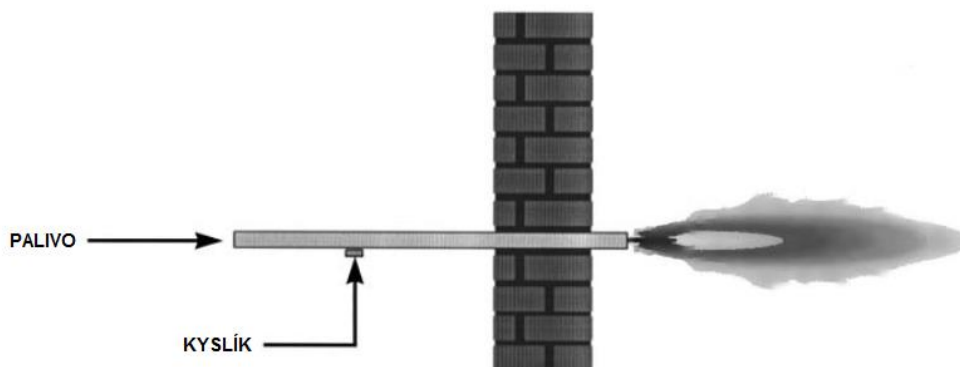


Obr. 3 – Schéma vstřikování kyslíku do plamene [1].

3.2.3. Metoda III: nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem

U této metody je kyslík a palivo dopravováno do hořáku odděleně a nedochází ke smíchání až do chvíle, kdy se dostanou na výstup z hořáku (obr. 4). Toto je běžně známé jako mísení v trysce hořáku, které vytváří difuzní plamen. Ke dřívějšímu smíchání plynů nedochází z bezpečnostních důvodů. Pokud by se totiž plyny smíchaly dříve, bylo by zde riziko exploze díky extrémní reaktivitě čistého O_2 . Pro tuto metodu se používá ke spalování paliva vysoce čistý kyslík (>90 % O_2 v celkovém objemu). Na výrobu O_2 existuje několik způsobů a výsledná čistota kyslíku závisí právě na metodě, která je zvolena. Tento způsob spalování má největší potenciál ke zlepšení procesu, ale také vyžaduje vysoké provozní náklady [1].

Jednou specifickou variací kyslíkového spalování je technologie známá jako „ředěné kyslíkové spalování“, kde je palivo i kyslík vstřikováno přímo do spalovací komory odděleně. Aby došlo ke vznícení, musí být teplota komory vyšší než samozápalná teplota paliva. V závislosti na geometrii se může dosáhnout téměř neviditelného plamene. Občas je tento jev nazýván jako bezplamenná oxidace („flameless oxidation“) [24]. Výhoda tohoto typu spalování spočívá ve velmi nízkých NO_x emisích, protože teplotní špičky v plameni jsou minimalizovány, čímž se obecně snižují NO_x emise. Jako negativum můžeme vidět, kromě bezpečnosti, také snížený přenos tepla v závislosti na snížené teplotě a emisivitě plamene [1].

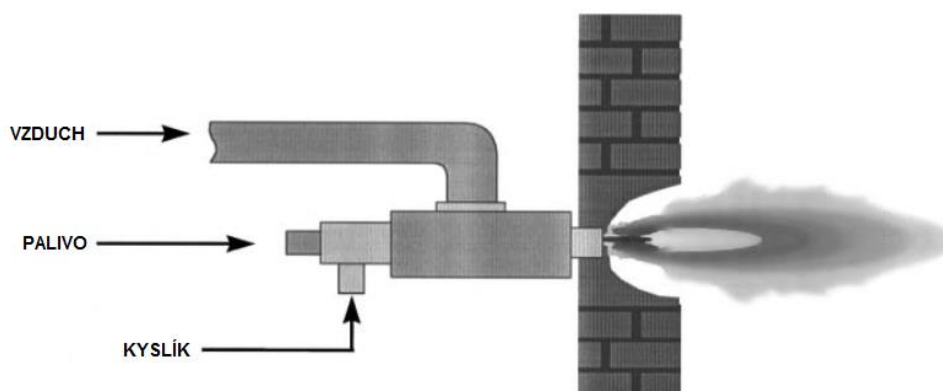


Obr. 4 – Schéma nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem [1].

3.2.4. Metoda IV: samostatný přívod kyslíku a vzduchu do hořáku

Čtvrtá nejběžnější metoda spočívá v odděleném vstřikování vzduchu a O_2 do hořáku (obr. 5). Jedná se o kombinaci předchozích tří metod. Pro tuto metodu nelze použít běžné hořáky uzpůsobené pro spalování paliva s atmosférickým vzduchem, ale je nutné instalovat speciální hořák vhodný pro spalování kyslíku společně s palivem. Jedná se o vysoko úroňové spalování O_2 ve srovnání s metodou I, či metodou II, což poskytuje určité výhody. Navíc jsou podstatně nižší provozní náklady oproti metodě III, kde se používá velké množství O_2 . Tvar plamene a uvolněné teplo mohou být upravovány kontrolovanou regulací přívodu kyslíku do procesu. Většinou se jedná o levnější přizpůsobení hořáku, jelikož mnohé hořáky jsou konstruovány pro spalování dvou typů paliv - plynné a kapalné. Zařízení, tzv. atomizér, pro vstřikování kapalného paliva, který je instalován ve středu hořáku, může být jednoduše vyjmut a nahrazen trysekou pro vstřikování O_2 , nebo hořákem uzpůsobeným pro kyslíkové spalování. Tímto způsobem se může měnit složení oxidačního činidla od čistého O_2 po směs tvořenou určitým podílem vzduchu a O_2 . Pro zjištění celkového množství kyslíku v oxidačním činidle můžeme použít následující vztah [1]:

$$\Omega = \frac{20.9}{0.209(\text{objem. \% } O_2) + (\text{objem. \% vzduchu})} \quad (18)$$



Obr. 5 – Schéma samostatného přívodu vzduchu a kyslíku do hořáku [1].

3.3. Výhody OEC

Vzduch obsahuje přibližně 79 % N_2 a 21 % O_2 v celkovém objemu. Avšak pro spalovací reakce je potřeba pouze kyslík. Dusík se reakce neúčastní a působí jako balast, který se také ohřívá a odebírá vzniklé teplo spolu se spalinami ven z komory. Snížením objemového množství N_2 můžeme dosáhnout mnoha výhod.

3.3.1. Zvýšená produktivita

U většiny tepelných procesů dochází k přenosu tepla prostřednictvím radiace. Radiace je přímo závislá na čtvrté mocnině absolutní teploty tzn., že vyšší teplota dosažená pomocí OEC zvýší radiaci plamene do materiálu. Tím se také zvýší přenos tepla do materiálu, což vede ke zvýšení toku materiálu, který projde systémem. Díky tomu se pro stejné množství materiálů může navrhnout nový, menší systém s totožnou produktivitou. Tato výhoda může být důležitá, pokud jsme omezeni

prostorem. Vzhledem ke zvýšené produktivitě je také důležité, aby byl zbytek systému schopen zvládnout větší rychlost toku materiálu [25].

Pořizovací náklady na OEC jsou obvykle menší, než náklady na přestavbu a rozšíření již existujícího systému. Toto je historicky jeden z nejdůležitějších důvodů pro využití OEC. Metoda OEC může být využívána nepravidelně ke zvýšení produkce v závislosti na zvýšené či snížené poptávce [1].

3.3.2. Vyšší tepelná účinnost

Využitím kyslíku namísto atmosférického vzduchu, odchází více energie do materiálu, protože se produkované teplo neplýtvá na zahřívání N_2 . Energie potřebná k výrobě O_2 ze vzduchu je jen zlomek energie využitě ve spalovacím procesu. V určitých případech jsou náklady na výrobu kyslíku kompenzovány sníženou spotřebou paliva z důvodu lepší tepelné účinnosti. Toto je velmi častý případ, když je OEC použito v procesu, který využívá elektrickou energii, která je obecně dražší než energie získaná spalováním fosilních paliv.

Například ve sklářském průmyslu se jako primární palivo používá olej nebo zemní plyn a obvykle je vše podpořeno dodatečným přísunem elektrické energie. Správným využitím OEC můžou být výdaje za elektřinu zcela eliminovány. Nedávné studie také předpokládají zvýšení cen zemního plynu a naopak snížení ceny kyslíku vlivem zdokonalení technologií na výrobu kyslíku [1].

3.3.3. Zlepšené charakteristiky plamene

Zvýšením koncentrace O_2 v oxidačním činidle se také zvýší meze hořlavosti paliva. To znamená, že plamen může vzniknout ve větším rozptylu podmínek. Pro názornost, plamen směsi vzduch/ CH_4 může existovat stechiometricky mezi 1,3–3,8, avšak plamen směsi O_2/CH_4 může existovat mezi 0,7–18,0. To je důsledkem odstranění N_2 [1].

Kyslíkem obohacené spalování má také vyšší rychlost šíření plamene než při spalování podpořené vzduchem. To znamená, že abychom předešli zášlehům plamene, či zhasnutí plamene, musí být výstupní rychlost plynu u metody OEC vyšší než u metody vzduch/palivo. Kritická hranice rychlostního gradientu pro potrubí kruhového průřezu byla definována jako [26]:

$$g = \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \quad (19)$$

kde \dot{V} je objemový průtok směsi paliva a oxidačního činidla [$m^3 \cdot s^{-1}$],
 R je poloměr potrubí [m].

V tab. 4 jsou znázorněny laminární rychlosti šíření plamene několika plynů [22].

Látka	Symbol	Rychlost šíření plamene [cm/s]
Vodík	H ₂	346
Oxid uhelnatý	CO	20
Metan	CH ₄	43
Etan	C ₂ H ₆	49
Propan	C ₃ H ₈	47
n-Butan	C ₄ H ₁₀	45

Tab. 4 – Hodnoty laminární rychlosti šíření plamene pro některé plyny.

Další výhoda OEC v porovnání se vzduchem je v potřebě menšího množství energie potřebné k zapalování, ke kterému dochází při nižší teplotě. To znamená, že je snazší zapálit plamen při metodě OEC v porovnání s metodou vzduch/palivo. Na druhé straně je to také nevýhoda, protože u OEC systému musí být také zvýšené opatření na bezpečnost. Tato vylepšení zapalování jsou zvláště důležitá pro kapalná a pevná paliva, která je obvykle těžší zapálit v porovnání s plynnými palivy [1].

Metoda OEC může být využita pro kontrolování tvaru plamene. Například promíchaný O₂ s přívodním spalovacím proudem vzduchu může mít za následek zkrácení délky plamene. Kontrola plamene může být prováděna k vyhnutí se přehřívání žáruvzdorných částí nebo ke změně tepelných toků a teplotních profilů ve spalovací komoře [1].

3.3.4. Menší objem spalin

Snížením koncentrace N₂ ve vzduchu lze snížit průtok spalin. Např. ve sklářském průmyslu byl naměřen o 93–98% menší průtok spalin. Alternativně OEC zvyšuje produkci spalovacích systémů, které jsou na hranici jejich kapacity spalin. To by za normálních okolností vedlo k potřebě zvýšit kapacitu spalinových cest, avšak objem spalin se s užitím OEC snižuje a není tak potřeba instalace nových potrubí většího průměru. Další výhodou je, že se se sníženým objemem spalin zvyšuje účinnost již existujících systémů pro jejich zpracování [27].

Vzhledem ke spalovací komoře, snížený objem spalin snižuje průměrnou rychlost plynu téměř o jeden řád. Menší rychlosti plynu unášejí méně jemných částic z odpadu. Jiná potenciální výhoda díky menší rychlosti plynu je, že se prodlouží doba zdržení částic ve spalovací komoře [1].

3.4. Nevýhody OEC

3.4.1. Poškození vyzdívky spalovací komory

Jak již bylo zmíněno, spalování obohacené kyslíkem má za následek vyšší teploty v plameni v porovnání s obvyklým spalováním paliva se vzduchem. Pokud není teplo správně distribuováno, může zvýšená radiace způsobit poškození vyzdívky. Dnes jsou OEC hořáky navrženy tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozložení tepla a nedošlo k poškození vyzdívky v okolí hořáku.

Dalším problémem je zvýšená koncentrace nestálých látek ve spalovací komoře. To je konkrétně problém ve sklářském průmyslu, kde jsou během procesu emitovány korozivní nestálé látky. Odebráním velkého množství N_2 při OEC se velmi zvýší koncentrace těchto látek. To může vést až ke korozivnímu poškození vyzdívky [1].

3.4.2. Nerovnoměrné ohřívání

Zintenzivněním spalovacího procesu pomocí OEC vyvstává možnost nepříznivého ovlivnění přenosu tepla a hmoty ve spalovací komoře. Obecně metoda OEC zvyšuje teplotu plamene, což také zvyšuje tepelný tok pomocí radiace z plamene do materiálu. Pokud dochází k lokálnímu zvýšení radiace, může dojít ve zpracovávaném materiálu k tvorbě velmi horkých míst, tzv. „hot spots“. To může vést k přehřátí a následnému poškození materiálu nebo ke snížení kvality produktu. Aby se vyhnulo těmto problémům, musí být navrženy speciální hořáky určené pro OEC.

Užitím OEC se sníží objemový průtok spalin. Nicméně průměrná teplota spalin je obvykle vyšší, ale ne natolik, aby kompenzovala snížený průtok spalin. Výsledkem je snížený přenos tepla konvekcí ze spalin do materiálu. Jiným důležitým aspektem konvekce je přenos hmoty. V některých ohřevných procesech, zvláště souvisejících s vysoušením nebo odstraněním těkavých látek, může snížený tok spalin ve spalovací komoře negativně ovlivnit proces přenosu hmoty. Toto negativum může být odstraněno užitím hořáku, který zapříčiní recirkulaci spalin v komoře, které zvýší objemový tok uvnitř spalovací komory a pomůžou odstranit těkavé látky, které ulpívají na materiálu během ohřevného procesu [1].

3.4.3. Porucha plamene

V posledních letech je trend navrhnout hořák pro OEC s menší hybností plamene. Tyto plameny mají tendenci být delší a více svítivé než plameny tradičních konvenčních hořáků. Avšak je nutné uvědomit si, že plameny s menší hybností mohou být jednodušeji narušeny než plameny s vysokou hybností [1].

3.4.4. Zvýšené emise znečišťujících látek

Pokud je metoda obohacování kyslíku použita v systému pro spalování vzduchu s palivem, může dojít k zvýšené tvorbě NO_x emisí v důsledku zvýšené teploty plamene, která zvyšuje tvorbu termických NO_x [28].

3.4.5. Zášleh plamene

OEC zintenzivňuje spalovací reakce. Jeden z důsledků této zrychlené reakce je větší riziko zášlehu plamene. Zášleh plamene nastává, když je rychlost plynu opouštějícího hořák menší než rychlost šíření plamene, což způsobuje, že se konec plamene přibližuje k ústí hořáku. Pokud je palivo a oxidační činidlo předem promícháno, může plamen hořet i uvnitř zařízení hořáku a hrozí zde riziko exploze [1].

4. Využití OEC v průmyslu

V mnoha odvětvích průmyslu je spalování vzduchu se zvýšeným obsahem kyslíku považováno za relativně novou technologii. Jsou ale i odvětví, kde je použití OEC technologie každodenní rutinou. Spalování se vzduchem, který je obohacený kyslíkem, může přinést řadu výhod jako je vyšší účinnost, snížené emise, lepší stabilita teploty a přenos tepla, zvýšená produktivita. Různé možnosti nasazení jsou uvedeny v tab. 5 [29].

Průmyslové odvětví	Technologie
výroba oceli	ohřívací pece, předehřev pánví
výroba hliníku	tavení
výroba mědi	tavení a ohřevy pecí
sklářství	tavení
výroba celulózy a papíru	rotační pece, kotle na černý louh
výroba cementu a vápna	rotační pece, kotle na černý louh
rafinerie	procesní ohřivače, odsiřování
elektrárny	uhlím otápěné kotle
chemický průmysl	oxidace, výroba kyseliny sírové

Tab. 5 – Potenciální možnosti použití kyslíkem obohaceného spalování.

4.1. Sklářský průmysl

Ve sklářském průmyslu je metoda OEC velmi rozšířená. Zejména z důvodu snižování emisních limitů, vysokým nárokům na výrobu skla, úspoře paliva a lepší přizpůsobivosti provozu. Použitím metody OEC se sníží množství dusíku vstupujícího do spalovací komory, tím se zvýší účinnost procesu a také se urychlí rychlost produkce skla. Navíc instalace OEC technologie je zpravidla levnější než investice do kompletně nového zařízení. Například společnost Air Products dokázala podle ekonomické studie ušetřit až 4 miliony eur [2]. Navíc také kvalita finálního produktu je u metody OEC o mnoho lepší v porovnání s běžnými technologiemi [9]. Dalším příkladem je společnost AGC Glass Europe z Francie, která využívá technologii kyslíkového spalování s rekuperací tepla. Kyslíkové spalování využívá čistý kyslík místo vzduchu, který se obvykle používá v pecích pro spalování paliva. Vzduch obsahuje 21 % kyslíku nutného pro spalování a 79 % dusíku, který, i když se na spalování nepodílí, snižuje účinnost, což vede ke značnému plýtvání energií. Naopak při kyslíkovém spalování, jež je evropskou premiérou v segmentu plochého skla a o 15 % snižuje spotřebu energie, k takovému plýtvání nedochází [8].

Technologie, která byla vyvinuta ve spolupráci s dodavatelem kyslíku a hořáků, společností Air Liquide, spočívá v rekuperaci tepla ze spalin pro předehřev plynů před jejich vstřikováním do pece. Ve spojení s kyslíkovým spalováním tato světová novinka znamená další úsporu energie o 10 %, tudíž celkem 25 %. Současně s tím dochází i ke snížení emisí do atmosféry: o 12 % CO₂, o 35 % oxidů síry a o 80 % oxidů dusíku [8].

4.2. Kovozpracující průmysl

Jedno z prvních průmyslových odvětví, kde byla použita technologie OEC, bylo zahřívání a tavení kovů a i v dnešní době má metoda OEC v kovozpracujícím

průmyslu velmi důležitou roli. OEC je velmi využívána v ocelárnách k výrobě jak železných, tak i barevných kovů jako je hliník, měď, mosaz [1]. Aplikace OEC má pozitivní dopad na účinnost procesu, úsporu paliva i kvalitu produktu.

Kyslíkopalivové hořáky dokážou zvýšit produktivitu o 5–20 % a také snížit náklady na energii potřebnou k tavení šrotu. Tyto hořáky jsou nejvíce účinné během zahřívání a tavení. U typických hořáků se snižuje účinnost během pozdější fáze tavení (z 60–80 %) na méně než 20 %, protože hoří na plochu roztaveného materiálu. Užitím hořáků s nižší účinností se můžou omezit ztráty výnosu a poškození pece vlivem vyšších teplot.

4.3. Petrochemický průmysl

V dnešní době se společnosti petrochemického průmyslu snaží co nejvíce snížit provozní náklady a emise vznikající z výroby produktů. Hlavní úsilí je snížit emise NO_x . Aby se dosáhlo těchto cílů, začala se v těchto systémech využívat technologie OEC. Metoda spalování vzduchu obohaceného kyslíkem je aplikována zejména u procesních ohřivačů jako je například parní reformer. Kombinací OEC s běžným procesním spalováním se může dosáhnout lepší distribuce tepla do procesu, delší doby chodu, a kvalitnějších chemikálií. Kyslík také může pomoci překonat omezení produktivity hořáku ovlivněné rychlostí průtoku spalin a kapacitou palivového systému.

Společnost Praxair využila technologii OEC, díky které může zvýšit množství vodíku a oxidu uhelnatého vyrobeného parním reformingem metanu. V závislosti na provozních parametrech byla chemická produkce zvýšena o více než 20 % a to za nižších nákladů [30].

4.4. Energetický průmysl

Největší uplatnění OEC je v elektrárnách využívajících jako palivo uhlí. Fosilní paliva totiž obsahují velké množství prvků, které jsou zodpovědné za vyšší emise, jako je například síra, dusík a další. Vstříkáním čistého kyslíku do spalovacího vzduchu můžeme dosáhnout mnoha výhod jako jsou nižší emise, zvýšená účinnost spalování, zvýšená produkce a ovladatelnost procesu. V závislosti na obohacování vzduchu kyslíkem, může dojít ke snížení NO_x ve spalinách až na 20 % původní hodnoty. Největší podíl ve spalinách má CO_2 (přibližně 90 %), který může být znovu využit u spalování. Použití čistého kyslíku přináší nesporně mnoho výhod, nicméně běžné kotle se pro tento typ spalování musí upravit [31].

4.5. Řezání a svařování

Při svařování se jako palivo používá směs kyslíku a acetylenu. Porovnáním s jinými typy paliv zjistíme, jak se liší teplota plamene. Teplota plamene u běžné směsi propanu a vzduchu dosahuje 2 000 °C. U směsi propanu a kyslíku dosahuje plamen teploty 2 500 °C a u směsi kyslíku a acetylenu se může dosáhnout teploty až 3 500 °C. Tento způsob se velmi využívá při svařování potrubí. Oproti obloukovému svařování má tu výhodu, že dochází díky většímu rozptylu koncentrace tepla k pomalejšímu chladnutí svaru. To může pozitivně ovlivnit případné deformace a snížit zbytková napětí ve svaru. Řezání materiálu je založené na stejném principu [32].

5. Bezpečnost při OEC

5.1. Spalovací trojúhelník

Na vytvoření a udržení plamene je zapotřebí přítomnost kyslíku, paliva a zdroje zapálení. Odebráním jakékoliv z těchto tří podmínek zabrání vzniku plamene, či zapříčiní zhasnutí již existujícího plamene (pokud neuvažujeme, že samotný existující plamen může být považován za zdroj zapálení) [33]. Tyto podmínky jsou znázorněny na následujícím obr. 6 ve formě takzvaného spalovacího trojúhelníku [1].



Obr. 6 – Spalovací trojúhelník [1].

5.2. Návrh vypracování

Většina technologií zabezpečujících spalování se skládá ze dvou oddělených částí. První částí je samotný hořák a druhou dodatečné vybavení obvodu, které má na starosti kontrolu hořáku a bezpečnost. Kritickými bezpečnostními problémy jsou například udržení stability plamene, kontrola tvaru a umístění plamene, vyhýbání se nadměrně vysokým teplotám a korozi, minimalizace nežádoucích produktů spalování (emisí) a zabraňování nežádoucímu tavení zbytku pece a příslušenství. Při OEC začíná být důležitá teplota, protože vzrůstá rychlost a také teplota plamene [1].

Kompatibilita materiálu s kyslíkem je vlastnost materiálu hořet nebo naopak nehořet, v prostředí obohaceném O_2 . Kyslík sám o sobě není nebezpečný. Nevyvolává hoření, pokud není přítomné palivo. Nicméně kombinace kyslíku s palivem může být velmi nebezpečná (může způsobit prudké vzplanutí nebo výbuch).

Kritické bezpečnostní problémy, které řeší kontrolní spalovací systém, zahrnují izolaci a kontrolu paliva a oxidantu, zabránění vzplanutí, kontrolu poměru průtoku paliva a průtoku oxidantu, kontrolu plamene, zbavování se hořlavých plynů z uzavřených prostor blízko zapalování či kontrolu zapalování [1].

5.3. Nebezpečí požáru

Nebezpečí požáru může být definováno jako kapalina, produkt, část vybavení, proces, aj., které má potenciál stát se zdrojem vzniku požáru, nebo se na něm podílet. Hlavní nebezpečí požáru je způsobené systémem dodávky paliva z důvodu hrozby úniku paliva do okolního prostředí nebo do atmosféry, kde je téměř vždy přítomný vzduch. Je to bezpečnostní riziko vzhledem k tomu, že je zde možnost

vzniku nekontrolovatelného hoření nebo exploze v závislosti na rozměrech a místě úniku za přítomnosti zdroje zapalování [34].

Velkým nebezpečím je také únik kyslíku využívaného v procesu spalování do okolního prostředí. Je zde nebezpečí vzplanutí kvůli spalování v přívodních trubkách kyslíku a kontrolního zařízení, které je umístěné v blízkosti netěsností. Tradiční bezpečnostní metody při hoření plynného paliva jsou: kontrola meze zápalnosti (vyvarování se akumulaci hořlavých směsí paliva a oxidantu), kontrola zapalování (vyhýbání se zapalování hořlavých směsí plynů), zánik plamene (metoda způsobující ukončení spalování) a kontrola poškození (metoda zahrnuje požár či explozi a minimalizuje potenciální poškození) [1].

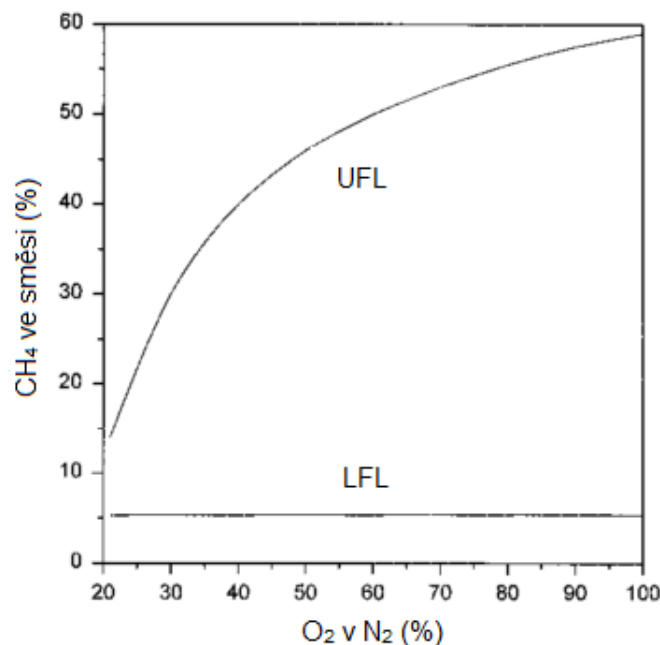
5.4. Kontrola meze zápalnosti

Ve většině spalovacích procesů je hlavním bodem pro zajištění bezpečného procesu vyhýbání se akumulaci hořlavých směsí paliva a oxidantu. Rozlišujeme dvě meze zápalnosti pro plynné spalování. Mezi ně patří dolní mez zápalnosti (L_d) a horní mez zápalnosti (L_h). Dolní mez představuje nejnižší objemovou koncentraci plynu ve směsi se vzduchem, při které po zahřátí na zápalnou teplotu dochází ke vznícení a následnému spalování. Mez L_h vymezuje nejvyšší objemovou koncentraci plynu ve směsi se vzduchem, při které dochází ke vznícení. Hodnoty mezí zápalnosti se běžně uvádějí v obj. % hořlavé látky ve směsi se vzduchem a jsou závislé na teplotě a tlaku. Pro vybrané složky topných plynů jsou hodnoty meze zápalnosti uvedeny v tab. 6 [22].

Látka	L_d [obj. % hořlavé složky]	L_h [obj. % hořlavé složky]
CH ₄	5,00	15,00
C ₂ H ₆	3,00	12,50
C ₃ H ₈	2,12	9,35
C ₄ H ₁₀	1,86	8,41
C ₂ H ₄	2,75	28,60
C ₃ H ₆	2,00	11,10
H ₂	4,00	72,40
CO	12,50	74,20

Tab. 6 – Meze zápalnosti pro směsi hořlavých plynů se vzduchem při 20°C a 101,325 kPa.

Údaje mezí zápalnosti závisí na chemickém chování spalovací reakce, tlaku a teplotě směsi, geometrii a povrchu zařízení, přítomnosti ředidla a mnoha jiných aspektech. Na obr. 7 jsou znázorněné meze zápalnosti pro metan ve vzduchu při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku.



Obr. 7 – Meze zápalnosti pro metan ve vzduchu obohaceném O₂ v závislosti na množství O₂ [1].

Meze zápalnosti pro topné plyny je možné vypočítat ze známého složení plynu a tabelovaných hodnot mezí zápalnosti pro čisté složky. Základní vzorec (20) pro výpočet mezí zápalnosti [22]:

$$L_{(h,d)} = \frac{100}{\sum \frac{C_i}{L_{i(h,d)}} + \frac{n}{100}} \quad (20)$$

kde $L_{(h,d)}$ je horní nebo dolní mez zápalnosti topného plynu [obj. %],
 C_i je koncentrace jednotlivých hořlavých složek i [obj. %],
 $L_{i(h,d)}$ je hodnota horní nebo dolní meze zápalnosti pro složku i [obj. %],
 n je součet koncentrací nehořlavých složek topného plynu (CO₂+N₂+O₂) [obj. %].

Praktické techniky využívající meze zápalnosti jsou založené na prevenci výskytu jakýchkoliv směsí paliva a kyslíku (nebo vzduchu obohaceného o kyslík) v systému s jedinou výjimkou výskytu v hořáku při samotném spalování. Nově nainstalované palivové a kyslíkové trubky jsou obvykle pročištěné inertním plynem (např. dusíkem), aby se zabránilo krátkodobým možnostem vzniku hořlavých směsí, které se mohou vyskytnout během uvedení zařízení do provozu. Uvedení hořáku do provozu je po určitý čas korigované na nízkou rychlost hoření pro minimalizaci množství hořlavé směsi, která může vzniknout jako výsledek neúspěšných pokusů na zapálení hořáku. Zařízení pro kontrolu plamene je propojené s palivovým a kyslíkovým bezpečnostním ventilem, který po detekci zániku plamene odstaví přívod paliva i kyslíku. Vzduchové proudy obohacené o O₂ často obsahují kyslíkový analyzátor (odkázaný na kyslíkové bezpečnostní ventily), aby se zajistilo, že k obohacování kyslíku dochází v bezpečné míře [1].

5.5. Kontrola zapalování

Zapálení směsi paliva a oxidantu, ke kterému dochází v rámci mezí hořlavosti, může být vyvolané několika způsoby: navýšením teploty, dopadem částic, elektrickým výbojem (obloukem nebo jiskrou), prudkým přetlakem, zvukovou rezonancí, samovolnou exotermickou reakcí, třením. Bez ohledu na fyzikální dopad, proces zapalování musí dodat dostatečnou energii a teplotu. V případě OEC systému přítomnost vysoké koncentrace kyslíku vede k nižším nárokům na energii a teplotu, která je potřeba k inicializaci plamene. Kontrola zapalování se snaží o minimalizaci nebo eliminaci všech zdrojů zapalování, které můžou vyvolat nežádoucí požár, respektive výbuch [1].

Klíčovým problémem při návrhu bezpečného zařízení pro kontrolu kyslíkového toku a potrubního systému je rychlost kyslíku v systému. V závislosti na materiálu potrubí existuje maximální rychlostní limit pro plyn, jehož překročení může zapříčinit vznícení. Redukce počtu a velikosti částic v potrubí pro dopravu kyslíku tvoří první a nejdůležitější proces při kontrole. Zařízení na kontrolu toku kyslíku musí obsahovat filtry a síta na minimalizaci počtu a velikosti částic, které jsou potrubím dopravovány [1].

5.6. Kompatibilita s kyslíkem

Výběr materiálu a komponentů pro kyslíkové spalování či spalování s přídavným kyslíkem vyžaduje specifické znalosti. Termín „kompatibilní s kyslíkem“ slouží na popis materiálu, který byl analyzován a schválen pro práci s kyslíkem, nebo pro práci v prostředí obohaceném kyslíkem. V kyslíkových systémech se na označení konstrukčního materiálu podle možností využití používá kyslíkový index materiálu. Kyslíkový index materiálu je definován jako minimální koncentrace kyslíku, vyjádřená jako podíl (objemový) ve směsi kyslíku s dusíkem s ohledem na to, že hoření podporuje pouze kyslík. Bezpečnostní požadavky spojené s kompatibilitou s kyslíkem se skládají z důkladného čištění komponentů a užití bezpečných materiálů. Všechny systémy musí být vyčištěné a musí z nich být odstraněny všechny znečišťující látky, mezi které patří olej, mazivo, rozpouštědlo a jiné částice. Jakékoliv kapaliny použité v systému musí být schválené pro kompatibilitu s kyslíkem [1].

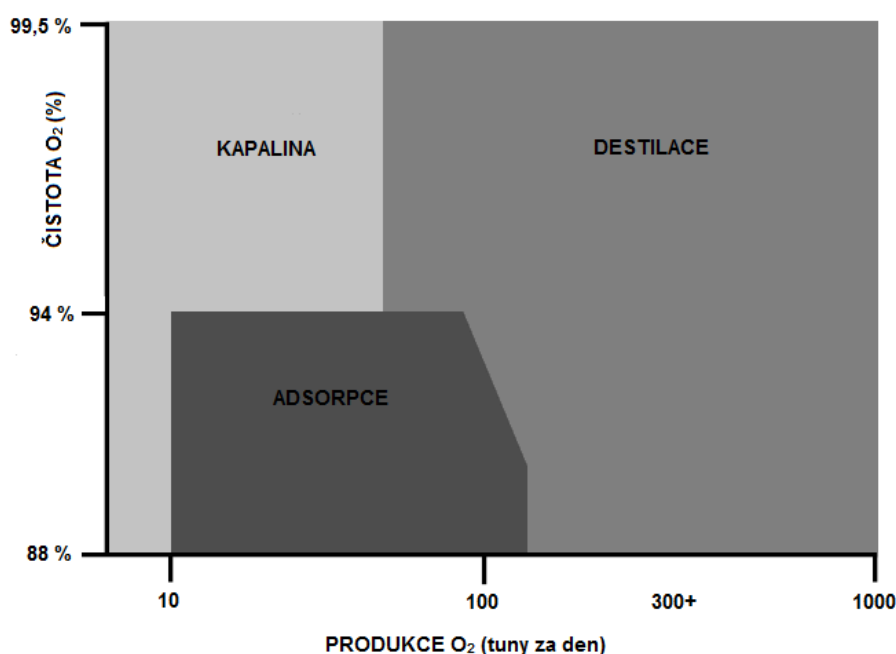
Každý vzduchový systém, kterým je dopravován kyslík, musí být precizně zkontrolován. To zahrnuje testování hořáků, systému dodávky kyslíku a paliva, elektrických systémů, kontrolních systémů, celkového procesu ohřevu, umístění zařízení, jednotlivých procedur v systému, personálu, který bude obsluhovat zařízení a mnohé další faktory, které jsou spjaty s bezpečným chodem zařízení [1].

6. Produkce kyslíku

Dodávka kyslíku se komerčně rozděluje do tří alternativ:

- Dodávka a skladování kyslíku v kapalném formě,
- Systém vakuové adsorpce (VSA) pro dodávku přímo na místě,
- Kryogenní dělení vzduchu pro dodávku přímo na místě.

Na následujícím obr. 8 můžeme vidět přibližný rozsah produkce a čistoty kyslíku pro každou z těchto technologií. Obecně dodávka v kapalném formě je využitelná, pokud je potřeba menší množství kyslíku. Kapalným kyslíkem je vyprodukován v centrálním zařízení a poté distribuován do zásobníku k zákazníkovi. V případě potřeby je kapalným kyslíkem (LO_x) odpařen ve vaporizéru a ohřán na podmínky okolního prostředí. Výhodou tohoto druhu dodávky je, že není potřeba významných investičních nákladů. Nevýhodou je, že cena LO_x je relativně vysoká, protože zahrnuje nejen náklady na výrobu LO_x , ale také náklady na distribuci. Přestože je cena za jednotku LO_x vysoká, je dodávka kapalného kyslíku obecně ekonomicky výhodná pro malé nebo velké množství pro krátký časový úsek. Tímto způsobem může kyslík dosáhnout až 99,5% čistoty a dá se využít v celém rozsahu použití čistoty. Adsorpce má omezený rozsah použití a to mezi 10 až 100 tunami za den nečistého kyslíku. Limit čistoty kyslíku adsorpčního systému dosahuje přibližně 95 % O_2 . Výhodou adsorpce je, že náklady na výrobu jsou významně nižší než u LO_x , ale jsou nutné větší investiční náklady. Produkce kyslíku adsorpcí je ekonomicky výhodná pro technologie, kde je dlouhodobější spotřeba kyslíku a jeho nižší čistota je vyhovující [1]. Kryogenní dělení vzduchu má největší rozsah výrobní kapacity a to od menšího množství až po 3 000 tun za den s čistotou kyslíku 90–99,9 %. Lze vyrobit i kyslík o nižší čistotě, ale obvykle to není potřebné, protože se může samotný kyslík zředit vzduchem. Toto je jediný možný typ produkce kyslíku pro vysoké výrobní požadavky. S rychlým vývojem technologií se hranice produkce neustále mění [1].



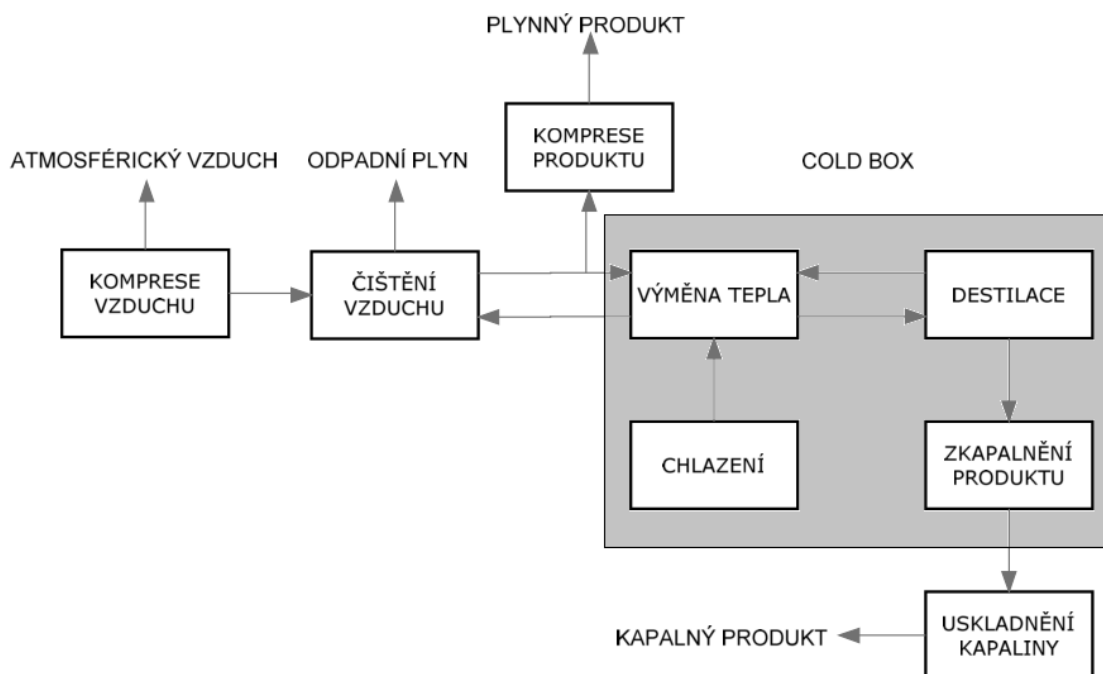
Obr. 8 – Metody produkce kyslíku v závislosti na čistotě a množství [1].

6.1. Kryogenní produkce kyslíku

Jako výchozí produkt kryogenní produkce kyslíku je až 99,5 % čistý kyslík, který může být jednoduše skladován nebo mixován s dalšími plyny. Nejčastější forma tohoto produktu je kapalný kyslík (LO_x). Technologii jednotky separace vzduchu (ASU) můžeme rozdělit do několika základních operací, které jsou:

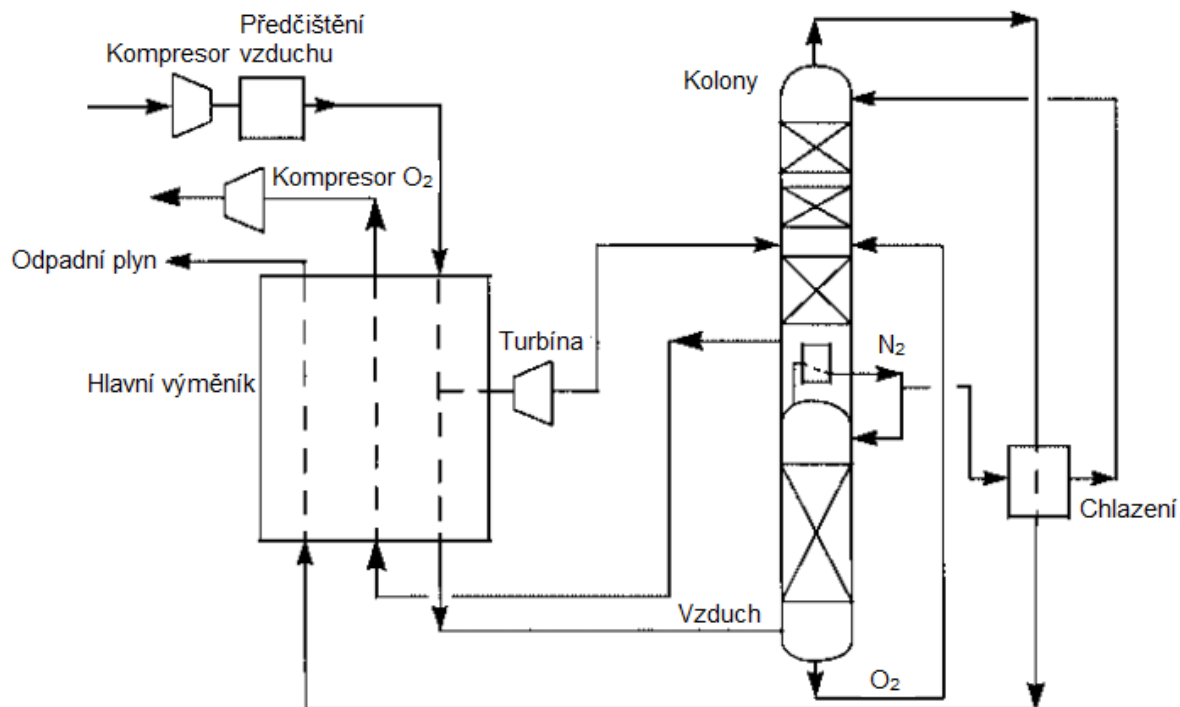
- Komprese vzduchu,
- Předčištění vzduchu z důvodu odstranění CO_2 , vody a některých uhlovodíků,
- Ochlazení vzduchu na kryogenní teplotu, aby mohlo dojít k separaci
- Separace vzduchu na jednotlivé složky,
- Chlazení potřebné k udržení energetické bilance jednotky separace vzduchu,
- Komprese plyných produktů a uskladnění kapalných produktů.

Kryogenní zařízení je obsaženo v izolované struktuře zvané jako „cold box“ z důvodu minimalizace úniku tepla z procesu. Základní schéma technologie můžeme shlédnout na obr. 9.



Obr. 9 – Blokové schéma jednotky separace vzduchu [35].

K lepšímu pochopení procesu můžeme využít obr. 10, na kterém je základní diagram zařízení pro výrobu kyslíku.



Obr. 10 – Diagram jednotky separace vzduchu [1].

Vstupní vzduchový proud je nejprve stlačen (na tlak 550–690 kPa) a ještě před vstupem do kryogenní části jednotky prochází skrz adsorbér, ve kterém dojde k odstranění CO_2 a vody. Je to velmi důležitá část, protože zbytky vody mohou ucpat destilační jednotku. Vzduch je poté ochlazen na teplotu blízkou k rosnému bodu. K ochlazení dochází v tepelném výměníku, kde je jako protiproud použit již čistý kyslík a odpadní plyn vzniklý z procesu. Ochlazený vzduch poté prochází do destilačního systému. V první koloně (vysokotlaké koloně) pracující za lehce nižšího tlaku než byl u kompresoru vzduchu, dochází k hrubé separaci dusíku ze vzduchu. N_2 je těkavější látka a proto se koncentruje v podobě páry v horní části kolony. Tento dusíkem obohacený proud odchází horní částí a je následně zkondenzován. Poté je přiváděn v podobě refluxu zpátky do vysokotlaké kolony a další kolony pracující za nižšího tlaku. V nízkotlaké koloně je proud obohacený kyslíkem, který odešel dolní částí vysokotlaké kolony, dále zpracováván. V dolní části této kolony pak odchází proud o vysoké čistotě kyslíku a výsledný produkt odchází v podobě páry do výměníku, kde se dále ohřívá. Kapalným refluxem pro nízkotlakou kolonu může být podchlazen pomocí proudů odpadního plynu vycházejícího z horní části kolony. Část proudů vzduchu je oddělena v hlavním výměníku, expanduje v turbíně a generuje chlad potřebný v kolonách. Výsledný produkt kyslíku vycházející z výměníku je následně stlačen na požadovaný tlak.

6.2. Adsorpce

V adsorpčních systémech se používá pevná látka nazývaná sorbent pro separaci kyslíku ze vzduchu. Integrace mezi plynem a molekulami adsorbentu je zapříčiněna fyzikálními silami. Vzduch je přiveden do lože adsorbentu, kde se zachytí především dusík a kyslík prochází skrz nezachycen. Regenerace lože je konána snížením tlaku na lože pomocí vývěvy a čištěním ve vakuu proudem plynu obohaceném o O_2 z dalšího lože. Jakmile je regenerace dokončena, tlak na lože je obnoven a cyklus se opakuje. Proces používá dvě lože adsorbentu, takže jedno lože je ve fázi produkce a druhé ve fázi regenerace. Tímto způsobem je zaručena nepřetržitá produkce.

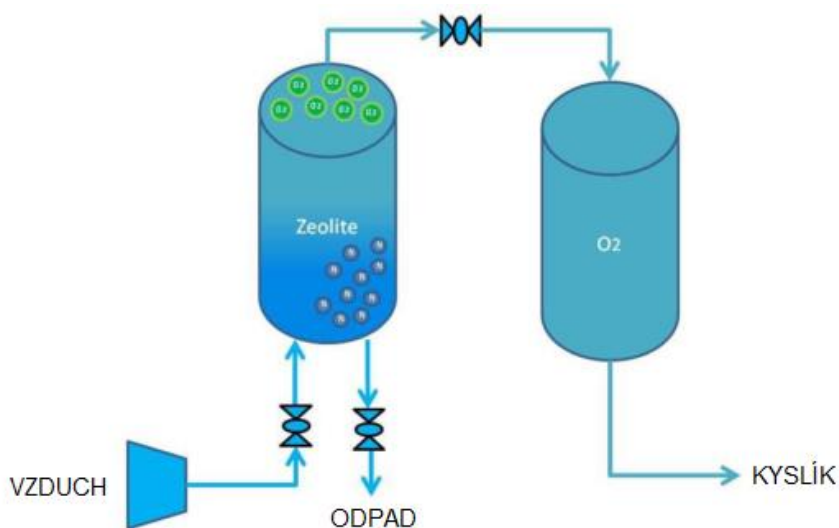
Základní princip procesu tedy je, že se dusík přichytí na materiál adsorbentu za vyššího tlaku a později se uvolní za tlaku nižšího. Za stálého tlaku se dusík přichytí na adsorbent, když je koncentrace plynu v prostoru vysoká a uvolní se, když je koncentrace plynu v prostoru nízká. Lože adsorbentu se skládá ze dvou materiálů. V dolní části je vrstva pro odstranění CO₂ a vody ze vstupního proudu. Voda společně s oxidem uhličitým je pak odstraněna z lože během fáze regenerace. Zbytek lože je pak tvořen síty, která jsou zodpovědná za odstranění dusíku. Nejběžněji užívaný materiál je gel na bázi křemíku, protože má velmi dobré vlastnosti v zadržování vody. Tyto adsorbenty dokážou na svém povrchu zachytit velké množství molekul. Celková plocha jejich povrchu může dosáhnout až 500 m²/g. Proces adsorpce můžeme rozdělit do několika kroků. Každý krok je charakterizován rozdílným tlakem na lože adsorbentu. Tlak je zvyšován a snižován během celého cyklu produkce kyslíku a regenerace materiálu adsorbentu.

Obecně jsou tři základní principy adsorpce, které jsou velmi rozšířeny a využívány v průmyslu:

1. Adsorpce za změny tlaku vzduchu (PSA),
2. Adsorpce za změny tlaku ve vakuu (VSA),
3. Adsorpce za změny tlaku vzduchu i vakua (VPSA).

6.2.1. Adsorpce za změny tlaku vzduchu

Tato technologie používá k separaci dvě jednotky. Je zde důležitý vysoký tlak plynu pro akumulaci molekul. Čím vyšší tlak, tím větší koncentrace molekul v prostoru. Když dojde ke stavu, kdy se koncentrace molekul již nezvyšuje, je vstupní proud vzduchu přeměřován do druhé jednotky, zatímco v první jednotce dochází k poklesu tlaku a regeneraci lože. To znamená, že naakumulovaný plyn je vypuštěn a uskladněn v zásobníku. Metoda PSA je často využívána z důvodu přijatelného poměru čistoty a ceny. Mezi typické materiály používané u této technologie patří aktivní uhlí, gel na bázi křemíku, zeolit, aluminium. Variací velikosti povrchů různých adsorbentů se dokážou zachytit odlišné molekuly. Schéma PSA je zobrazeno na obr. 11 [36].



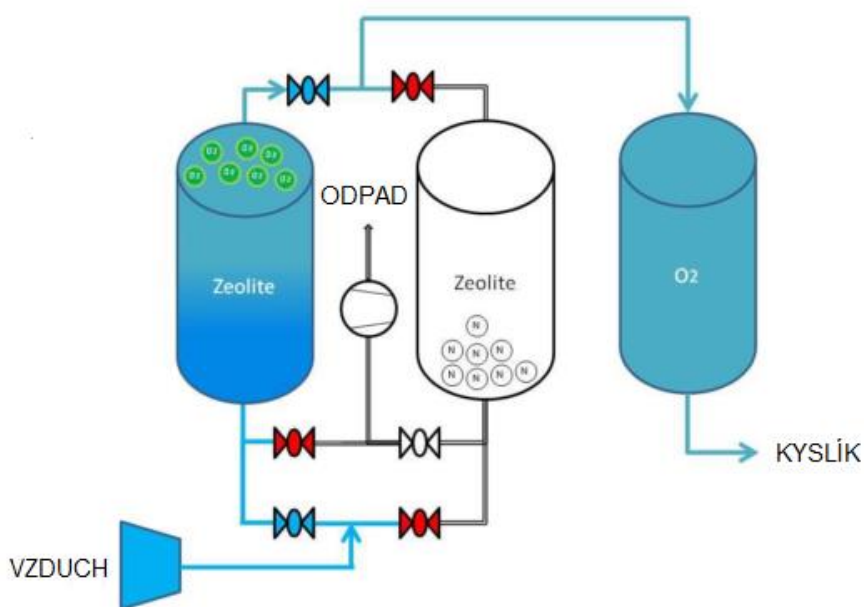
Obr. 11 – Schéma adsorpce za změny tlaku vzduchu.

6.2.2. Adsorpce za změny tlaku ve vakuu

Základní princip metody VSA je stejný jako u PSA. Dvě jednotky, které se vzájemně střídají v produkci. Jedna produkuje kyslík a zachytává ostatní složky plynu, zatímco druhá prochází regenerací. Hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi je, že VSA čerpá plyn do separačního procesu ve vakuu. Adsorpce za změny tlaku ve vakuu také pracuje za tlaku a teploty okolního prostředí. V procesu kde dochází k oddělení dusíku a kyslíku je vakuum docíleno ventilátorem. Ve srovnání s PSA má VSA vyšší účinnost, protože pracuje na nejstrmější části izotermy a má potenciál k extrakci většího množství kyslíku. Absence kompresoru vzduchu se také zobrazí v nižších provozních nákladech. Navíc jednotka má nižší nároky na údržbu, protože pracuje v menším rozsahu tlaků. To také pomůže k zabránění kondenzace vody na sítích, a proto může být VSA použito ve vlhkém prostředí a není potřeba instalovat speciální zařízení ke snížení obsahu vody ve vzduchu.

6.2.3. Adsorpce za změny tlaku vzduchu i vakua

VPASA kombinuje pozitiva PSA a VSA. Systém může pracovat s jednou nebo dvěma jednotkami. V systému s jedním ložem je vzduch nejprve stlačen kompresorem a poté proudí skrz lože adsorbentu. Když se musí lože regenerovat, je produkce kyslíku zastavena, tlak v jednotce klesne a vyrobený kyslík je dopraven do zásobníku. Odpadní plyn odchází ven ze zařízení do atmosféry. Při použití dvou jednotek, jsou lože střídavě ve stavu produkce a regenerace. Tlak v jednotkách se mění od přetlaku po vakuum. Na obr. 12 můžeme vidět schéma zařízení VPASA [36].



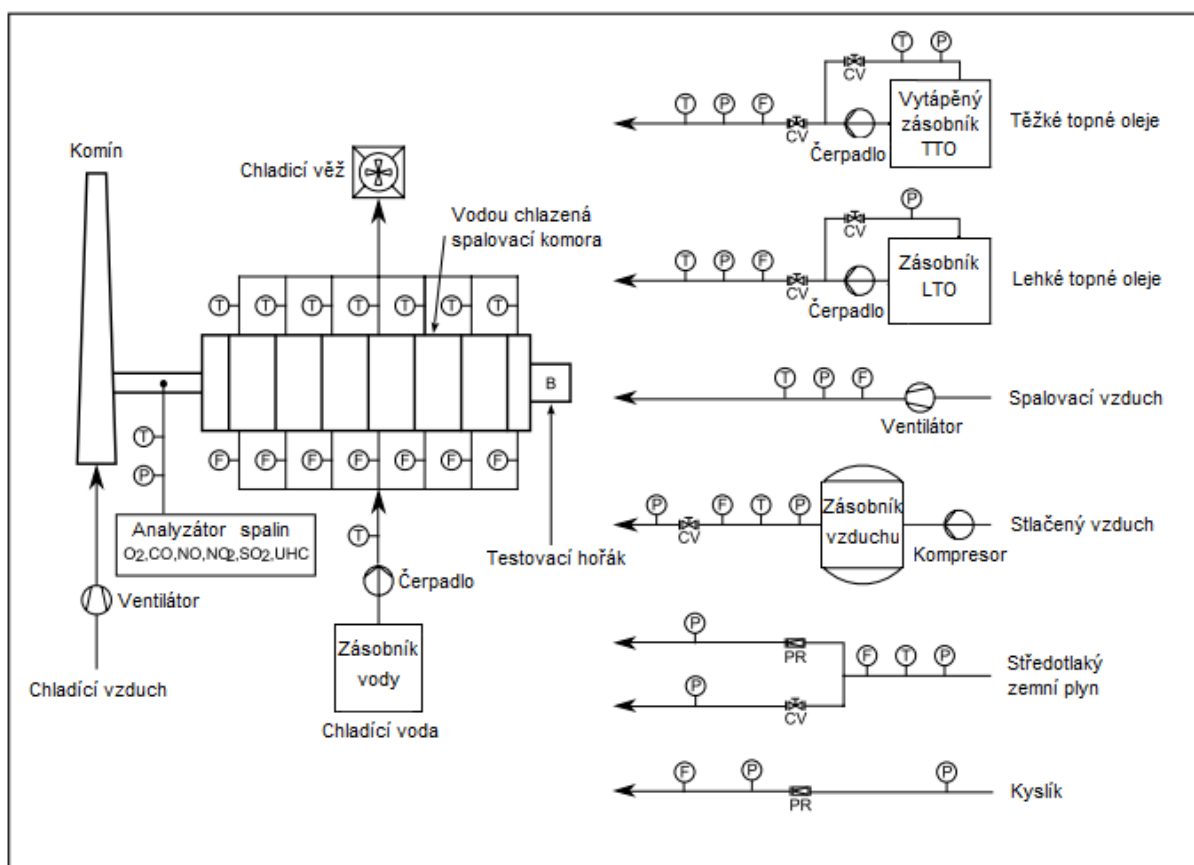
Obr. 12 – Schéma adsorpce za změny tlaku a vakua.

7. Experimentální část

Během zkoušek byl posuzován vliv 21–46 % koncentrace kyslíku na NO_x emise, teplotu spalin, tepelný tok do stěn spalovací komory, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory a také tvar a rozměry plamene. Byly provedeny spalovací testy s využitím metod přidávání O_2 do vstupního vzduchového proudu (dále zkráceně jako AE), samostatným přívodem kyslíku a vzduchu do hořáku (dále zkráceně jako AO) a vstříkovaní O_2 do plamene (dále zkráceně jako OL) při výkonu 750 kW pro dva spalovací režimy – jednostupňové a dvoustupňové spalování paliva. Koncentrace kyslíku v suchých spalinách byla udržována kolem hodnoty 3 % obj..

7.1. Experimentální zařízení

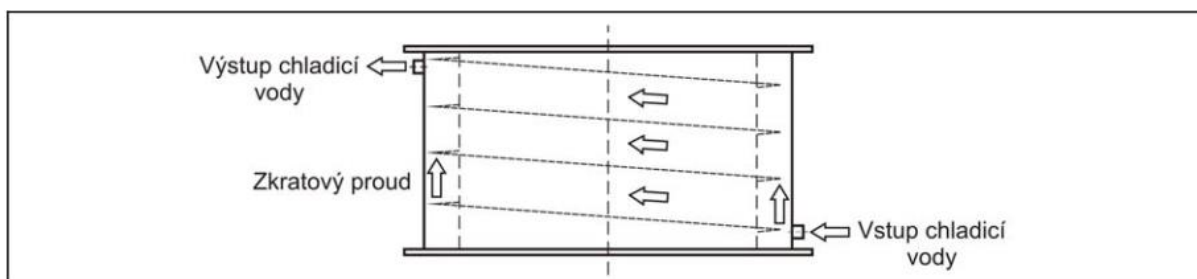
Experimentální data byla získána na testovacím zařízení na zkušebně hořáků ÚPEI. Technologie je navržena pro instalaci hořáků na plynná a kapalná paliva do maximálního výkonu 1,8 MW. Schéma zkušebny hořáků je uvedeno na obr. 13.



Obr. 13 – Schéma zkušebny hořáků.

Klíčovým aparátem tohoto zařízení je dvouplášťová, horizontální, vodou chlazená spalovací komora o vnitřním průměru 1 m a variabilní délce 2 až 4 m. Čela spalovací komory jsou izolována vysokoteplotní vláknitou vyzdívkou o tloušťce 100 mm. Vnitřní plášť spalovací komory není ze strany plamene nijak izolován, je pouze chlazen vodou. Cirkulující chladicí voda je čerpána ze zásobníku s kontinuálním dopouštěním a po průchodu spalovací komorou, kde dojde k jejímu oteplení, je vedena na chladič věž. Po ochlazení v chladič věži je voda svedena zpět do zásobníku [38].

Chlazení spalovací komory umožňuje částečně simulovat podmínky podobné podmínkám v ohřevných pecích procesního průmyslu. Meziplášťový prostor spalovací komory je rozdělen na sedm samostatných sekcí, ve kterých proudí chladicí voda. Délka prvních šesti sekcí je 0,5 m, poslední sekce má délku 1 m. Pro usměrnění toku chladicí vody a tím i k rovnoměrnému obtékání celého ochlazovaného povrchu je v meziplášťovém prostoru použita šroubovice. Kdyby nebyla šroubovice použita, docházelo by k nerovnoměrnému odvodu tepla z určitých částí pláště komory. Tímto způsobem dochází k nucenému oběhu vody. Z výrobního hlediska nebylo možné přivařit šroubovici k vnitřnímu i vnějšímu plášti. Šroubovice byla tak přivařena pouze k vnitřnímu plášti, čímž mezi vnějším pláštěm a okrajem šroubovice vznikla štěrbina (o výšce 5 mm), kterou proudí tzv. zkratové proudy znázorněné na obr. 14 [39].



Obr. 14 – Schéma šroubovice a zkratových proudů.

Každá sekce je vybavena senzory teploty a průtoku vody. To nabízí možnost vyhodnotit přenos tepla do stěny spalovací komory po délce plamene. Dalším pozitivním efektem rozdělení meziplášťového prostoru do sekcí je zlepšení cirkulace vody, čímž se snižuje riziko vzniku lokálního varu. Spalovací komora je opatřena podélně inspekčními otvory ve vzdálenosti 0,5 m od sebe, tj. osm inspekčních otvorů na každé straně, a dvěma inspekčními otvory na protilehlém čele, kterými lze pozorovat plamen na hořáku. Inspekční otvory mohou být dále využity k instalaci přídatné měřicí techniky, např. termočlánky, radiační sondy atd..

Podtlak ve spalovací komoře je udržován pomocí ejektoru, který je umístěn ve spodní části komína. Jako hnací médium je používán vzduch přiváděný vysokotlakým ventilátorem doplněným o frekvenční měnič. U zařízení je možné dosáhnout podtlaku až -600 Pa. Ejektor dále plní funkci chlazení spalin odcházejících ze spalovací komory.

Spalovací vzduch je přiváděn k hořáku vzduchotechnickým potrubím o čtvercovém průřezu. Maximální výkon ventilátoru je přibližně 2700 m³/h při maximálním přetlaku 7 kPa. Na potrubí je umístěno snímání teploty, tlaku a průtoku vzduchu. Samotné napojení hořáku je řešeno přechodovým kusem mezi přírubami. V současné době není možné spalovací vzduch přehřívát.

Do prostoru zkušebny je přiveden středotlaký zemní plyn o přetlaku cca 100 kPa a kapacitě 250 m³/h. Plyn prochází plynoměrem, který slouží pro měření spotřeby plynu zkoušeného hořáku a pro výpočet a nastavování výkonu hořáku. Přívod zemního plynu pro výkonové hořáky je řízen regulačním ventilem. Kromě hořáků na plynná paliva umožňuje zkušebna rovněž zkoušky hořáků na lehké a těžké topné oleje.

Zkušebna je vybavena sofistikovaným systémem pro sběr dat a bezpečnostním systémem. Systém pro sběr dat umožňuje jednak automatický sběr dat po vteřině nebo po dvou minutách, a jednak zápis dat na povel operátora. Systém sbírá data všech měřených veličin zahrnující průtoky spalovacího vzduchu, paliva a chladicí vody, teploty spalovacího vzduchu, paliva a chladicí vody, tlaky v přívodních potrubích a složení a teplotu spalin na výstupu ze spalovací komory. Všechny měřené a dopočítané veličiny řídicí jednotkou pak lze odečíst i z ovládacího panelu. Úkolem bezpečnostního systému je zajistit bezpečný a spolehlivý chod zkušebního zařízení s využitím informací od čidel, umožňuje zabránit např. přehřátí chladicí vody. Součástí systému je zabezpečovací souprava určená k zapalování a ionizačnímu hlídání plamene plynového hořáku. Hořák je vybaven jednou společnou elektrodou pro hlídání i zapalování (tzv. jednoelektrokový systém). Souprava je umístěna ve skříni, ovládací a signalizační prvky jsou na dveřích skříně. V případě utržení plamene nebo jeho vzdálení se od elektrody dojde k zániku ionizovaného prostředí a relé hlídače plamene se rozepne [38].



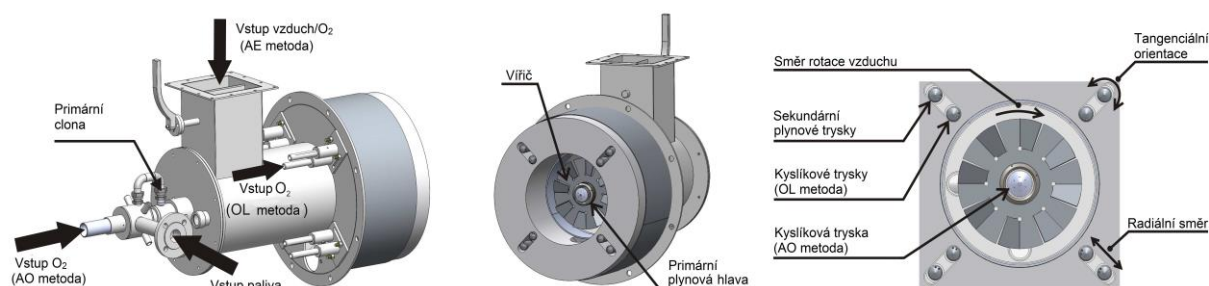
Obr. 15 – Zkušebna hořáků na ÚPEI.

Na komoře je umístěno snímání tlaku uvnitř komory. Na kouřovodu je měřena teplota spalin a je zde umístěna sonda pro odběr spalin pro analýzu. Sonda je napojena hadicí na analyzátor spalin Testo 350-XL. Před vstupem spalin do analyzátoru je ze spalin odstraněna voda. Analyzační box Testo 350-XL je vybaven elektrochemickými čidly pro stanovení koncentrace O_2 , CO , CO_2 , NO a NO_2 .

7.2. Hořák

Pro účely spalovacích zkoušek byl použit hořák s dvoustupňovým přívodem zemního plynu a jednostupňovým přívodem spalovacího vzduchu, jehož 3D model je zobrazen na obr. 16. Jedná se o difuzní typ hořáku, tj. palivo se spalovacím vzduchem jsou přiváděny do spalovacího prostoru odděleně a nejsou přimíseny před vlastním spalováním. Do prostoru spalovací komory vstupuje spalovací vzduch centrální vzduchovou trubicí, na kterou navazuje hořáková tvarovka, tzv. hořákový kámen. Vnitřní průměr hořákového kamene je 300 mm, vnější průměr je 600 mm.

Přívod paliva je tvořen dvanácti primárními tryskami a osmi sekundárními tryskami. Primární trysky jsou vyvrtané v primární hlavě a jsou rozmístěny ve dvou kruhových polích. První sada je tvořena čtyřmi tryskami o průměru 3 mm, druhá sada je tvořena zbývajících osmi tryskami o průměru 2,6 mm. Maximální výkon primárního stupně je regulován vyměnitelnou primární clonou různých průměrů. Omezovací clona je umístěna před vstupem do hořáku, jak je znázorněno na obr. 16.



Obr. 16 – 3D model hořáku s dvoustupňovým přívodem paliva.

Sekundární přívod plynu byl zajištěn čtyřmi tryskami s úhlem sklonu hlavy 30°. V každé hlavě byly vyvrtány dvě díry, každá o průměru 3,3 mm. Hořák je zkonstruován tak, aby bylo možné změnit polohu sekundárních trysek vzhledem k hořákovému kameni v tangenciálním i radiálním směru. Referenční tangenciální poloha trysky odpovídá poloze, při které jsou trysky orientované přímo do osy hořáku. Orientaci lze měnit buď po směru hodinových ručiček (ve směru víření plamene – pozitivní úhel) nebo proti směru hodinových ručiček (negativní úhel). V referenční radiální poloze je vzdálenost sekundárních trysek od osy hořáku 180 mm a může být zvětšena až o 50 mm. V případě režimu dvoustupňového přívodu paliva byly sekundární trysky natočeny +20° a jejich radiální vzdálenost byla nastavena na maximum (230 mm). Technické výkresy clony, poutače plamene, hlavy hořáku a sekundární trysky hořáku jsou obsaženy v příloze A I–A IV.

Hořák je osazen poutačem plamene typu vířič. Vířič se skládal z osmi lopatek a byl namontovaný na centrální hořákové trubce. Vířič uděluje proudu spalovacího proudu tangenciální složku rychlosti, tj. zajišťuje turbulentní proudění spalovacího vzduchu a tím podporuje intenzivní promíchávání primárního plynu se spalovacím vzduchem. Kromě toho také zabraňuje utržení či zhasnutí plamene. Pro zapálení plamene byl použit hořák o výkonu cca 20 kW s přirozeným přívodem vzduchu spalující zemní plyn.

7.3. Kyslík

Kyslík byl uložen v kryogenní nádobě při tlaku 20 MPa a teplotě -196 °C. Během zkoušek spalování byl tento zásobník umístěn mimo zkušebnu hořáků pro zajištění bezpečnosti v případě úniku či jiných problémů. Ze zásobníku byl kyslík odveden do výparníku (obr. 17a), kde se plyn ohřál a změnil své kapalně skupenství na plynné. Poté plyn proudil do měřicího panelu, pomocí kterého se korigoval průtok a tlak O₂ (obr. 17b). Během zkoušek byly použity dva různé měřicí panely. První panel byl vybaven dvěma průtokoměry s rozsahy 1–10 m³/h a 5–50 m³/h. Na druhém panelu byl instalován průtokoměr o rozsahu 40–400 m³/h.



Obr. 17 – a) Výparník, b) měřicí panel.

7.4. Plán zkoušek

V tab.7 je uvedena matice spalovacích zkoušek. Všechny zkoušky byly provedeny pro tepelný výkon 750 kW a koncentrace kyslíku v suchých spalínách byla udržována na 3 % obj.. Spalovací zkoušky se skládaly ze tří testů. V prvním testu (označován jako TEST A) bylo pozorování zaměřeno na kvalitu spalování a vlastnosti plamene. V druhém z testů (označován jako TEST B) se pozornost soustředila na vyhodnocení tepelných toků do stěn jednotlivých sekcí spalovací komory. Na rozdíl od prvního testu byl TEST B proveden pouze pro vybrané průtoky kyslíku, konkrétně 0, 20, 40, 80 a 120 m^N³/h. TEST C byl zaměřen na rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory a to pro průtoky kyslíku 0, 20, 40, 60 a 80 m^N³/h. Data měřených veličin se automaticky ukládala do systému (uložená data jsou součástí DVD) a manuálně zapisovala do měřicích listů. Vzor měřicích listů je ukázán v příloze A V.

Spalovací zkoušky byly zaměřeny na výzkum vlivu koncentrace kyslíku 21–46 % na emise NO_x, teplotu spalin, distribuci tepelného toku do stěny spalovací komory po délce plamene, vlastnosti plamene a také rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory. Pro zkoušky AE metody platilo, že koncentrace kyslíku pohybující se mezi 21–46 % přímo odpovídala koncentraci kyslíku ve spalovacím vzduchu. V případě zkoušek AO a OL metody platilo, že koncentrace kyslíku v přívodním vzduchovém potrubí byla vždy 21 %. Proto zde pojem koncentrace 21–46 % vyjadřuje koncentraci kyslíku ve spalovacím vzduchu jako kdyby celé množství kyslíku (kyslík ve spalovacím vzduchu + kyslík injektovaný přímo do plamene) bylo dodáno přivedeným spalovacím vzduchem.

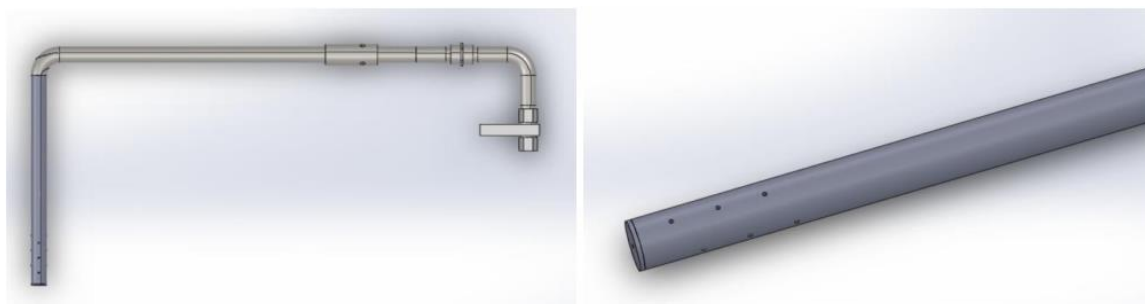
Tato experimentální činnost navazuje na předešlé výzkumy OEC technologie, které byly provedeny v minulých letech na zkušebně hořáků ÚPEI [37], [39], [40].

Typ testu	Průtok vysoce čistého kyslíku O ₂ [m ^N ³ /h]/ O ₂ koncentrace ve vzduchu [%]									
	0/21	5/21,5	10/22	20/23,1	30/24,3	40/25,6	60/29	80/33	100/38	120/46
TEST A										
AE metoda										
750 kW jednostupňový	•	•	•	•	•	•	•	•	–	–
750 kW dvoustupňový	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
AO metoda										
750 kW jednostupňový	•	•	•	•	•	•	•	•	•	–
750 kW dvoustupňový	•	•	•	•	•	•	•	•	•	–
OL metoda										
750 kW jednostupňový	•	•	•	•	•	•	•	–	–	–
750 kW dvoustupňový	•	•	•	•	•	•	•	•	–	–
TEST B										
AE metoda										
750 kW jednostupňový	•	–	–	•	–	•	–	•	–	–
750 kW dvoustupňový	•	–	–	•	–	•	–	•	–	•
AO metoda										
750 kW jednostupňový	•	–	–	•	–	•	–	•	–	–
750 kW dvoustupňový	•	–	–	•	–	•	–	•	–	–
OL metoda										
750 kW jednostupňový	•	–	–	•	–	•	–	–	–	–
750 kW dvoustupňový	•	–	–	•	–	•	–	•	–	–
TEST C										
AE metoda										
750 kW jednostupňový	•	–	–	•	–	•	•	•	–	–
750 kW dvoustupňový	•	–	–	•	–	•	•	•	–	–
AO metoda										
750 kW jednostupňový	•	–	–	•	–	•	•	•	–	–
750 kW dvoustupňový	•	–	–	•	–	•	•	•	–	–
OL metoda										
750 kW jednostupňový	•	–	–	•	–	•	•	–	–	–
750 kW dvoustupňový	•	–	–	•	–	•	•	•	–	–

Tab. 7 – Plán experimentů (• označuje, že test byl proveden pro daný průtok O₂).

7.4.1. Přívod kyslíku při metodě AE

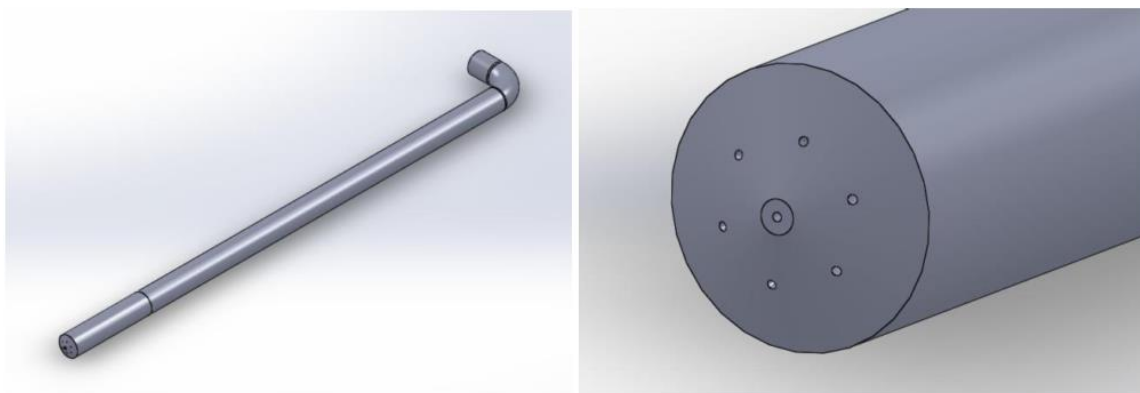
Pro zajištění adekvátního promísení byl vysoce čistý kyslík vstříkván skrz difuzor do přívodního proudu spalovacího vzduchu (příloha A VI). Difuzor byl umístěn do potrubní trasy vzduchu ještě před vstupem do hořáku. Aparát byl navrhnut pro maximální průtok kyslíku 160 m^N³/h při přetlaku 6 bar. V těle difuzoru je vyvrtáno celkem 13 děr o průměru 2,1 mm, přičemž 12 děr je srovnáno v šesti řadách, tedy jedna řada má dvě díry (každá následující řada je pootočena o 90°) a jeden otvor je umístěn v uzavřeném konci difuzoru. Na obr. 18a je zobrazen 3D model difuzoru s přívodní trubicí a ventilem. Detail difuzoru je pak znázorněn na obr. 18b.



Obr. 18 – a) 3D model difuzoru, b) detail koncové části difuzoru.

7.4.2. Přívod kyslíku při metodě AO

U této metody byl vysoce čistý kyslík vstříkován přímo do plamene skrz trysku, která byla umístěna v plynové trubce hořáku (viz obr. 16). Zbývající množství kyslíku potřebného pro dokonalé spalování bylo přivedeno proudem spalovacího vzduchu. V koncové části trysky je vyvrtáno celkem 7 otvorů o průměru 2,7 mm, kde 6 otvorů je umístěno symetricky v kruhu okolo sedmého otvoru, který je vyvrtán přímo ve středu tryskové hlavy. Tryska byla navržena pro maximální průtok kyslíku 120 m^N³/h při přetlaku 6 bar. 3D model kyslíkové trysky je zobrazen na obr. 19a, detail koncové části hlavy trysky je pak znázorněn na obr. 19b. Technický výkres tryskové hlavy je v příloze A VII.



Obr. 19 – a) 3D model kyslíkové trysky, b) detail koncové části trysky.

7.4.3. Přívod kyslíku při metodě OL

V případě této metody byl vysoce čistý kyslík vstříkován přímo do plamene pomocí čtyř trysek umístěných v blízkosti sekundárních plynových trysek v radiální vzdálenosti 180 mm od osy hořáku (viz obr. 16). V každé hlavě trysky byly vyvrtány dva otvory o průměru 2,6 mm. Otvory byly dimenzovány tak, že maximální průtok kyslíku všemi tryskami byl navržen na 150 m^N³/h při přetlaku 6 bar. Úhel sklonu hlavy trysky byl 20°. Trysky byly natočeny o +30°, tj. o +10° více než sekundární plynové trysky. Důvodem většího natočení trysek bylo zajištění kvalitního promíchávání kyslíku zejména se sekundárním palivem.

8. TEST A

Tento test byl zaměřen na kvalitu spalování a vlastnosti plamene. Sledovanými parametry byly koncentrace NO_x , teplota spalin, tvar a stabilita plamene.

8.1. Koncentrace NO_x

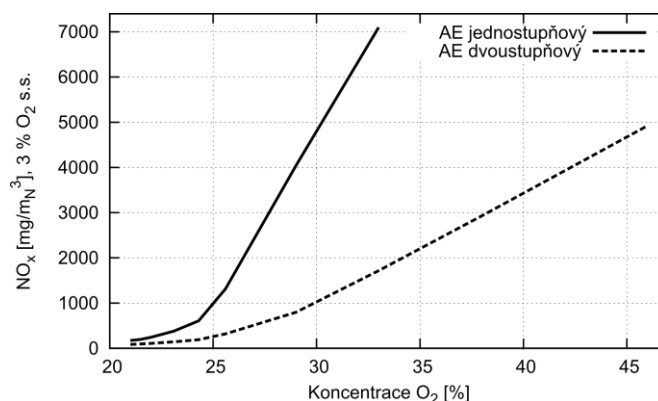
8.1.1. Metoda AE

V tab. 8 jsou shrnuty dosažené výsledky při využití AE metody. Výsledky zahrnují celkovou koncentraci O_2 ve spalovacím vzduchu, průtok O_2 , množství NO , NO_2 (naměřené), NO_x (dopočítané), charakteristiku plamene (délka a průměr) a teplotu spalin.

Režim	Celková konc. O_2 [%]	Průtok O_2 [$\text{m}_\text{N}^3/\text{h}$]	NO (naměř.) [ppm]	NO_2 (naměř.) [ppm]	NO_x (dopoč.) [$\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$]	Délka plamene [m]	Průměr plamene [m]	Teplota spalin [$^\circ\text{C}$]
jednostupňový	21,00	0	82	1,7	171	2,25	0,6	743
jednostupňový	21,50	5	93	2,0	195	2,25	0,6	755
jednostupňový	22,00	10	114	4,0	242	2,40	0,6	766
jednostupňový	23,10	20	180	5,7	381	2,50	0,6	761
jednostupňový	24,30	30	283	8,3	600	2,75	0,6	758
jednostupňový	25,60	40	625	11,7	1107	2,80	0,6	745
jednostupňový	29,00	60	1687	22,3	3511	3,10	0,6	743
jednostupňový	33,00	80	3436	51,5	7099	3,10	0,6	748
dvoustupňový	21,00	0	36	4	82	2,30	1,0	699
dvoustupňový	21,50	5	41	4,7	92	2,50	1,0	707
dvoustupňový	22,00	10	47	5,0	105	2,50	1,0	708
dvoustupňový	23,10	20	65	6,0	145	2,25	1,0	709
dvoustupňový	24,30	30	98	6,7	199	2,25	1,0	708
dvoustupňový	25,60	40	148	8,3	316	2,50	1,0	705
dvoustupňový	29,00	60	380	8,7	800	2,75	1,0	689
dvoustupňový	33,00	80	828	17,0	1724	3,00	1,0	681
dvoustupňový	38,00	100	1454	23,0	2949	3,00	1,0	665
dvoustupňový	46,00	119	2338	43,7	4892	2,70	1,0	673

Tab. 8 – Shrnutí výsledků TESTU A – metoda AE.

Na obr. 20 je znázorněna koncentrace NO_x ($\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$) ve spalinách v závislosti na koncentraci kyslíku. Hlavní podíl na celkovém množství NO_x mají termické NO_x v důsledku vyšší teploty v plameni, což způsobuje vyšší koncentrace O_2 .



Obr. 20 – Vliv koncentrace O_2 na množství NO_x u metody AE.

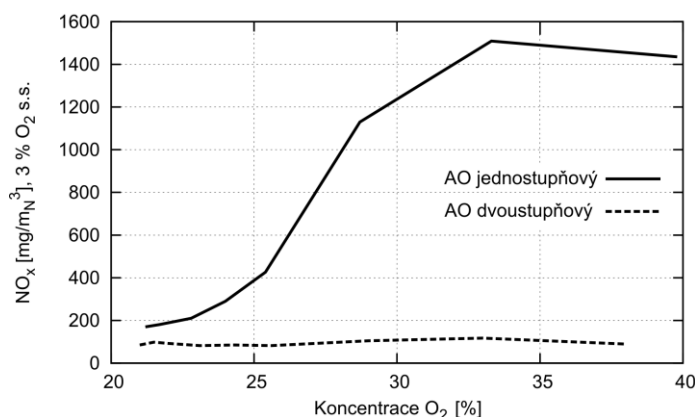
V případě zkoušek s AE metodou je možné pozorovat exponenciální závislost na teplotě. Právě díky této závislosti vyvolalo i malé navýšení koncentrace O₂, a tedy i teploty, rychlou tvorbu NO_x. Při jednostupňovém spalování došlo při AE zkouškách k prudkému nárůstu emisí NO_x ze 170 mg/mN³ na 7000 mg/mN³ při zvýšení koncentrace kyslíku z 21 % na 33 % (hodnota odpovídá průtoku 80 mN³/h). Další zvyšování koncentrace kyslíku nebylo možné, protože naměřené hodnoty byly již mimo rozsah analyzátoru spalín. Naproti tomu při dvoustupňovém spalování nebyl nárůst emisí NO_x tak strmý jako při jednostupňovém spalování. Emise NO_x rostly pozvolna z 80 mg/mN³ až na 4900 mg/mN³ se zvyšující se koncentrací kyslíku z 21 % na 46 %. Mimo to koncentrace NO_x byla nižší než současně platný emisní limit v České republice pro stacionární zdroje o výkonu 0,3–50 MW, který je 200 mg/mN³, pokud byla koncentrace kyslíku nižší než 24 % [13]. Pro porovnání, při koncentraci 33 % O₂, byla při dvoustupňovém režimu spalování naměřena hodnota 1700 mg/mN³ NO_x, což je čtyřikrát méně, než v případě jednostupňového spalování [37].

8.1.2. Metoda AO

Výsledky ze spalovacích zkoušek AO metody jsou shrnuty v tab. 9. Závislost mezi koncentrací NO_x ve spalínách a koncentrací kyslíku u metody AO je znázorněna na obr. 21.

Režim	Celková konc. O ₂ [%]	Průtok O ₂ [mN ³ /h]	NO (naměř.) [ppm]	NO ₂ (naměř.) [ppm]	NO _x (dopoč.) [mg/mN ³]	Délka plamene [m]	Průměr plamene [m]	Teplota spalín [°C]
jednostupňový	21,50	5	80	2,0	168	2,25	0,6	747
jednostupňový	22,00	10	86	2,0	181	2,25	0,6	758
jednostupňový	23,10	20	100	3,0	212	2,25	0,6	771
jednostupňový	24,30	30	130	4,0	275	2,50	0,6	781
jednostupňový	25,60	40	206	5,3	434	2,75	0,6	777
jednostupňový	29,00	60	564	10,3	1181	3,00	0,5	749
jednostupňový	33,00	80	754	14,3	1579	3,00	0,4	736
jednostupňový	38,00	100	700	11,7	1450	3,00	0,35	707
dvoustupňový	21,50	5	47	1,0	98	2,10	0,9	703
dvoustupňový	22,00	10	44	1,0	92	2,00	0,9	704
dvoustupňový	23,10	20	38	1,0	82	2,25	1,0	727
dvoustupňový	24,30	30	40	1,7	84	2,50	1,0	708
dvoustupňový	25,60	40	38	1,0	81	2,50	1,0	710
dvoustupňový	29,00	60	50	1,0	104	2,40	0,9	676
dvoustupňový	33,00	80	53	1,0	111	2,20	0,85	669
dvoustupňový	38,00	100	40	1,0	85	2,20	0,85	651

Tab. 9 – Shrnutí výsledků TESTU A – metoda AO.



Obr. 21 – Vliv koncentrace O₂ na množství NO_x u metody AO.

Při spalovacích zkouškách, kde byla použita metoda AO, nebyl pozorován tak enormní nárůst emisí NO_x jako v případě metody AE. Při jednostupňovém spalování s AO metodou dosáhly emise NO_x maximální hodnoty 1580 mg/m_N³ při průtoku čistého kyslíku 80 m_N³/h (což odpovídá celkové koncentraci kyslíku 33 %), jak je zobrazeno na obr. 21. Bylo také pozorováno, že s dalším nárůstem koncentrace kyslíku začalo docházet k mírnému snížení emisí NO_x. To je způsobené tím, že značná část paliva je spálena v jádře plamene, do kterého je vstřikován vysoce čistý kyslík. Protože je v jádře plamene vysoký obsah kyslíku a naopak je zde nízká koncentrace dusíku, nedochází v takové míře k tvorbě NO_x i přesto, že teplota plamene je zde vysoká. Zbytek paliva pak reaguje se spalovacím vzduchem v oblastech, kde je nižší teplota, která není již tak příznivá na tvorbu termických NO_x. Lze předpokládat, že další navýšení koncentrace kyslíku by znamenalo další snížení emisí NO_x, protože by do spalovací komory vstupovalo menší množství volného dusíku [37].

Vynikajících výsledků pak bylo dosaženo při aplikaci dvoustupňového spalování v kombinaci s AO metodou. Maximální naměřená hodnota NO_x ve spalinách dosáhla pouze 110 mg/m_N³ při průtoku kyslíku 80 m_N³/h (33 % O₂). Hlavním důvodem radikálního snížení tvorby NO_x bylo, že část paliva reagovala přímo v primární zóně, zatímco zbytkové palivo bylo nasměrováno do zóny sekundárního spalování. Díky tomu se primární zóna stala chudá na palivo a nepřispívala k tvorbě NO_x takovou měrou, jako tomu bylo v případě jednostupňového spalování [6]. Přebytkový kyslík z primární zóny je pak využit pro spalování sekundárního paliva. Při dvoustupňovém spalování došlo také ke snížení teplotních špiček plamene a to proto, že spalovací reakce byla odstupňována na delší vzdálenost. Nižší teploty se následně odrazily i na snížené tvorbě emisí NO_x. Další zvyšování průtoku kyslíku by mělo podobný efekt jako v případě jednostupňového spalování s AO metodou, např. redukcí NO_x [37].

8.1.3. Metoda OL

Naměřená data při využití metody OL jsou uvedena v tab. 10. Obr. 22 pak ilustruje závislost mezi celkovou koncentrací kyslíku ve spalovacím vzduchu a koncentrací NO_x ve spalinách (mg/m_N³).

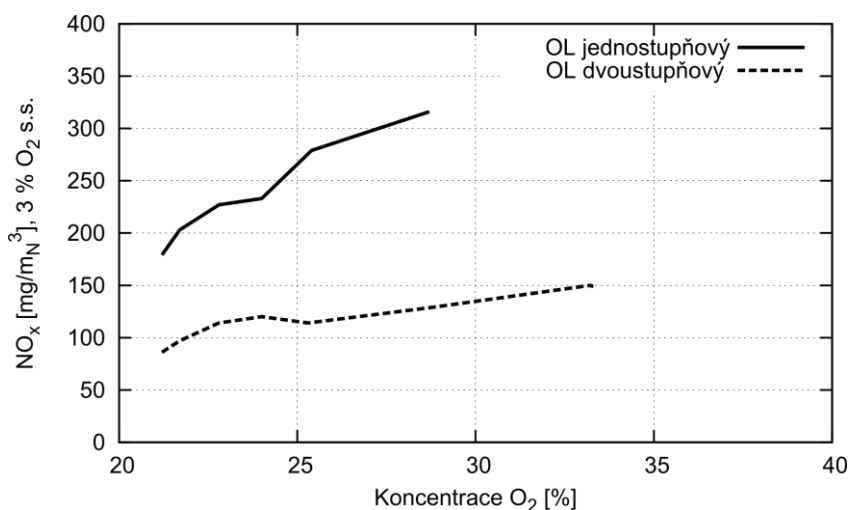
Režim	Celková konc. O ₂ [%]	Průtok O ₂ [m _N ³ /h]	NO (naměř.) [ppm]	NO ₂ (naměř.) [ppm]	NO _x (dopoč.) [mg/m _N ³]	Délka plamene [m]	Průměr plamene [m]	Teplota spalin [°C]
jednostupňový	21,50	5	87	0,9	181	3,00	0,6	728
jednostupňový	22,00	10	99	0,0	203	2,00	0,6	730
jednostupňový	23,10	20	106	0,0	218	2,00	0,6	738
jednostupňový	24,30	30	112	0,0	230	2,00	0,6	749
jednostupňový	25,60	40	130	0,0	267	2,00	0,5	750
jednostupňový	29,00	60	168	3,1	351	2,00	0,5	678
dvoustupňový	21,50	5	40	0,0	83	2,00	1,0	666
dvoustupňový	22,00	10	46	0,0	95	2,00	0,9	681
dvoustupňový	23,10	20	55	0,0	114	2,00	0,9	692
dvoustupňový	24,30	30	56	0,7	117	2,00	0,8	680
dvoustupňový	25,60	40	55	0,6	114	2,00	0,7	673
dvoustupňový	29,00	60	62	1,6	130	2,00	0,9	636
dvoustupňový	33,00	80	71	2,0	149	2,00	0,9	572

Tab. 10 – Shrnutí výsledků TESTU A – metoda OL.

Oproti předchozím testům vykazovala metoda OL podstatně menší tvorbu emisí

NO_x. Během jednostupňového spalování bylo při průtoku 60 m_N³/h (29 % kyslíku) dosaženo maximální hodnoty NO_x a to 350 mg/m_N³. V porovnání s metodou AE a AO u kterých byla za stejné koncentrace O₂ hodnota NO_x podstatně vyšší (3500 mg/m_N³ v případě AE a 1180 mg/m_N³ u AO) je to velmi znatelné snížení tvorby NO_x. Z obr. 22 lze vyčíst jistá lineární závislost NO_x na koncentraci kyslíku. Další navýšení průtoku kyslíku však nebylo možné, protože plamen začal velmi pulzovat z důvodu nedostatku O₂ v jádru plamene.

Využitím dvoustupňového spalování a metody OL bylo docíleno znatelné snížení tvorby NO_x. Stejně jako u jednostupňového režimu hodnota NO_x rostla lineárně se zvyšující se koncentrací kyslíku. Nejvyšší koncentrace NO_x dosáhla hodnoty 150 mg/m_N³ při průtoku 80 m_N³/h kyslíku (33,2 % O₂). V tomto spalovacím režimu byla část paliva nasměrována do sekundární zóny spalování a tím se snížil vliv nedostatku kyslíku v jádru plamene. Došlo tím také k většímu přenosu tepla do stran spalovací komory, což vedlo ke snížení teplotních špiček a tím i teploty spalin. Tyto aspekty měly pozitivní dopad na tvorbu NO_x. V porovnání s metodou AO však tato technologie při vyšším průtoku kyslíku vykazuje vyšší tvorbu emisí NO_x v důsledku zhoršené distribuce kyslíku do středu plamene. Další navýšení průtoku kyslíku nebylo možné ze stejného důvodu jako při jednostupňovém režimu. Plamen začal být nestabilní kvůli nedostatku O₂ v jádru plamene.



Obr. 22 – Vliv koncentrace O₂ na množství NO_x u metody OL.

8.1.4. Srovnání AE, AO a OL metod

Jak již bylo zmíněno výše, nejlepších výsledků ze všech typů zkoušek bylo dosaženo pomocí metody AO se stupňovitým režimem spalování. Oba spalovací režimy technologie AE byly neakceptovatelné z hlediska emisních limitů. Tvorba NO_x byla u metody AE ve srovnání s metodami AE a OL velmi vysoká, což bylo způsobeno technickou podstatou této metody. Množství NO_x stále stoupalo, zatímco u metody AO hladina NO_x s přibývajícím koncentrací O₂ klesala. K porovnání rozdílů v hodnotách NO_x lze využít tab. 11, ve které jsou znázorněny změny v množství NO_x u jednotlivých metod za stejné koncentrace O₂ (29 %).

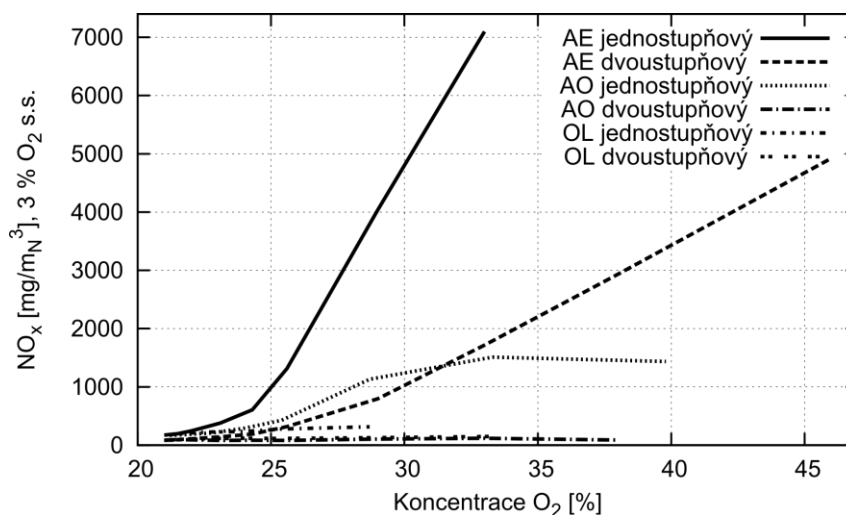
Metoda	Koncentrace O ₂ [obj. %]	NO _x [mg/m _N ³]
Air enrichment		
750 kW jednostupňový	29,0	3511
750 kW dvoustupňový	29,0	800
Air-oxy/fuel		
750 kW jednostupňový	29,0	1181
750 kW dvoustupňový	29,0	104
O₂-lancing		
750 kW jednostupňový	29,0	351
750 kW dvoustupňový	29,0	130

Tab. 11 – Porovnání koncentrace NO_x pro jednotlivé OEC metody při 29 % O₂.

V tab. 12 jsou pak zobrazeny hladiny NO_x při maximální koncentraci O₂, která byla u dané metody dosažena. Výsledky jsou také graficky znázorněny na obr. 23.

Metoda	Max. koncentrace O ₂ [obj. %]	NO _x [mg/m _N ³]
Air enrichment		
750 kW jednostupňový	33,0	7123
750 kW dvoustupňový	46,0	4923
Air-oxy/fuel		
750 kW jednostupňový	38,0	1435
750 kW dvoustupňový	38,0	89
O₂-lancing		
750 kW jednostupňový	29,0	315
750 kW dvoustupňový	33,0	150

Tab. 12 – Porovnání koncentrace NO_x pro jednotlivé OEC metody při maximální koncentraci O₂.



Obr. 23 – Srovnání množství NO_x mezi AE, AO a OL testy.

8.2. Chybová analýza NO_x

Přesnost měření byla ovlivněna nejistotami, které vyplynuly z přesnosti použitých snímačů (elektrochemická čidla, termočlánky, průtokoměry). Pomocí výpočtové metody šíření chyb, lze tyto odchylky pro měření NO_x dopočítat. Pokud jde o koncentrace emisí NO_x [mg/m_N³], které byly vypočteny na základě naměřených

koncentrací NO a NO₂ (v jednotkách [ppm]), směrodatná odchylka se vypočítá podle následující rovnice (21) [40]:

$$\sigma_{NO_x} = \sqrt{\sigma_{NO}^2 + \sigma_{NO_2}^2} \quad (21)$$

kde σ_{NO_x} je směrodatná odchylka NO_x [mg/m_N³],
 σ_{NO} je směrodatná odchylka NO [mg/m_N³],
 σ_{NO_2} je směrodatná odchylka NO₂ [mg/m_N³].

Vypočtené relativní chyby jsou shrnuty v tab. B I, která je součástí přílohy B.

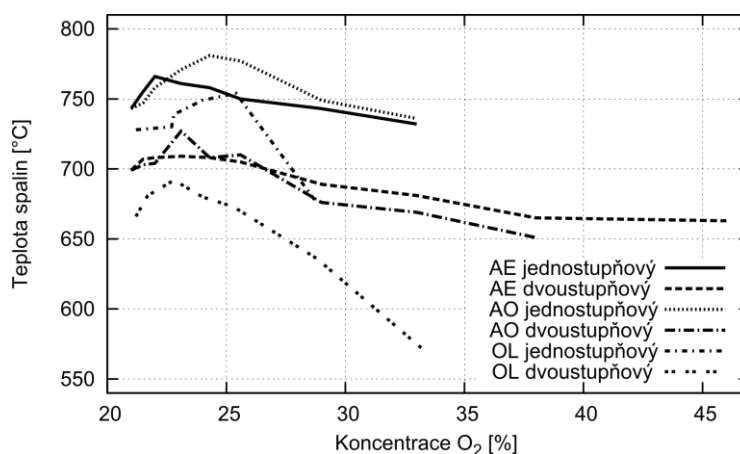
Nejvyšší chyby, až ±18 %, bylo dosaženo u AO zkoušek s využitím dvoustupňového režimu. Důvodem této odchylky je, že pro nízké koncentrace NO_x (0–99 ppm) je přesnost měření NO a NO₂ senzorů ±5 ppm.

Typ sondy	Rozsah	Přesnost
Termočlánek K	(-40 až 1200) °C	±0,5 % z naměřené hodnoty
O ₂	(0–25) obj. %	±0,2 obj. %
CO s kompenzací H ₂	(0–10000) ppm	±10 ppm v rozsahu (0–199) ppm ±5 % z naměřené hodnoty v rozsahu (200–2000) ppm
NO	(0–3000) ppm	±5 ppm v rozsahu (0–99) ppm ±5 % z naměřené hodnoty v rozsahu (100–2000) ppm
NO ₂	(0–500) ppm	±5 ppm v rozsahu (0–99) ppm ±5 % z naměřené hodnoty v rozsahu (100–500) ppm
SO ₂	(0–5000) ppm	±5 ppm v rozsahu (0–99) ppm ±5 % z naměřené hodnoty v rozsahu (0–2000) ppm

Tab. 13 – Technické parametry senzorů v analyzátoru spalin.

8.3. Teplota spalin

Na obr. 24 je znázorněn vliv koncentrace kyslíku na teplotu spalin. Z obrázku je patrné, že docházelo k nárůstu teploty spolu se zvyšující se koncentrací kyslíku až do 23-25 %. Další zvýšení koncentrace kyslíku však znamenalo mírný pokles teploty. Jedním z možných vysvětlení je vliv zvyšujícího se tepelného toku do stěny spalovací komory. To znamená, více tepla se předalo do stěny a spaliny se před výstupem z komory více ochladily. U metody AE byla naměřena nejvyšší teplota při jednostupňovém spalování, konkrétně 766 °C při konc. 22 % O₂. Maximální teplota u AO metody byla při jednostupňovém spalování 781 °C při konc. 24 % O₂. Tyto dvě metody měly velmi podobné průběhy a teplota spalin se při jednostupňovém i dvoustupňovém režimu lišila v rozsahu 15 °C. Nejnižší teploty spalin bylo dosaženo u metody OL. Teplotního maxima (754 °C) bylo dosaženo při jednostupňovém spalování při koncentraci kyslíku 25,6 %. Oproti metodám AE a AO byl se zvyšující se koncentrací O₂ zaznamenán strmý sestupný trend v teplotách spalin. Důvod je ten, že při OL byl kyslík vstřikován do sekundární části hořáku a tím se značně zvětšila šířka plamene. To mělo za následek zvýšený tepelný tok do stěn spalovací komory v prvních třech sekcích (viz kap. 9.1) a následné ochlazení spalin. U dvoustupňového spalování dosáhla teplota při koncentraci kyslíku 33 % pouhých 572 °C.



Obr. 24 – Srovnání teploty spalin mezi AE, AO a OL testy.

8.4. Struktura plamene

Během zkoušek spalování s obohacováním vzduchu kyslíkem byla snaha udržet plamen co nejvíce stabilní a ostrý. Z pozorování bylo zřejmé, že při spalování atmosférického vzduchu se zemním plynem měl plamen charakteristické modré jádro se žluto-červenými okraji. Oproti tomu při spalování OEC a zvyšující se koncentrací O₂ se jádro plamene stávalo žlutější. Obecně lze říci, že při využití technologie OEC byly plameny více svítivé a také měly větší emisivitu. Důvodem je zvýšená koncentrace CO₂ a H₂O, což jsou plyny, které se podílí na radičním přenosu tepla v plameni (dusík se jako inertní plyn reakce a tudíž i záření nezúčastňuje).

Rozměry viditelné části plamene, včetně délky a průměru byly vyhodnoceny na základě subjektivního pozorování operátora skrz inspekční otvory a proto slouží pouze jako orientační. Délka plamene byla měřena od přední části komory, kde byl umístěn hořák. Průměr plamene byl odhadován na základě vizuálního porovnání průměru plamene s vnějším průměrem hořákového kamene (600 mm) a vnitřního průměru spalovací komory (1 m).

8.4.1. Metoda AE

Během zkoušek s AE metodou bylo vypořádáno, že nárůst kyslíku ve spalovacím vzduchu způsobil prodloužení plamene o 25 % z 2,25 m na 3,0 m, jak postupně docházelo k nárůstu koncentrace kyslíku až na 35 %. Tato skutečnost se však neshoduje s výsledky dosavadních výzkumů v oblasti OEC. Podle Baukala [1] by se měl AE plamen zkracovat. Možným vysvětlením je, že se zvyšující se koncentrací kyslíku a tedy i se snižujícím se průtokem spalovacího vzduchu dochází k poklesu výstupní rychlosti spalovacího vzduchu, což se projeví na snížené intenzitě promíchávání paliva se vzduchem. Z tohoto důvodu palivo potřebuje delší čas k vyhoření, a proto dochází k prodloužení plamene. Průměr plamene se pohyboval v rozmezí od 0,5–0,6 m pro jednostupňové spalování a v rozmezí 0,9–1 m pro spalování dvoustupňové. Co se týče barvy plamene, jádro plamene bylo modré a obálka plamene měla žluto-červenou barvu až do koncentrace O₂ 24 %. Se zvyšující se koncentrací kyslíku se jádro plamene postupně měnilo z modré barvy na žlutou. Při vyšší koncentraci kyslíku než 29 % se stal plamen zcela žlutý [37].

8.4.2. Metoda AO

Pro jednostupňové AO zkoušky bylo se zvyšující se koncentrací kyslíku pozorováno prodloužení plamene přibližně o 16 % z 2,3 m na 2,75 m. Na druhé straně při dvoustupňovém spalování již k takovému prodloužení plamene nedošlo a plamen se prodloužil z 2,1 m na 2,5 m. Prodloužení bylo pozorováno při zvyšující se koncentraci kyslíku z 21 % na 35 %. Další zvýšení koncentrace kyslíku mělo za důsledek zkrácení plamene o cca 0,3 m. Průměr plamene potom kolísal v rozmezí 0,4–0,6 m při jednostupňovém spalování a mezi 0,8–0,9 m při spalování dvoustupňovém. Během jednostupňového režimu plamen nepravidelně pulsoval. Při nižších koncentracích kyslíku měl plamen modré jádro a červeno-žlutou obálkou. Když se koncentrace O_2 zvýšila na více než 33 %, byla modrá barva potlačenou barvou žlutou. Plamen měl charakteristický kuželovitý tvar [37].

8.4.3. Metoda OL

Při využití metody OL a jednostupňového spalování bylo pozorováno zkrácení plamene přibližně o 30 % z 2,25 m na 1,75 m. Zkracování probíhalo souběžně se zvyšující se koncentrací kyslíku z 21 % na 29 %. Jednou z možných příčin zkracování plamene je, že v primární části spalování byl nedostatek kyslíku, který je potřeba pro reakci spalování. Z tohoto důvodu také nebylo možné docílit vyšší koncentrace kyslíku, protože při průtoku $60 \text{ mN}^3/\text{h}$ (29 % O_2) docházelo k zášlehu plamene. Průměr plamene se pohyboval mezi 0,5–0,6 m. Plamen měl při nižších koncentracích O_2 v jádru modrou barvu se žlutými konci. Se zvyšující se koncentrací plamen postupně žloutnul a při koncentraci 29 % O_2 měl plamen v primární části žluté jádro s modrou obálkou po spalování s O_2 .

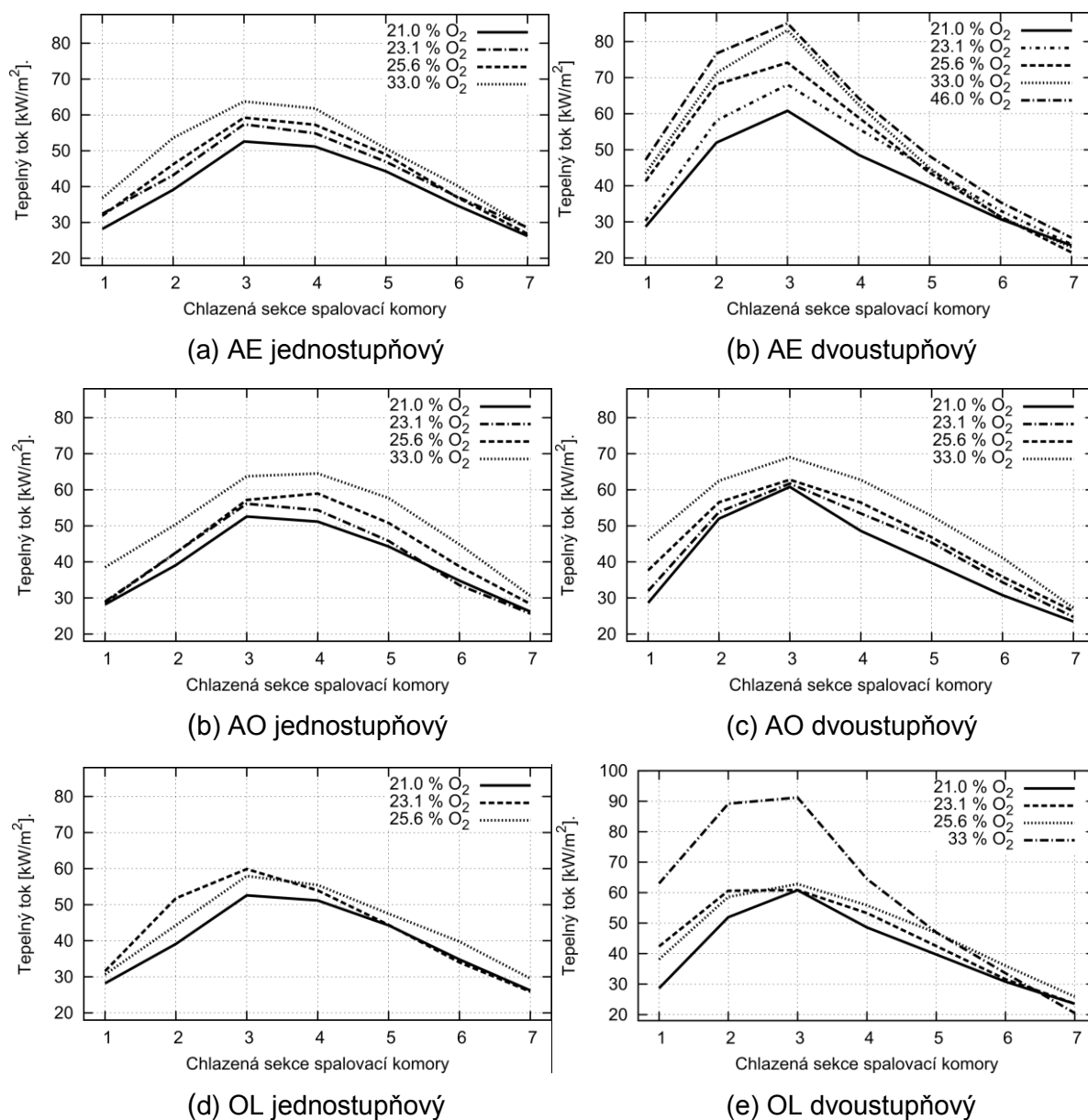
Naopak při dvoustupňovém spalování se délka plamene prakticky neměnila a držela se v rozmezí 2,2–2,25 m. Průměr plamene kolísal v rozmezí 0,8–1,0 m. Se vzrůstajícím množstvím kyslíku se primární plamen stával nezřetelný. To se dá nejspíše vysvětlit systémem vstřikování kyslíku. Kyslík byl totiž vstřikován do sekundární zóny hořáku a v této oblasti probíhala hlavní část spalování. U nízké koncentrace kyslíku byl plamen ostrý, stabilní a měl modrou barvu. Se vzrůstající koncentrací O_2 získával plamen modro-žlutou barvu se sytě žlutými konci a při průtoku $80 \text{ mN}^3/\text{h}$ (33 % O_2) začínal být plamen tzv. „měkký“.

9. TEST B

Před začátkem TESTU B byla nejprve chladicí část komory odzdušněna a celá spalovací komora byla uvedena do termodynamického stavu. Tímto stavem se myslí, že teplota spalin (maximální povolená změna je 10 °C během 30 minut) a lokální tepelné toky do stěn jednotlivých sekcí spalovací komory (vyhodnocovány kontinuálně) jsou stabilní.

9.1. Distribuce tepelného toku

Z obr. 25 je zřejmé, že křivky popisující trend tepelných toků jsou podobných tvarů pro všechny vyšetřované koncentrace kyslíku a pro všechny spalovací režimy.



Obr. 25 – Profily tepelných toků do stěny spalovací komory metod AE, AO a OL pro různé koncentrace O₂.

Křivky stoupají do svého maxima ve třetí sekci a poté klesají dolů. Je také patrné, že se zvyšující se koncentrací kyslíku je uvolněno více tepla ze spalín do stěn sekcí spalovací komory, protože je zmařeno méně energie na ohřívání N_2 a také přenos tepla radiací je intenzivnější díky vyšším koncentracím CO_2 a H_2O . Z obr. 25 lze vypočítat, že při dvoustupňovém spalování v kombinaci s OL metodou se v prvních třech sekcích komory předává více tepla než v ostatních režimech. Další metodou, která je na druhém místě, co se týče odvedeného tepla do stěn spalovací komory je metoda AE s dvoustupňovým spalováním. Avšak na druhé straně se tato metoda vyznačuje vysokými koncentracemi NO_x . Hodnoty tepelných toků do jednotlivých sekcí spalovací komory, které byly během zkoušek spalování získány, jsou shrnuty v tab. 14.

Režim	Celková konc. O_2 [%]	Průtok O_2 [mN^3/h]	Sekce 1 [kW/m^2]	Sekce 2 [kW/m^2]	Sekce 3 [kW/m^2]	Sekce 4 [kW/m^2]	Sekce 5 [kW/m^2]	Sekce 6 [kW/m^2]	Sekce 7 [kW/m^2]
AE jednostupňový	21,00	0	28,20	39,13	52,58	51,17	44,26	34,79	26,24
AE jednostupňový	22,78	20	34,21	43,20	57,38	54,88	46,92	37,25	28,59
AE jednostupňový	25,36	40	31,88	46,21	59,23	57,27	48,99	37,11	26,82
AE jednostupňový	30,80	70	36,76	53,59	63,74	61,81	50,59	40,38	28,34
AE dvoustupňový	21,00	0	28,64	51,95	60,80	48,57	39,73	30,77	23,50
AE dvoustupňový	22,79	20	30,33	58,09	68,07	55,79	44,44	33,13	23,78
AE dvoustupňový	25,35	40	41,30	68,08	74,15	58,94	43,62	31,48	21,54
AE dvoustupňový	33,20	80	43,42	71,28	83,13	62,51	44,92	31,30	23,01
AE dvoustupňový	48,74	119	47,18	76,68	85,07	64,31	48,27	35,44	25,61
AO jednostupňový	21,00	0	28,20	39,13	52,58	51,17	44,26	34,79	26,24
AO jednostupňový	22,80	20	29,00	42,58	56,15	54,35	45,82	33,55	25,71
AO jednostupňový	25,37	40	28,73	42,53	57,16	58,96	50,82	38,75	28,37
AO jednostupňový	33,29	80	38,51	50,45	63,72	64,50	57,68	44,84	30,60
AO dvoustupňový	21,00	0	28,64	51,95	60,80	48,57	39,73	30,77	23,50
AO dvoustupňový	22,79	20	31,95	53,58	61,71	53,41	45,36	34,38	24,71
AO dvoustupňový	25,36	40	37,66	56,51	62,79	56,46	46,81	35,88	26,35
AO dvoustupňový	33,14	80	46,03	62,49	69,02	62,74	52,73	41,16	27,25
OL jednostupňový	21,00	0	28,20	39,13	52,58	51,17	44,26	34,79	26,24
OL jednostupňový	22,80	20	31,57	51,76	59,87	53,94	44,39	33,98	25,88
OL jednostupňový	25,37	40	30,66	44,29	57,92	55,44	47,48	39,78	29,55
OL dvoustupňový	21,00	0	28,64	51,95	60,80	48,57	39,73	30,77	23,50
OL dvoustupňový	22,79	20	42,36	60,65	60,86	53,29	42,51	31,60	23,59
OL dvoustupňový	25,34	40	38,10	58,61	62,85	55,87	46,80	36,05	25,87
OL dvoustupňový	33,27	80	62,97	89,20	91,22	64,52	46,98	33,59	20,52

Tab. 14 – Hodnoty tepelných toků v TESTU B.

9.2. Chybová analýza tepelných toků

Během provádění TESTU B byl průtok chladicí vody do každé sekce redukován na minimum, což v důsledku snižuje chybu v měření tepelného toku. Důvodem je to, že díky nižší rychlosti průtoku chladicí vody se zvyšuje výstupní teplota vody z každé sekce a tím se zvyšuje rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou. Na základě výpočtu šíření nejistoty je měření tepelného toku nepřímou úměrné teplotní diferencí. Pro výpočet směrodatné odchylky tepelných toků v každé sekci pak platí tato rovnice (22) [40]:

$$\sigma_{\dot{q}_i} = \dot{q}_i \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{OUT,i}}^2 + \sigma_{t_{IN}}^2}{\Delta t_i^2}\right]} \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, 7 \quad (22)$$

kde \dot{q}_i je tepelný tok v sekci i [kW/m²],
 V_i je objemový průtok v sekci i [m³/h],
 σ_{V_i} je směrodatná odchylna objemového průtoku v sekci i [m³/h],
 $\sigma_{t_{OUT,i}}^2$ je směrodatná odchylna výstupní teploty vody v sekci i [°C],
 $\sigma_{t_{IN}}^2$ je směrodatná odchylna vstupní teploty vody [°C],
 Δt_i^2 je teplotní diference v sekci i [°C].

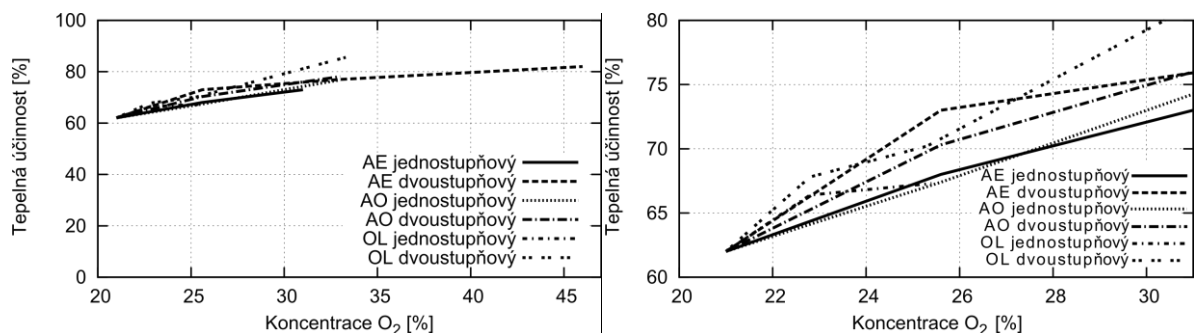
Vypočtené relativní chyby jsou shrnuty v tab. B II, která je součástí přílohy B. Maximální chyba v sekci 1 se pohybovala v rozmezí ± 5 %, v sekcích 2–7 byla chyba ±3 %. V tab. 15 jsou znázorněny technické parametry měřících zařízení a jejich přesnost.

Typ sondy	Veličina	Rozsah	Přesnost
Rawet PTP50J Pt100/b	Teplota	(0–100) °C	±0,3 % z měřeného rozsahu
Sensus Typ 420 S Qn 10	Průtok	(0,15–40) m ³ /h	±0,5 % z měřené hodnoty

Tab. 15 – Technické parametry senzorů vodou chlazeného systému.

9.3. Tepelná účinnost

Obr. 26 zobrazuje rozdíly v tepelné účinnosti při různých koncentracích kyslíku zjištěných během TESTU B. Platí, že se zvyšující se koncentrací O₂ dochází i k nárůstu tepelné účinnosti procesu. Při spalování s atmosférickým vzduchem (21 % O₂) byla tepelná účinnost přibližně 61 %. Na druhé straně, u metody OL dosáhla tepelná účinnost při koncentraci kyslíku 33 % přibližně 85 %. Tzn., že pro daný proces se využije více přivedeného tepla. Zvýšením koncentrace kyslíku lze např. snížit spotřebu paliva, neboť na jednotku výroby je potřeba méně paliva. V tab. 16 jsou sumarizovány hodnoty výkonu a celkové tepelné účinnosti pro jednotlivé spalovací režimy.



Obr. 26 – a) Tepelná účinnost při různých koncentracích O₂, b) zobrazení v detailu.

Režim	Celková konc. O ₂ [%]	Průtok O ₂ [mN ³ /h]	Výkon všech sekcí [kW]	Účinnost [%]
AE jednostupňový	21,00	0	458,2	61,09
AE jednostupňový	22,78	20	503,2	66,97
AE jednostupňový	25,36	40	506,7	67,69
AE jednostupňový	30,80	80	550,6	73,41
AE dvoustupňový	21,00	0	466,6	62,20
AE dvoustupňový	22,79	20	506,5	67,52
AE dvoustupňový	25,35	40	546,8	72,89
AE dvoustupňový	33,20	80	580,1	77,44
AE dvoustupňový	48,74	119	618,3	82,36
AO jednostupňový	21,00	0	458,2	61,09
AO jednostupňový	22,80	20	477,3	63,80
AO jednostupňový	25,37	40	506,2	67,41
AO jednostupňový	33,29	80	576,6	76,84
AO dvoustupňový	21,00	0	466,6	62,20
AO dvoustupňový	22,79	20	500,6	66,79
AO dvoustupňový	25,36	40	506,2	70,30
AO dvoustupňový	33,14	80	576,6	78,12
OL jednostupňový	21,00	0	458,2	61,09
OL jednostupňový	22,80	20	497,7	66,37
OL jednostupňový	25,37	40	505,5	67,33
OL dvoustupňový	21,00	0	466,6	62,20
OL dvoustupňový	22,79	20	508,2	67,80
OL dvoustupňový	25,34	40	526,9	70,18
OL dvoustupňový	33,27	80	641,2	85,59

Tab. 16 – Hodnoty výkonu a tepelné účinnosti v TESTU B.

10. TEST C

TEST C byl zaměřen na rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory. Měření teplot uvnitř spalovací komory bylo uskutečněno pomocí vysokoteplotních termočlánků typu R (výkres sestavy termočlánku je v příloze A VIII), které byly zasunuty do spalovací komory skrz inspekční otvory (obr. 27). Termočlánky byly napojeny na digitální dataloger (obr. 28), pomocí kterého probíhal záznam naměřených teplot uvnitř komory. Záznam teplot v daném bodě komory trval 2 minuty v intervalu 1 s a poté se termočlánek zasunoval dále do středu komory. Experimentální měření probíhalo ve vzdálenostech 5, 10, 20, 30, 40, 50 cm od vnitřního pláště komory až do samotného středu komory. Tento test probíhal pro všechny tři metody při průtoku kyslíku 0, 20, 40, 80 mN^3/h .

10.1. Teplota ve spalovací komoře

Při koncentraci 21 % kyslíku dosahovala teplota při jednostupňovém spalování u ústí hořáku 1400 °C. Od ústí hořáku následoval všemi směry teplotní pokles, ale i přesto byla v blízkosti vnitřního pláště komory v místě 3. sekce naměřena teplota přibližně 900 °C. V TESTU B bylo zjištěno, že největší tepelný tok do stěn spalovací komory byl právě v oblasti třetí sekce a měření teplot uvnitř komory tento poznatek potvrdilo. Při dvoustupňovém spalování se dosáhlo nejvyšší teploty v oblasti druhé sekce, a to přibližně 1300 °C.

10.1.1. Metoda AE

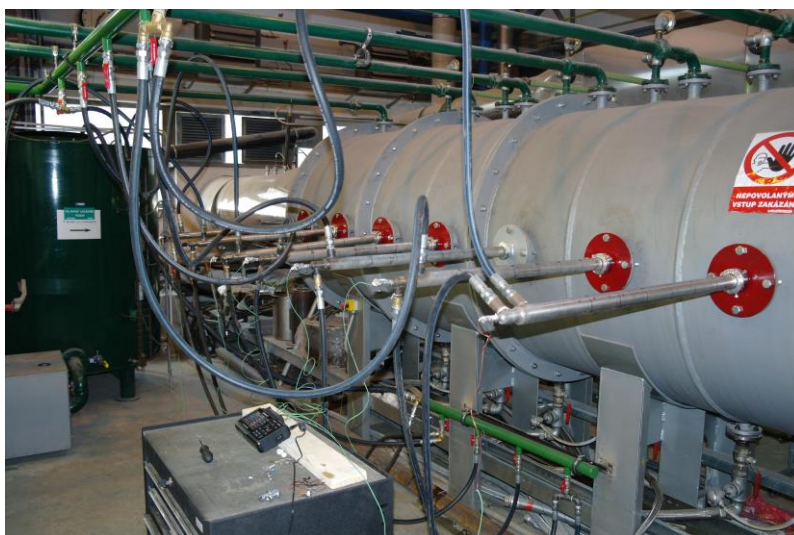
U metody AE byl pozorován největší teplotní gradient v jádru plamene. Při průtoku 80 mN^3/h O_2 (33 %) při jednostupňovém režimu dosáhla teplota u ústí hořáku přibližně 1665 °C. Je známo, že při vyšší teplotě také stoupá tvorba termických NO_x . U jednostupňové AE metody bylo naměřeno největší množství NO_x (cca 7000 mg/mN^3) právě v důsledku vysokých teplot v plameni. Takto vysoké teploty se pomocí žádné další metody nedosáhlo. Při dvoustupňovém režimu spalování dosahovala průměrná teplota v přední části komory 1475 °C. Tento pokles teploty v oblasti spalování se odrazil ve snížené tvorbě NO_x . Přesto byla tvorba NO_x v obou režimech spalování zdaleka nejvyšší. Současně byl také naměřen větší tepelný tok do stěn sekcí spalovací komory, jelikož se v důsledku sekundárního přívodu paliva plamen rozšířil. Na obr. 29 je znázorněna teplotní mapa uvnitř komory pro jednotlivé průtoky a režimy AE spalování.

10.1.2. Metoda AO

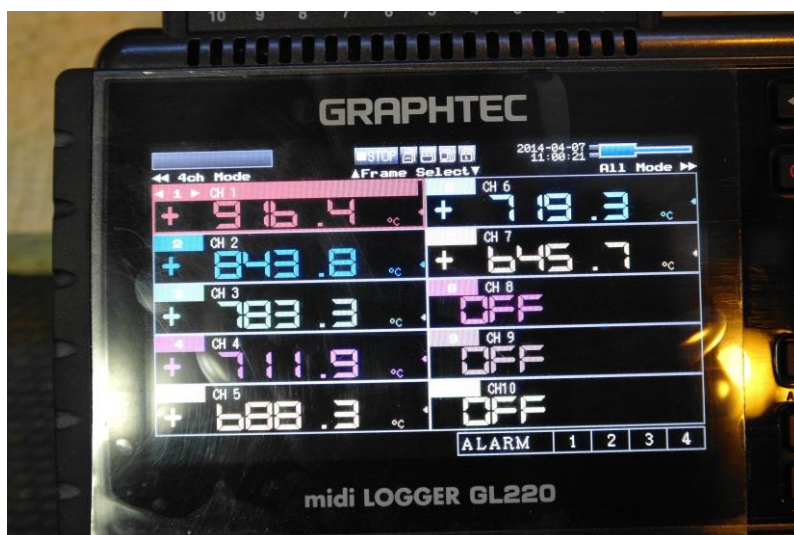
Při jednostupňovém AO spalování dosáhla průměrná teplota ve středu plamene 1500 °C. Teplotní mapa je znázorněna na obr. 30, kde jsou vidět značné rozdíly mezi jednostupňovým a dvoustupňovým režimem spalování. Z naměřených teplot můžeme usoudit, že při jednostupňovém spalování byl plamen užší a teplo bylo více koncentrované v jádru plamene. Z tohoto důvodu docházelo k vyšší tvorbě NO_x (1500 mg/mN^3 při koncentraci kyslíku 33 %). Avšak u dvoustupňového spalování se plamen značně rozšířil a došlo k větší distribuci tepla do stěn spalovací komory. Maximální teplota u dvoustupňového režimu se pohybovala okolo 1250 °C (při 29 % koncentraci O_2) a v porovnání s ostatními metodami se jednalo o nejnižší naměřenou teplotu. Díky těmto podmínkám byla tvorba NO_x velmi nízká (115 mg/mN^3 při koncentraci O_2 33 %). Z naměřených teplot v zadní části komory lze také usuzovat, že se délka plamene s přibývajícím koncentrací O_2 postupně zkracovala.

10.1.3. Metoda OL

U metody OL dosáhla průměrná teplota v ústí hořáku u jednostupňového režimu hodnoty 1540 °C (60 mN³/h). Přesto vyšla OL metoda z hlediska tvorby NO_x při jednostupňovém spalování jako nejlepší. Je to hlavně z důvodu, že takto vysoká teplota byla jen u ústí hořáku a bezprostředně za tímto místem klesla teplota na přibližně 1000 °C. Na obr. 31 lze pozorovat zkracování délky plamene a vyšší teploty směrem ke stěnám komory. Je to způsobeno nejspíše v důsledku nedostatku O₂ v jádru plamene a toho, že kyslík je vstřikován do oblasti sekundárního spalování. Při dvoustupňovém spalování dosáhla průměrná teplota uvnitř plamene 1280 °C. Teplota v blízkosti vnitřního pláště komory klesla při 33 % koncentraci O₂ na 1090 °C. Při tomto režimu spalování docházelo k největším tepelným tokům do stěn komory. Hlavním důvodem je, že větší část reakce spalování neprobíhá v jádru plamene (primární části), ale po jeho stranách. Je to zapříčiněno systémem vstřikování kyslíku a paliva do sekundární oblasti. To má za následek, že tepelná energie není soustředěna na jednom místě, ale je distribuována do většího prostoru uvnitř komory.

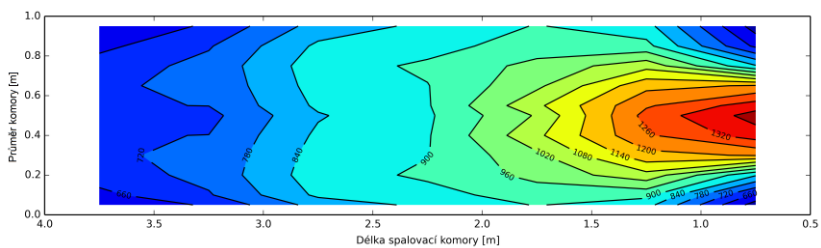


Obr. 27 – Termočlánky ve spalovací komoře.



Obr. 28 – Dataloger.

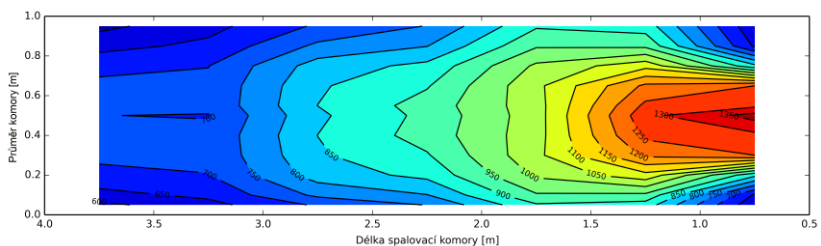
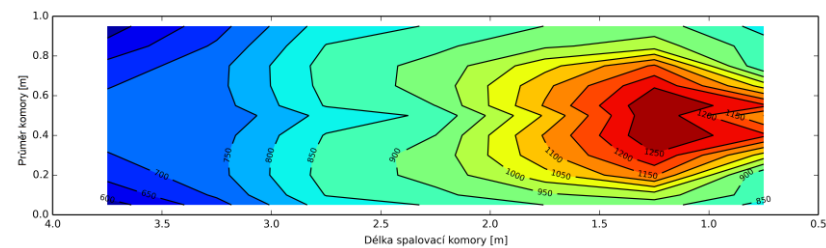
AE režim



Jednostupňový

Průtok 0 m³/h

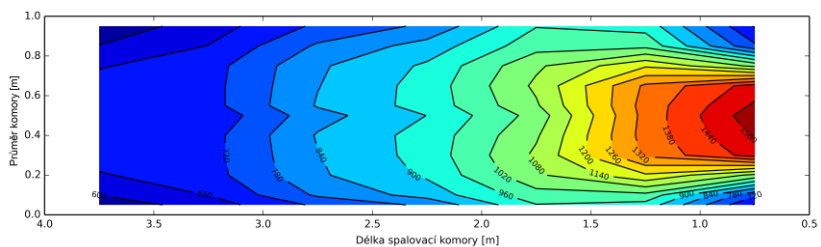
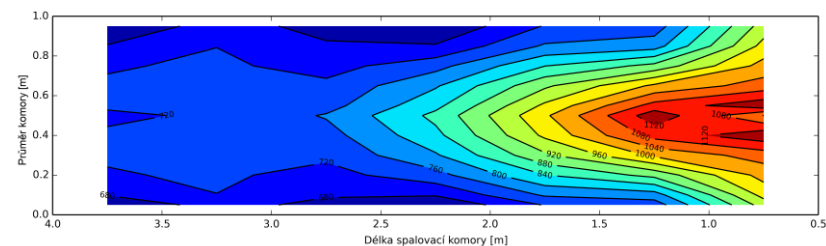
Dvoustupňový

Průtok 0 m³/h

Jednostupňový

Průtok 20 m³/h

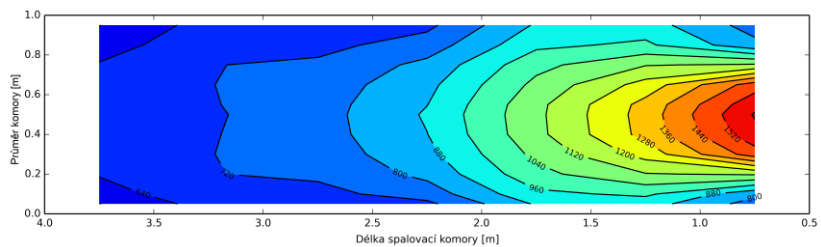
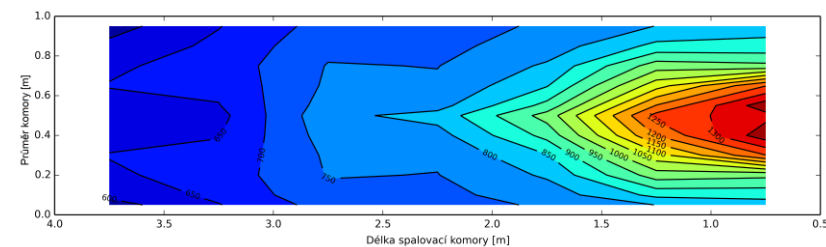
Dvoustupňový

Průtok 20 m³/h

Jednostupňový

Průtok 40 m³/h

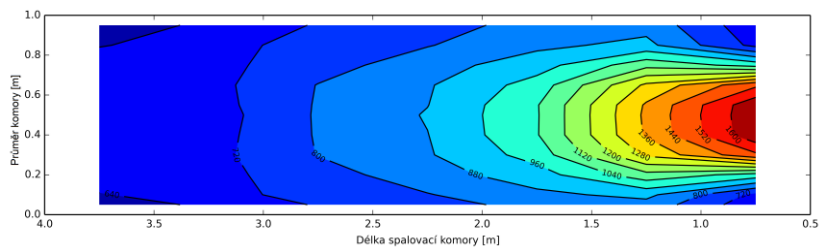
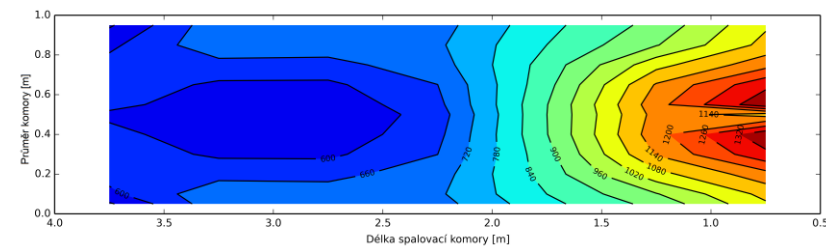
Dvoustupňový

Průtok 40 m³/h

Jednostupňový

Průtok 60 m³/h

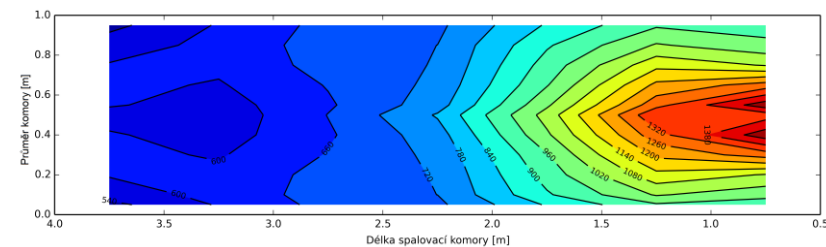
Dvoustupňový

Průtok 60 m³/h

Jednostupňový

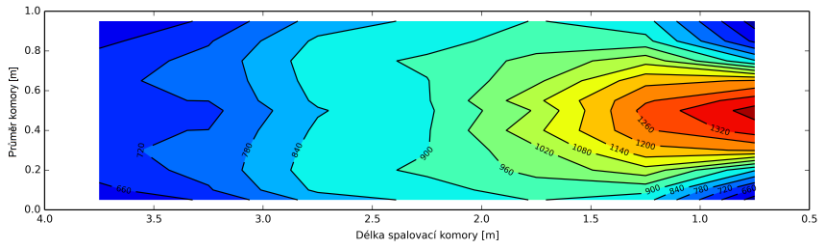
Průtok 80 m³/h

Dvoustupňový

Průtok 80 m³/h

Obr. 29 – Teplotní mapa v horizontální rovině symetrie spalovací komory u metody AE.

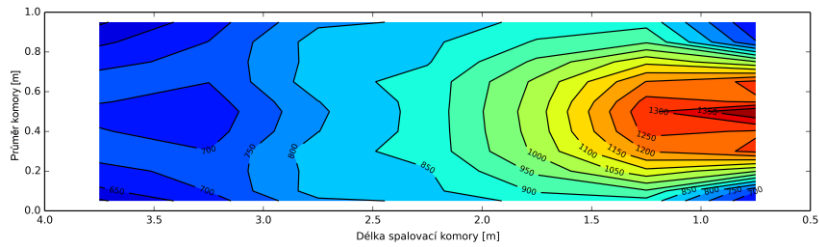
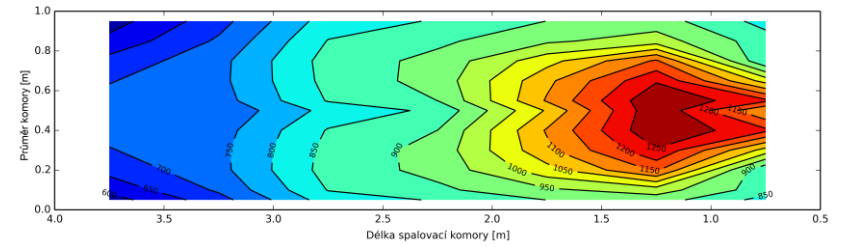
AO režim



Jednostupňový

Průtok 0 m_N³/h

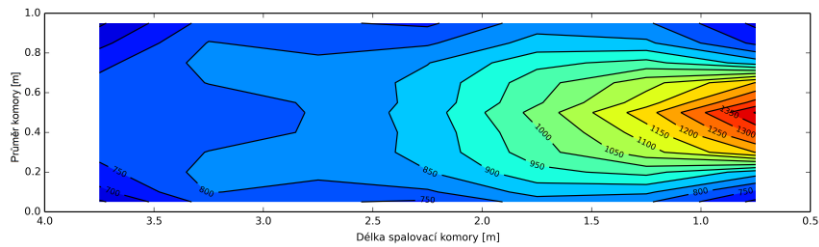
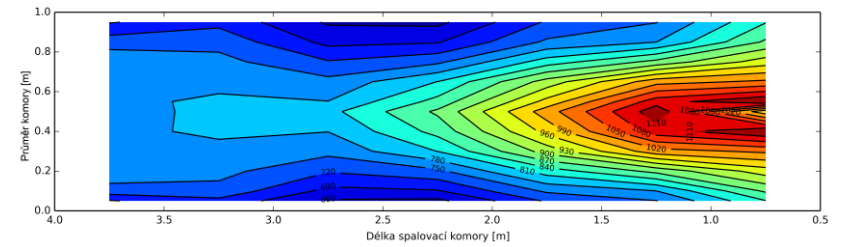
Dvoustupňový

Průtok 0 m_N³/h

Jednostupňový

Průtok 20 m_N³/h

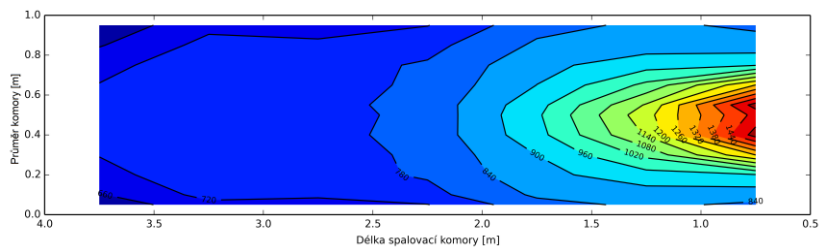
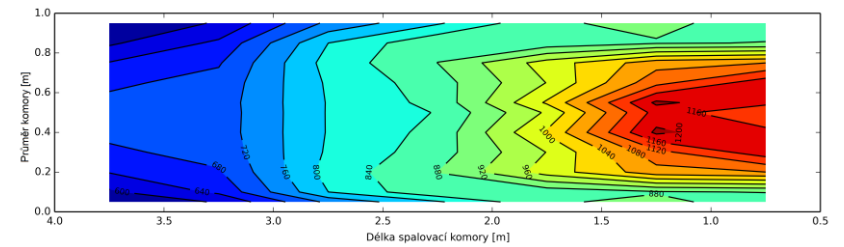
Dvoustupňový

Průtok 20 m_N³/h

Jednostupňový

Průtok 40 m_N³/h

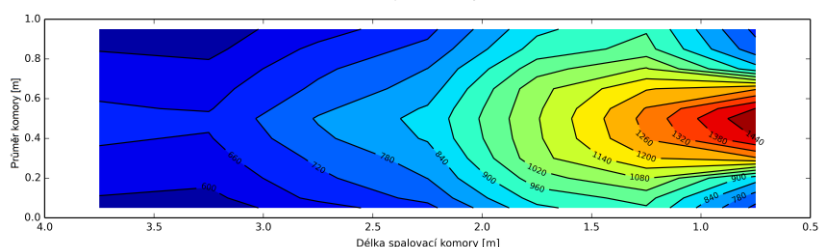
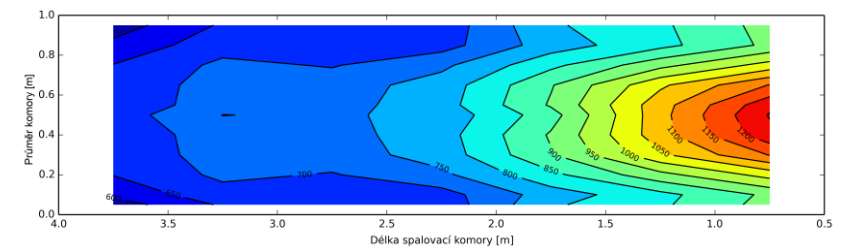
Dvoustupňový

Průtok 40 m_N³/h

Jednostupňový

Průtok 60 m_N³/h

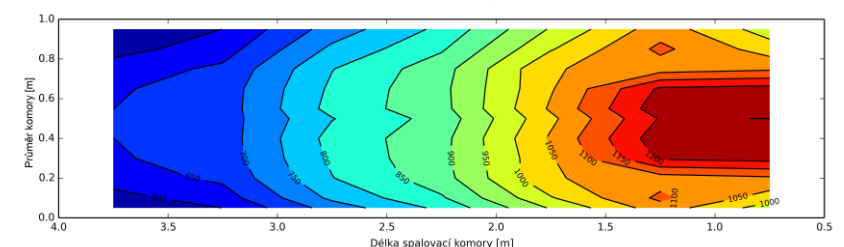
Dvoustupňový

Průtok 60 m_N³/h

Jednostupňový

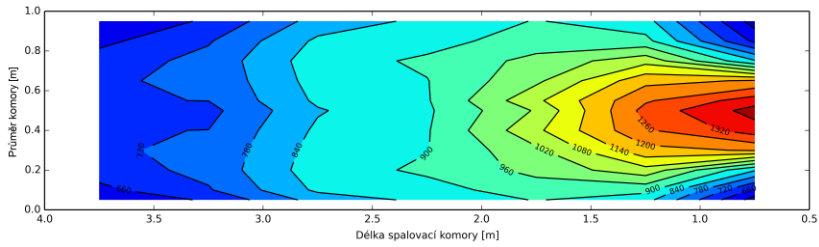
Průtok 80 m_N³/h

Dvoustupňový

Průtok 80 m_N³/h

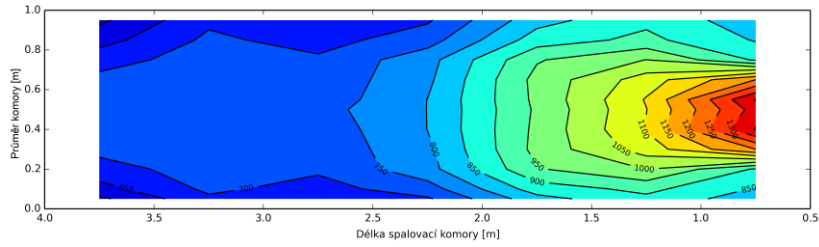
Obr. 30 – Teplotní mapa v horizontální rovině symetrie spalovací komory u metody AO.

OL režim



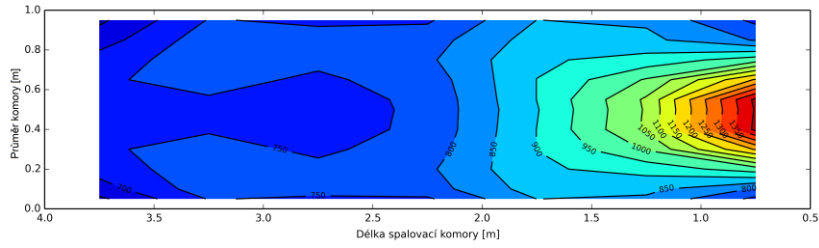
Jednostupňový

Dvoustupňový

Průtok 0 m_N³/hPrůtok 0 m_N³/h

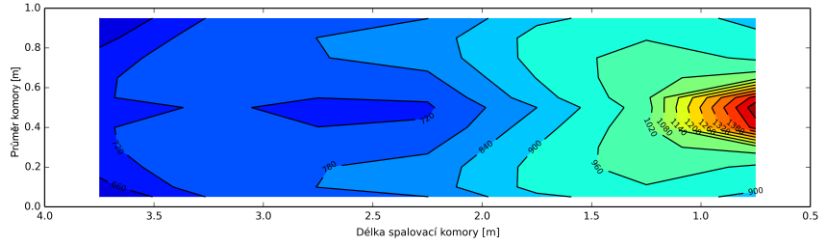
Jednostupňový

Dvoustupňový

Průtok 20 m_N³/hPrůtok 20 m_N³/h

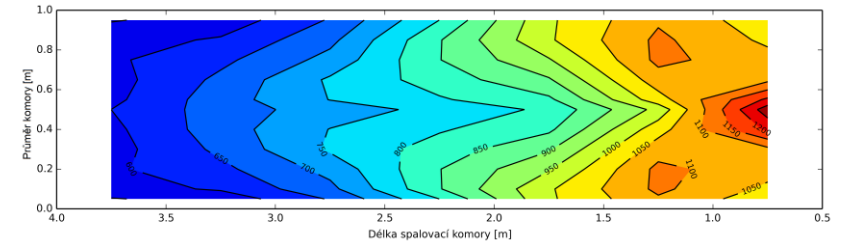
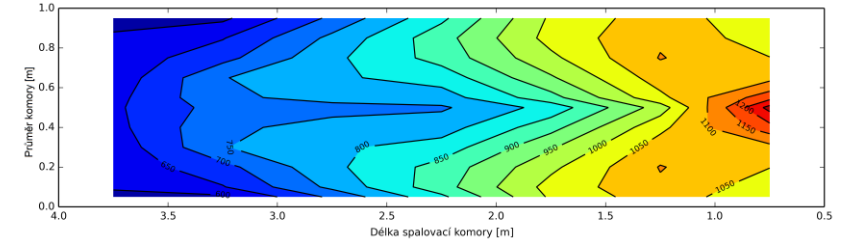
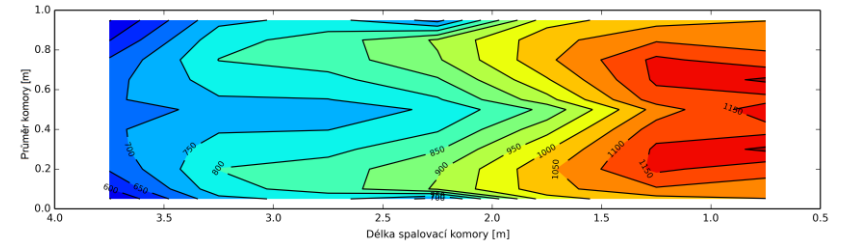
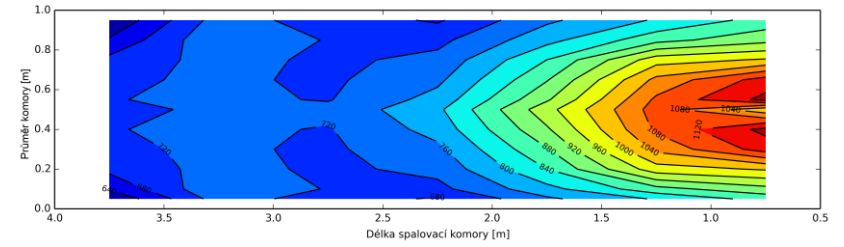
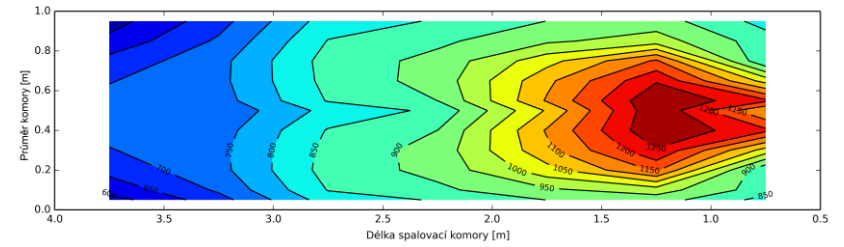
Jednostupňový

Dvoustupňový

Průtok 40 m_N³/hPrůtok 40 m_N³/h

Jednostupňový

Dvoustupňový

Průtok 60 m_N³/hPrůtok 60 m_N³/h

Dvoustupňový

Průtok 80 m_N³/h

Obr. 31 – Teplotní mapa v horizontální rovině symetrie spalovací komory u metody OL.

11. Závěr

Cílem diplomové práce bylo experimentální vyšetření charakteristických parametrů spalování při využití technologie OEC. Práce se zaměřovala na:

- Objasnění základních principů procesu spalování a technologie OEC,
- Využití OEC v průmyslových aplikacích,
- Bezpečnost při OEC a přehled technologií pro produkci kyslíku,
- Provedení spalovacích zkoušek s využitím tří OEC metod,
- Analýzu dosažených výsledků.

Výsledky získané během spalovacích zkoušek prokázaly, že technologie OEC může být využita v rozličných průmyslových sférách. Další podrobné zkoumání různých nastavení spalování přineslo pozitivní výsledky např. v tvorbě emisí NO_x . Bylo zjištěno, že při zkouškách s metodou AE emise NO_x v důsledku vysoké teploty v komoře prudce vzrostly. Zvýšením koncentrace kyslíku ve spalovacím vzduchu z 21 % na 33 % se zvýšila koncentrace NO_x více než 40 krát při jednostupňovém a více než 20 krát při dvoustupňovém režimu spalování paliva (zemního plynu). Podstatně lepších výsledků bylo dosaženo u metody AO, zvláště pokud byl použit režim dvoustupňového spalování, při kterém emise NO_x nepřekročily hodnotu 120 mg/mN^3 . Využitím metody OL při jednostupňovém režimu dosáhly emise NO_x přibližně 300 mg/mN^3 . V porovnání s množstvím emisí ostatních metod při tomto režimu se jedná o nejlepší dosažený výsledek, avšak již nesplňuje emisní limity [13]. Plameny vzniklé při OEC spalování byly obecně svítivější než plameny při spalování s atmosférickým vzduchem.

Zkoušky byly také zaměřeny na vyhodnocení distribuce tepelných toků v podélném směru spalovací komory. Bylo prokázáno, že se zvyšující se koncentrací kyslíku dochází ke zvýšenému přenosu tepla. Dostupné teplo bylo přibližně o 20 % (při koncentraci kyslíku 38 %) vyšší než při spalování s atmosférickým vzduchem. Nejvyššího přenosu tepla do stěn spalovací komory bylo dosaženo u metody OL s dvoustupňovým režimem spalování. Při koncentraci kyslíku 33 % přesáhla účinnost 85 %.

Součástí spalovacích zkoušek bylo také měření teplot uvnitř spalovací komory v horizontální rovině symetrie. Díky těmto poznatkům byly zhotoveny teplotní mapy uvnitř komory, které potvrdily výsledky předešlých testů. U metody AE bylo dosaženo velmi vysokých teplot (1665 °C), což mělo za následek zvýšenou tvorbu emisí NO_x . Celkově bylo prokázáno, že koncentrace NO_x velmi závisí na teplotě v plameni. Z teplotních map se také podrobněji zmapovala distribuce tepla uvnitř spalovací komory. Potvrdilo se, že při dvoustupňovém režimu spalování se plamen rozšiřuje a tím roste přenos tepla do stěn sekcí spalovací komory.

Přestože jednotlivé zkoušky přinesly pozitivní výsledky z pohledu nižších emisí a vyššího přenosu tepla, je těžké rozhodnout která OEC metoda má největší přínos pro stávající zařízení nebo proces. Proces výběru vhodné metody by byl ovlivněn požadavky na emisní limity, potřebným množstvím přeneseného tepla, požadavkem na rychlost vyhřátí pece, nebo výší provozních nákladů.

V závěrečné fázi zkoušek spalování proběhl tzv. FTFT („Furnace-temperature fixing test“). Při tomto testu byla snaha udržet průměrnou konstantní teplotu (900 °C)

uvnitř komory při různých koncentracích kyslíku. Teplota uvnitř spalovací komory se určila jako průměr naměřených hodnot z prvních pěti termočlánků, které byly zasunuty do pozice 50 cm od stěny vnitřního pláště. Obecně platí, že se zvyšujícím se průtokem kyslíku, vzrůstá teplota ve spalovací komoře. Z důvodu udržení konstantní teploty uvnitř spalovací komory se snižoval průtok zemního plynu. Test byl proveden pro metody AO a AE, obě v kombinaci s dvoustupňovým režimem spalování. Při referenční koncentraci kyslíku 21 % byl průtok zemního plynu 67,2 mN³/h. U metody AO se při koncentraci kyslíku 24,3 % snížila spotřeba zemního plynu na 50 mN³/h. Využitím metody AE při koncentraci kyslíku 25,6 % klesl průtok zemního plynu na 57,4 mN³/h. Pro vyšší průtoky O₂ či další metody se tento test již neprováděl a to otevírá cestu k další experimentální činnosti. Zkoumáním vlivu množství kyslíku na teplotu a emise se věnuje celá řada vědeckých skupin, ale doposud nebyla provedena žádná finanční analýza např. v úspoře paliva. Tento výzkum bude součástí budoucí práce.

Použitá literatura

- [1] Baukal C.E., *Oxygen-Enhanced Combustion*, USA, CRC PRESS, 1998, ISBN 0-8493-1695-2.
- [2] Chatel-Pelage F., Varagani R., Pranda P., Perrin N., Farzan H., Vecci S.J., Lu Y., Chen S., *Applications of oxygen for NO_x control and CO₂ capture in coal-fired power plants*, *Thermal Science* 2006, 10:119–142.
- [3] Skalska K., Miller J.S., Ledakowicz S., *Trends in NO_x abatement: A review*, *Science of the Total Environment* 2010, 408:3976–3989.
- [4] Wu K.K., Chang Y.C., Chen C.H., Chen Y.D., *High-efficiency combustion of natural gas with 21–30 % oxygen-enriched air*. *Fuel* 2010, 89:2455–2462.
- [5] Ballester J.M., Dopazo C., Fueyo N., Hernández M., Vidal P.J., *Investigation of low-NO_x strategies for natural gas combustion*, *Fuel* 1997, 76:435-446.
- [6] Baukal C.E., *Industrial Combustion, Pollution and Control*, USA, Marcel Dekker, 2004, ISBN 0-8247-4694-5.
- [7] The Chemical Composition of the Atmosphere, *atlantic.evsc.virginia.edu* [online]. 1996-03-05. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z WWW:<http://atlantic.evsc.virginia.edu/~bph/AW_Book_Spring_96/AW_Book_12.html>.
- [8] AGC Glass Europe: Kyslíkové spalování, *agc-glass.eu* [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z WWW:< <http://www.agc-glass.eu/Czech/Homepage/Innovation/Showcases/Process-innovation/Oxycombustion/page.aspx/2328>>.
- [9] Kyslíko-palivové technologie, *airproducts.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z WWW:<<http://www.airproducts.cz/industries/GlassMinerals/Oxy-Fuel-Techniques.aspx>>.
- [10] Co je zemní plyn, *zemniplyn.cz* [online]. 2010 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z WWW:<<http://www.zemniplyn.cz/plyn/>>.
- [11] Idriss, A., Spurrell, F., & Alberta. (2009). *Air quality model guideline*. Edmonton: Alberta Environment. ISBN 978-0-7785-8511-4.
- [12] Svoboda, K., et al; NO_x chemistry and emissions part II - heterogeneous reactions (N₂O). In Vovelle, C., & NATO Advanced Study Institute on Pollutants from Combustion Formation and Impact on Atmospheric Chemistry. (2000). *Pollutants from combustion: Formation and impact on atmospheric chemistry ; [proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Pollutants from Combustion Formation and Impact on Atmospheric Chemistry, Maratea, Italy, 13 - 26 September 1998]*. Boston u.a.: Kluwer.
- [13] Parlament České Republiky. Poslanecká sněmovna. (2012). *Vyhláška č. 415 sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. ISSN 1211-1244.
- [14] Radojevic M., *Reduction of nitrogen oxides in flue gases*. *Environmental Pollution* 1998,102:685-689.
- [15] Smoot L.D., Hill S.C., Xu H., *NO_x control through reburning*. *Progress in Energy and Combustion Science* 1998, 21:385-408.
- [16] Oxidy dusíku, *irz.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z WWW:<http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf>.
- [17] Zeldovich, Y.B., *Acta Physicochem*, U.S.S.R., 1946, 21:557.
- [18] Dlouhy, T., Dupal, T., & Dlouhy, J., *A Pulverized Coal-Fired Boiler Optimized for Oxyfuel Combustion Technology*. *Acta polytechnic* 2012,52:49-56.
- [19] Fenimore C.P., *Reactions of fuel-nitrogen in rich flame gases*, *Combustion and Flame* 1976; 26:249-256.

- [20] Laxa V., *Technická ekologie: Stanovení emisních koncentrací ve spalinách plynového hořáku*. Západočeská Univerzita V Plzni, Plzeň, 2006.
- [21] Pavelek, M.; Janotková, E.; Sekanina, B.; Kavička, F.; Jícha, M. *Termomechanika*. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN: 80-214-2409-5.
- [22] Plynárenská příručka – 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě, Praha, GAS s.r.o., 1997, ISBN 80-902339-6-1.
- [23] Burner Innovation for Glass Melting, *glasstec.de* [online]. [cit. 2014-04-07]. 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>.
- [24] Wüning J.A., Wüning J.G., *Flameless oxidation to reduce thermal NO-Formation*. Progress in Energy and Combustion Science 1997, 23:81-94.
- [25] Kyslíkem obohacené spalování, *technickytydenik.cz* [online]. 2013-02-28 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z WWW: <http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kyslikem-obohacene-spalovani_20251.html>.
- [26] Harris, M. E., Grumer, J., Von Elbe, G., and Lewis, B., *Burning velocities, quenching, and stability data on nonturbulent flames of methane and propane with oxygen and nitrogen*, Third Symposium on Combustion, Flame and Explosion Phenomena, Baltimore, 1949, 80.
- [27] Gill, J. H. and Quiel, J. M., *Incineration of Hazardous, Toxic, and Mixed Wastes*, North American Manufacturing Company, Cleveland, 1993.
- [28] Reed, R. J., *North American Combustion Handbook*, 3rd ed., Vol. II, Part 13, North American Manufacturing Company, Cleveland, OH, 1997.
- [29] Kyslíkem obohacené spalování, *messergroup.com* [online]. 2012 [cit.2014-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.messergroup.com/cz/Tisk/Archiv-2012/TT25.pdf>>.
- [30] Oxygen-Enhanced combustion for chemicals, *praxair.com* [online]. 2014 [cit.2014-05-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.praxair.com/industries/chemicals/oxygen-enhanced-combustion>>.
- [31] Ovidou, M., Châtel-Pélage, F., Usman Ghani, M., Perrin, N., Carty, R., Philo, G.R., Farzan, H., & Vecci, S.J., *Low-oxygen enrichment in coal-fired utility boilers*. The 28th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater.
- [32] Weman K., *Welding processes handbook*. New York 2003, NY: CRC Press LLC. ISBN 0849317738.
- [33] Beeson, H.D., Stewart, W.F., Smit, S.R., *Safe Use of Oxygen and Oxygen Systems: handbook for design, operation, and maintenance*, American Society for Testing and Materials, USA 2005, ISBN 978-0-8031-4470-5
- [34] Tepelné rizika, *safepro.sk* [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.safepro.sk/tepelne-rizika/>>.
- [35] Thorogood, R. M., in *Cryogenic Engineering*, Hands, B. A., Ed., Academic Press, London 1986, Chap. 16.
- [36] About Gas Generation, *ranacaregroup.com* [online]. 2010 [cit. 2014-04-9]. Dostupné z WWW:<<http://www.ranacaregroup.com/on-site-gas-systems/about-gas-generation>>.
- [37] Hudák, I. *Charakteristické parametry procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 44 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D..

- [38] Ústav procesního inženýrství FSI VUT v Brně [online].2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <<http://upei.fme.vutbr.cz/>>.
- [39] 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.
- [40] Bělohradský P, et al., *Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics*, Energy (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.026>.

Seznam obrázků

Obr. 1 – Vliv přidávání kyslíku na teplotu plamene.	17
Obr. 2 – Schéma obohacování vzduchu kyslíkem.	25
Obr. 3 – Schéma vstřikování kyslíku do plamene.	26
Obr. 4 – Schéma nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem.	26
Obr. 5 – Schéma samostatného přívodu vzduchu a kyslíku do hořáku.	27
Obr. 6 – Spalovací trojúhelník.	33
Obr. 7 – Meze zápalnosti pro metan ve vzduchu obohaceném O_2	35
Obr. 8 – Metody produkce kyslíku v závislosti na čistotě a množství.	37
Obr. 9 – Blokové schéma jednotky separace vzduchu.	38
Obr. 10 – Diagram jednotky separace vzduchu.	39
Obr. 11 – Schéma adsorpce za změny tlaku vzduchu.	40
Obr. 12 – Schéma adsorpce za změny tlaku a vakua.	41
Obr. 13 – Schéma zkušebny hořáků.	42
Obr. 14 – Schéma šroubovice a zkratových proudů.	43
Obr. 15 – Zkušebna hořáků na ÚPEI.	44
Obr. 16 – 3D model hořáku s dvoustupňovým přívodem paliva.	45
Obr. 17 – a) Výparník, b) měřící panel.	46
Obr. 18 – a) 3D model difuzoru, b) detail koncové části difuzoru.	47
Obr. 19 – a) 3D model kyslíkové trysky, b) detail koncové části trysky.	48
Obr. 20 – Vliv koncentrace O_2 na množství NO_x u metody AE.	49
Obr. 21 – Vliv koncentrace O_2 na množství NO_x u metody AO.	50
Obr. 22 – Vliv koncentrace O_2 na množství NO_x u metody OL.	52
Obr. 23 – Srovnání množství NO_x mezi AE, AO a OL testy.	53
Obr. 24 – Srovnání teploty spalin mezi AE, AO a OL testy.	55
Obr. 25 – Profily tepelných toků do stěny spalovací komory metod AE, AO a OL.	57
Obr. 26 – a) Tepelná účinnost při různých koncentracích O_2 , b) zobr. v detailu.	59
Obr. 27 – Termočlánky ve spalovací komoře.	62
Obr. 28 – Dataloger.	62
Obr. 29 – Teplotní mapa spalovací komory u metody AE.	63
Obr. 30 – Teplotní mapa spalovací komory u metody AO.	64
Obr. 31 – Teplotní mapa spalovací komory u metody OL.	65

Seznam tabulek

Tab. 1 – Chemické složení atmosférického vzduchu.	16
Tab. 2 – Typické složení zemního plynu a jeho výhřevnost.	18
Tab. 3 – Teoretická teplota plamene topných plynů.	23
Tab. 4 – Hodnoty laminární rychlosti šíření plamene pro některé plyny.	29
Tab. 5 – Potenciální možnosti použití kyslíkem obohaceného spalování.	31
Tab. 6 – Meze zápalnosti pro směsi hořlavých plynů se vzduchem.	34
Tab. 7 – Plán experimentů.	47
Tab. 8 – Shrnutí výsledků TESTU A – metoda AE.	49
Tab. 9 – Shrnutí výsledků TESTU A – metoda AO.	50
Tab. 10 – Shrnutí výsledků TESTU A – metoda OL.	51
Tab. 11 – Porovnání konc. NO _x pro jednotlivé OEC metody při 29 % O ₂	53
Tab. 12 – Porovnání konc. NO _x pro jednotlivé OEC metody při max. konc. O ₂	53
Tab. 13 – Technické parametry senzorů v analyzátoru spalin.	54
Tab. 14 – Hodnoty tepelných toků v TESTU B.	58
Tab. 15 – Technické parametry senzorů vodou chlazeného systému.	59
Tab. 16 – Hodnoty výkonu a tepelné účinnosti v TESTU B.	60

Obsah DVD

- Diplomová práce v PDF formátu
- Naměřená data z datalogeru
- Výpočty NO_x , tepelných toků a teplot

Přílohy

Příloha A – Technická dokumentace

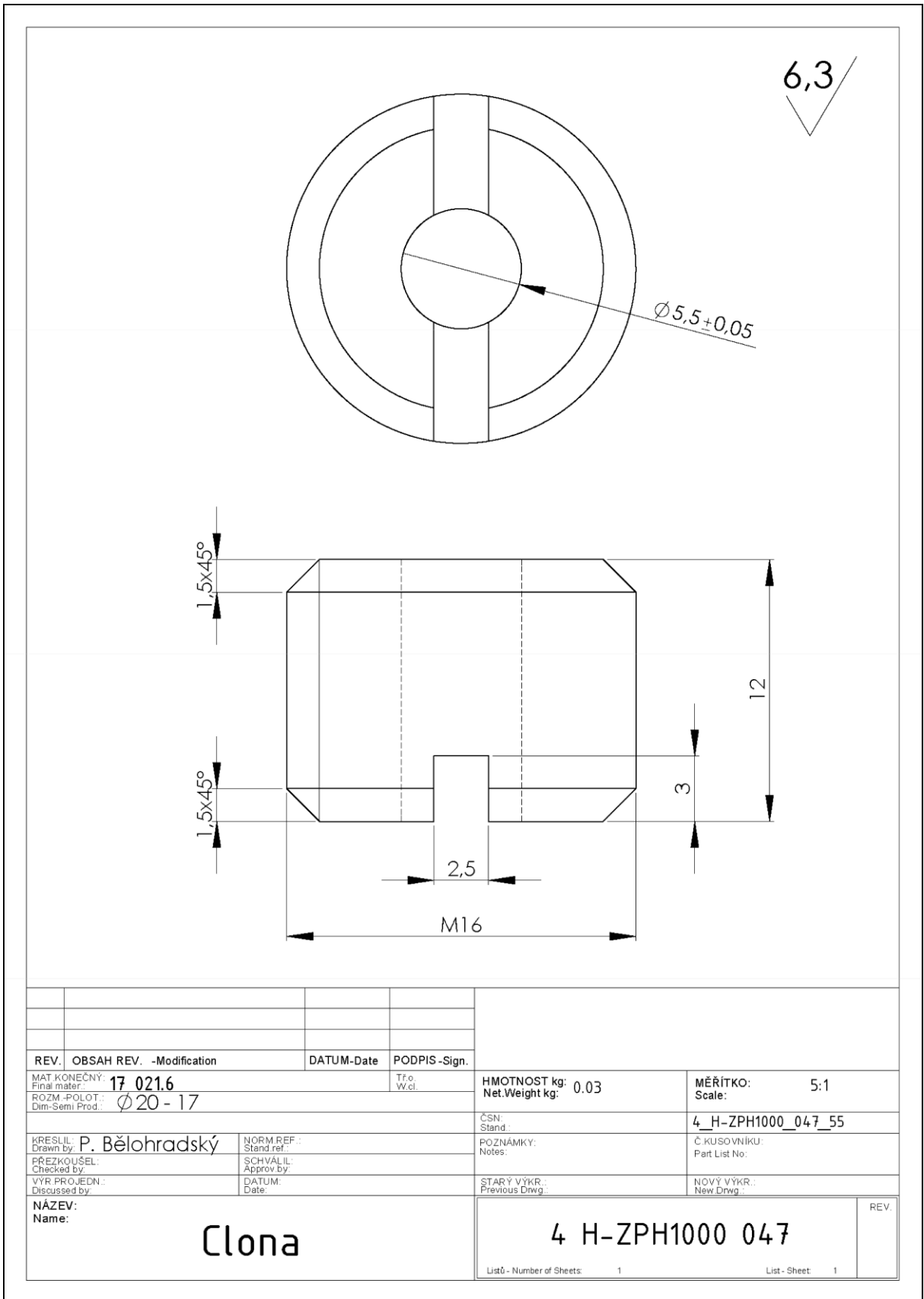
- A–I Výkres omezovací clony na primární stupni hořáku.
- A–II Výkres poutače plamene.
- A–III Výkres primární hlavy hořáku.
- A–IV Výkres sekundární trysky.
- A–V Měřicí list pro manuální záznam měření.
- A–VI Výkres difuzoru.
- A–VII Výkres kyslíkové trysky.
- A–VIII Výkres sestavy termočlánku.

Příloha B – Chybová analýza

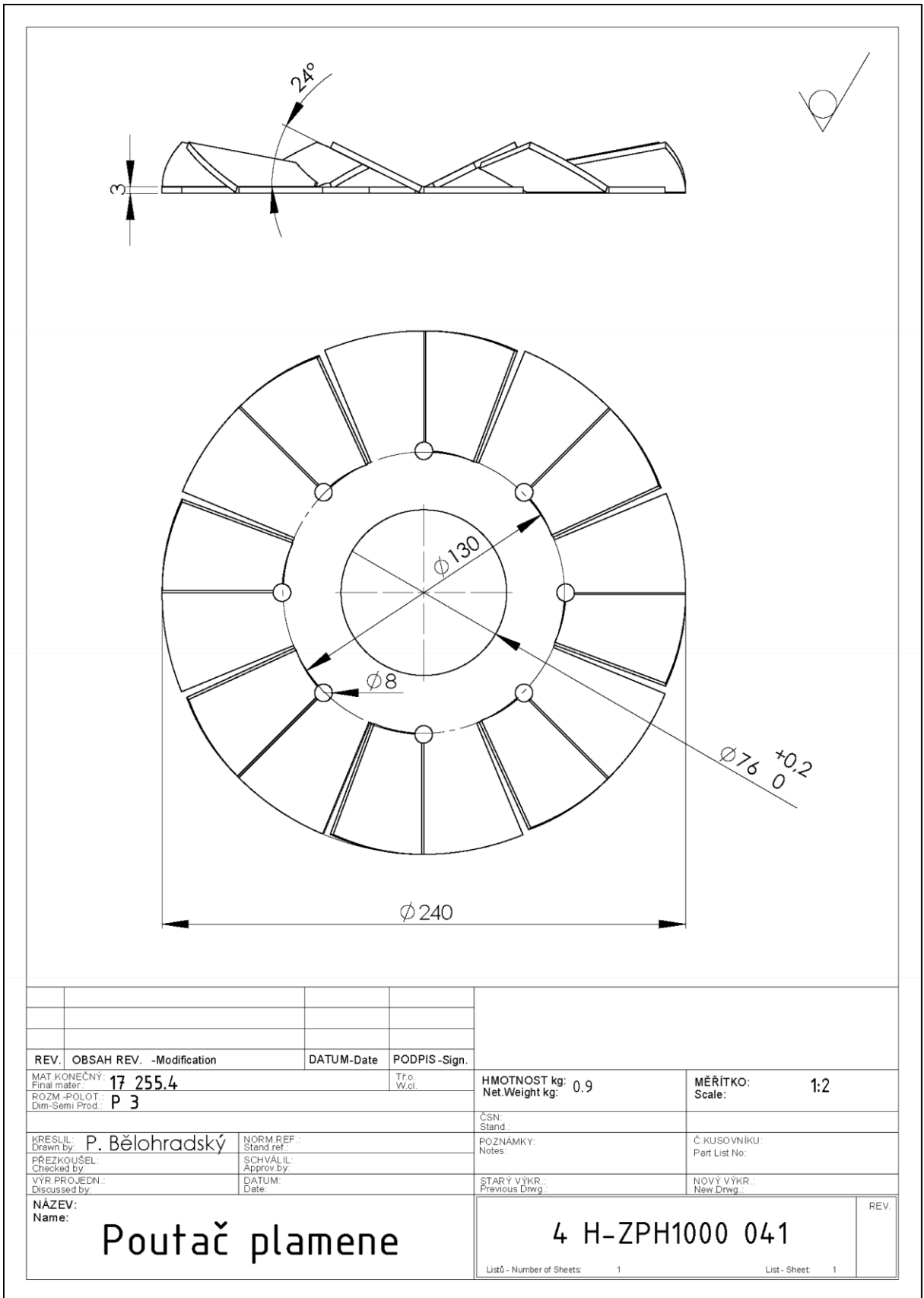
- B–I Chybová analýza NO_x.
- B–II Chybová analýza tepelných toků.

Příloha A

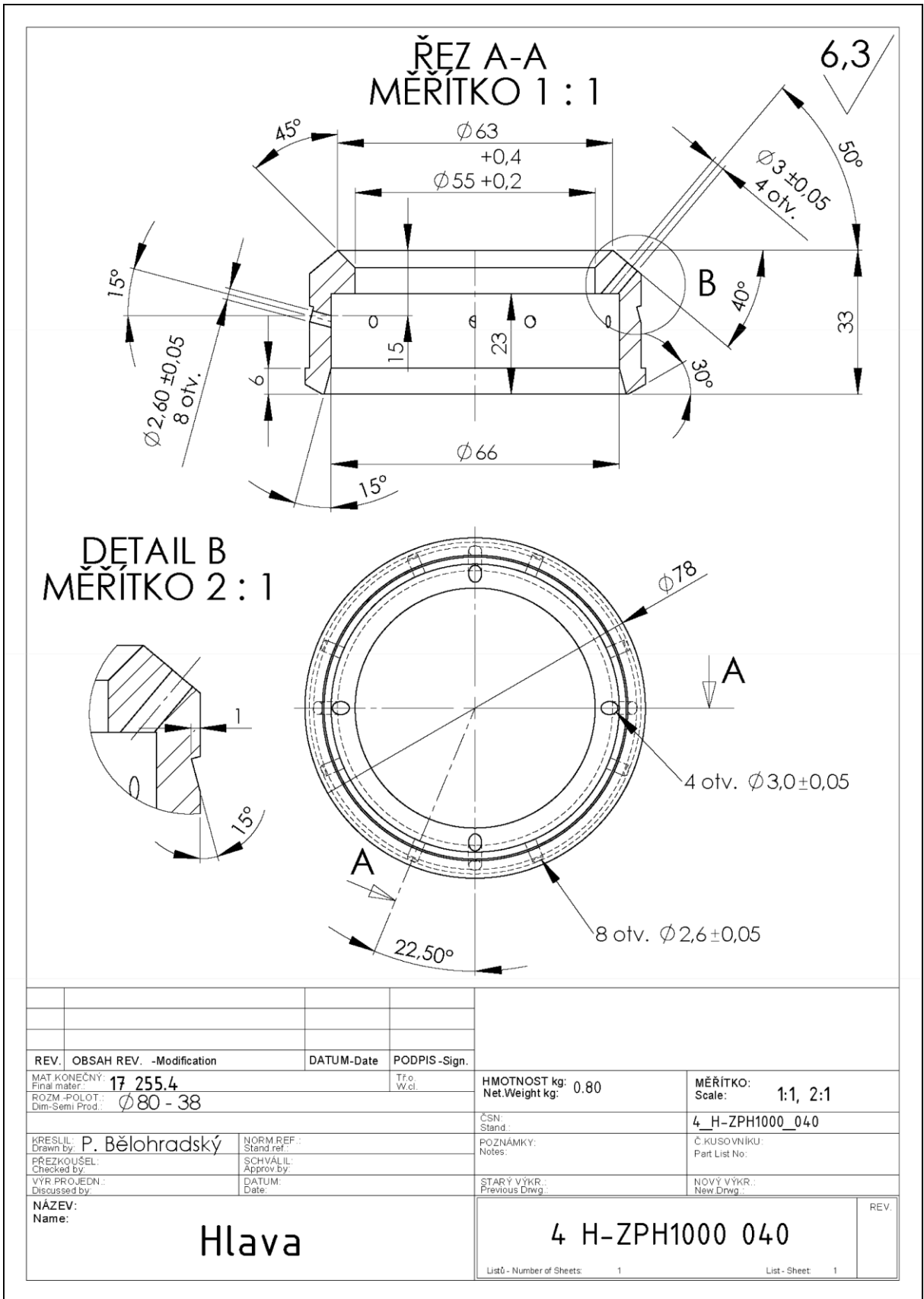
Technická dokumentace



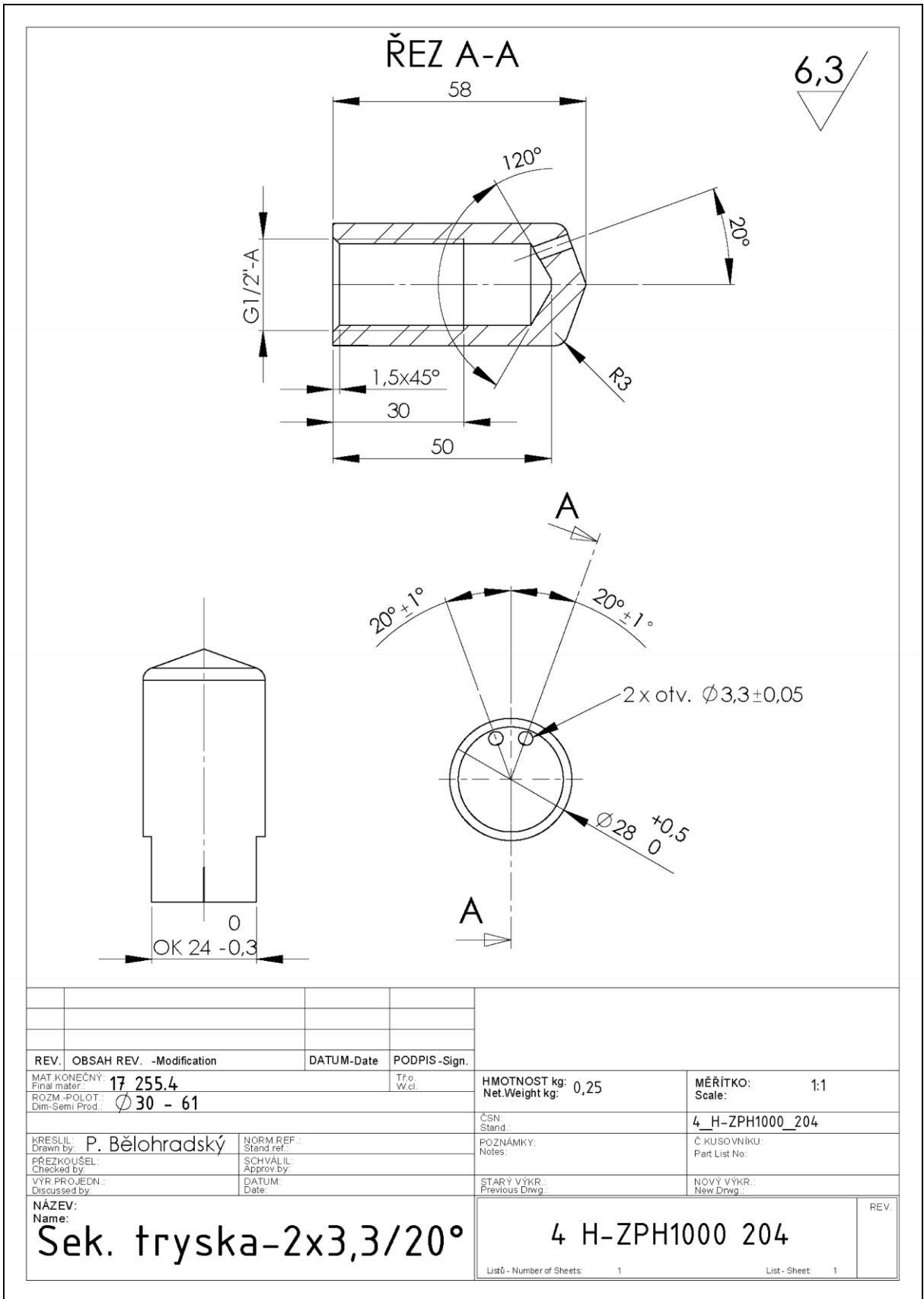
A-I Výkres omezovací clony na primárním stupni hořáku.



A-II Výkres poutače plamene.



A-III Výkres primární hlavy hořáku.

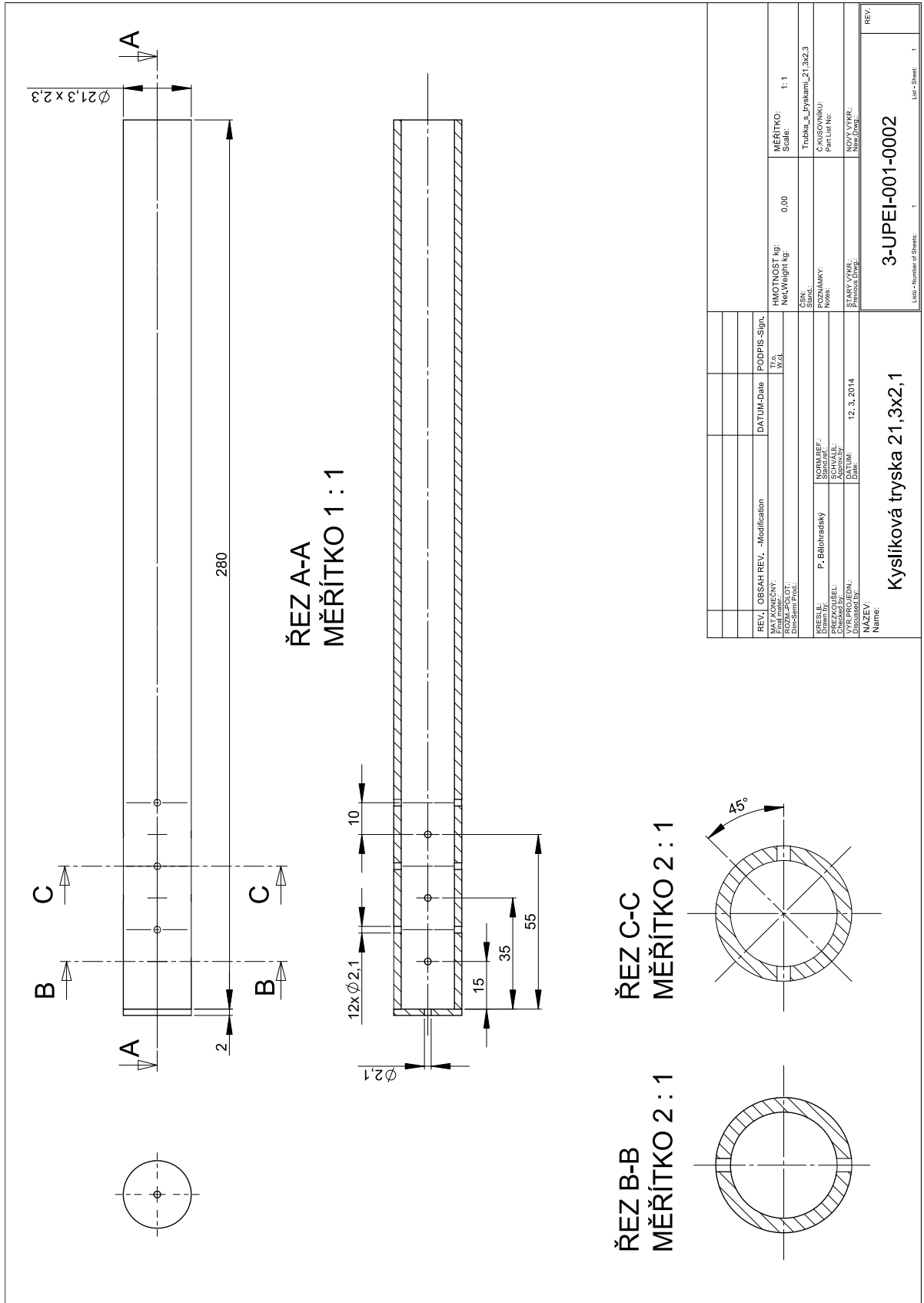


A-IV Výkres sekundární trysky.

Spalovací zkoušky OEC

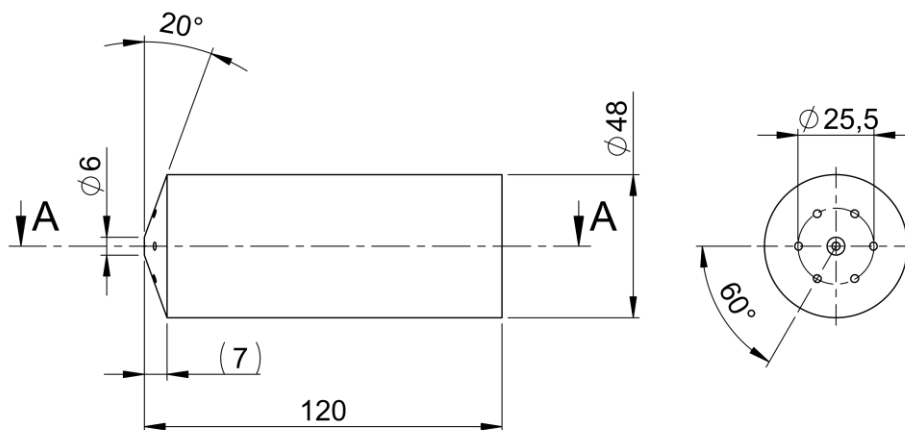
Číslo měření		Datum měření		Čas měření																		
Nastavení:				Tlak O2																		
Výkon hořáku		Průtok O2		Tlak O2 [bar]																		
Zemní plyn				Spalovací vzduch			Kyslík			Spaliny			Spalovací vzduch									
Měřená veličina	Průtok ZP na plynoměr	Průtok na plynoměr	Teplota ZP	Výkon hořáku	Tlak ZP v rozvodu	Tlak ZP na hořáku	Průtok vzduchu	Průtok ventilátoru	Teplota vzduchu	Průtok	Teplota spalín	Podtlak koutovod	O ₂	CO	NO	NO _x	CO ₂	Objem spalín	Dopočítaný průtok	Dopočítaná koncentrace		
Jednotka	m ³ /h	F60	°C	kW	kPa	kPa	m ³ /h	Pa	°C	m ³ /h	°C	Pa	%	ppm	ppm	mg/m ³	%	m ³ /h	m ³ /h	%		
PID	F60	F60U	T12	Q91	P35	F39	F61	P48	T15	-	T09	P47	Q92	Q93	Q94	Q95	-	-	-	-	-	
Číslo odběru čas	1																					
Číslo odběru čas	2																					
Číslo odběru čas	3																					
Průměr																						
Podtlak komora - mikromanometr																						
Délka plamene																						
Průměr plamene																						
Ústí plamene																						
Stabilita plamene																						

A–V Měřicí list pro manuální záznam měření.

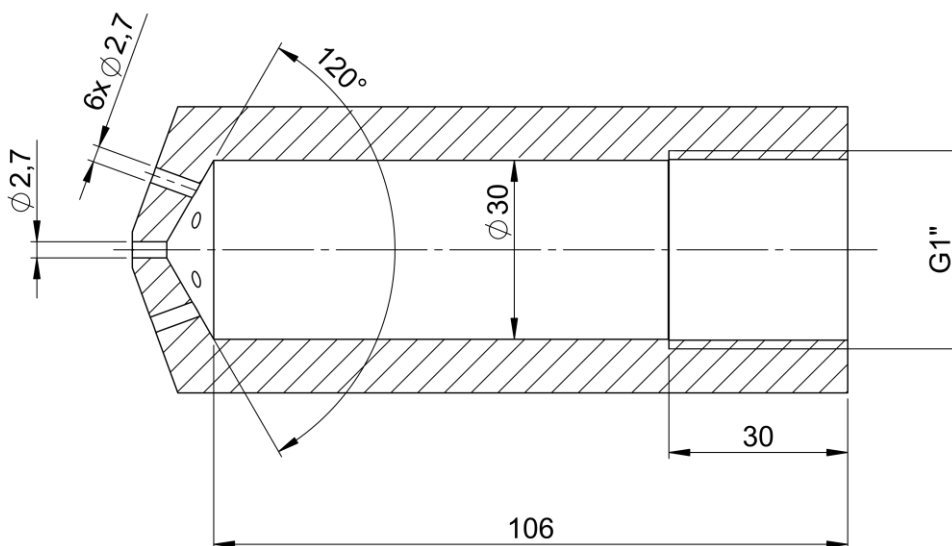



A–VI Výkres difuzoru.

REV. I	OBSAH	REV. -Modification	DATUM-Date	PODPIS-Sign.	HMOTNOST kg: Net Weight kg:	MĚŘÍTKO: Scale:
	MAX. KONEČNÝ: ROZMĚR-POLOH.: Dim-Stem Posit.			17.0: 18.0:	0.00	1: 1
	UVEDLI: Dělal by:	P. Bělohřezský				Trubka_lyslemti_21_3x2_3
	PREZKOUBEL: YTR.PROJEDN.:	SCHWALL: Datum:				C.KUSOVNIKU: Part List No.
	YTR.PROJEDN.:	DATUM: Date:	12. 3. 2014			NOVÝ VÝKR: New Draw.
	NÁZEV: Name:					
Kyslíková tryska 21,3x2,1				3-JUPEI-001-0002		
Lstič - Number of Sheets				1		
						REV. 1

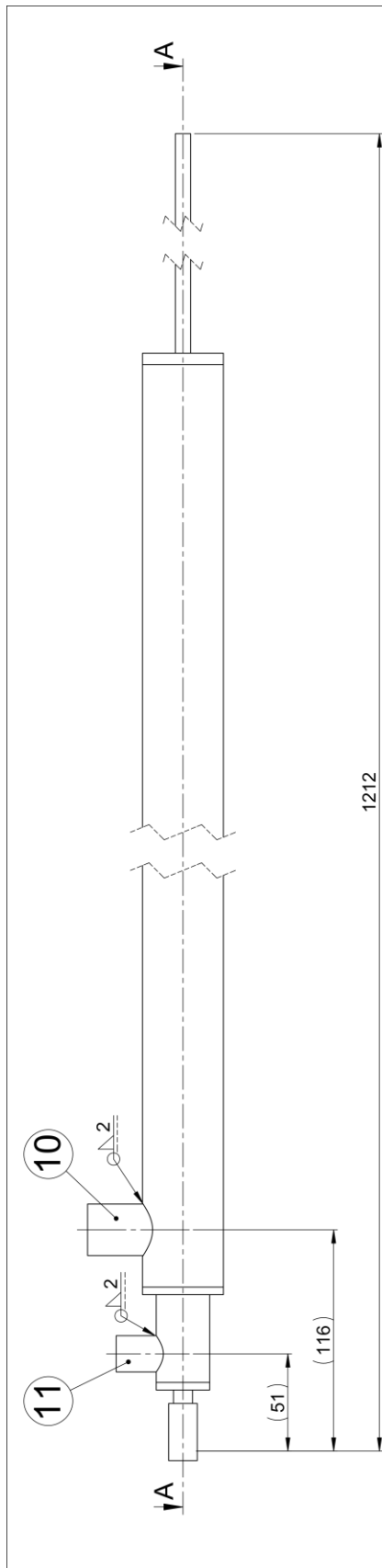


ŘEZ A-A
MĚŘITKO 1 : 1

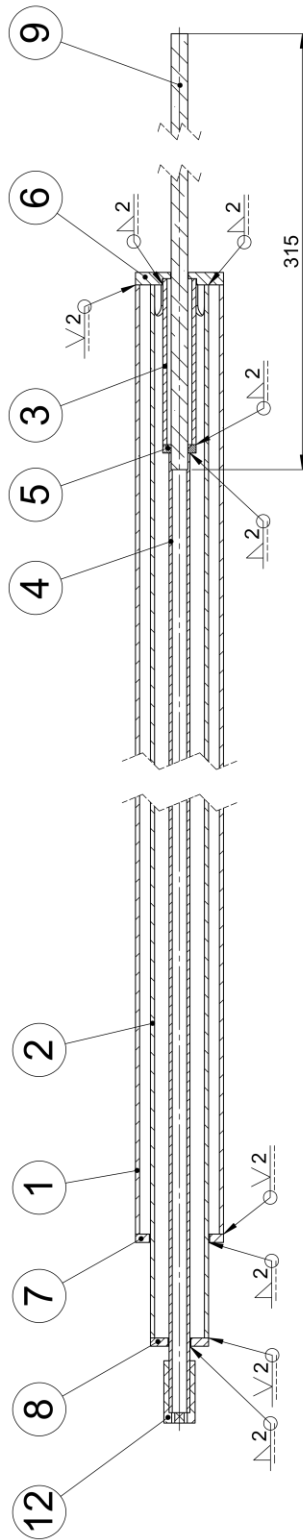


				 ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKO INŽENÝRSTVÍ Fakulta strojního inženýrství Vysoké učení technické v Brně		
REV.	OBSAH REV. -Modification	DATUM-Date	PODPIS-Sign.			
MAT.KONEČNÝ: Final mater.:			Tř.o. W.cl.		HMOTNOST kg: Net.Weight kg:	MĚŘITKO: Scale: 1:2
ROZM.-POLOT.: Dim-Semi Prod.:					ČSN: Stand.:	FORMÁT VÝKRESU: A 4
KRESLIL: Bělohradský Drawn by:		NORM.REF.: Stand.ref.:		POZNÁMKY: Notes:		Č.KUSOVNÍKU: Part List No:
PŘEZKOUSEL: Checked by:		SCHVÁLIL: Approv.by:		STARÝ VÝKR.: Previous Drwg.:		NOVÝ VÝKR.: New.Drwg.:
VÝR.PROJEDN.: Discussed by:		DATUM: Date:				
NÁZEV: Name: Tryska 120 mN3/h				4-UPEI-002-0004		REV.
				Listů - Number of Sheets: 1		List - Sheet: 1

A-VII Výkres kyslíkové trysky.



ŘEZ A-A
MĚŘITKO 1 : 2



Číslo pozic odpovídají kusovníku.
POSTUP SESTAVĚNÍ

- Do pozice 3 veváří pozici 5.
- Do pozice 5 veváří pozici 4.
- Do pozice 6 veváří pozici 3.
- Do pozice 6 veváří pozici 2.
- Do pozice 6 veváří pozici 1.
- Do pozice 1 veváří pozici 7.
- Do pozice 2 veváří pozici 8.
- Do pozice 1 veváří pozici 10.
- Do pozice 2 veváří pozici 11.
- Nasadit pozici 9 a 12.

Č. POLOŽKY	Č. VÝKRESU	POPIS	MNOŽSTVÍ
1	4-TPCP-106-101	Vnější plast	1
2	3-TPCP-106-102	Meziplast	1
3	4-TPCP-106-103	Vnitřní plast - I.cást	1
4	4-TPCP-106-104	Vnitřní plast - II.cást	1
5	4-TPCP-106-105	Vnitřní plast - III.cást	1
6	4-TPCP-106-106	Celo přední	1
7	4-TPCP-106-107	Celo zadní - vnější plast	1
8	4-TPCP-106-108	Celo zadní - vnitřní plast	1
9	4-TPCP-106-109	Keramický hrot	1
10	4-TPCP-106-110	Natrubek DN15	1
11	4-TPCP-106-111	Natrubek DN8	1
12	4-TPCP-106-112	Plastová koncovka	1

		ÚSTAV PROCESNÍHO A VRSŤVÍ Fakulta strojního inženýrství Vysoké učení technické v Brně
REV.	DBSAH REV.	PODPIS - Sign.
MAT. KONEČNÝ Dim-Semi Prod.	DATUM-Date	Tř. o. M.ř.č.
HMOTNOST kg: Net Weight kg:	1,2	MĚŘITKO: Scale:
CSN: Stand.:		C. KUSOVNIKU: Part List No.:
POZNÁMKY: Notes:		NOVÝ VÝKR: New Drawg.
USBAH REF. Sborovár:	SKR/JA	
PREKVOŠEL: ROZM. PŮLOT. Date:	8.7.2016	
NAME V: Name:		
Termočlánek - sestava		3-TPCP-106-100
List - Number of Sheets: 1		List - Sheet: 1

A-VIII Výkres sestavy termočlásku.

Příloha B

Chybová analýza

Režim spalování	Celková konc. O ₂ [%]	Průtok O ₂ [mN ³ /h]	NO _x (dopočítané) [mg/mN ³]	Relativní chyba [%]
AE jednostupňový	21,00	0	171	8,5
AE jednostupňový	21,50	5	195	7,5
AE jednostupňový	22,00	10	242	6,4
AE jednostupňový	23,10	20	381	5,5
AE jednostupňový	24,30	30	600	5,1
AE jednostupňový	25,60	40	1107	5,0
AE jednostupňový	29,00	60	3511	4,9
AE jednostupňový	33,00	80	7099	4,9
AE dvoustupňový	21,00	0	82	17,7
AE dvoustupňový	21,50	5	92	15,7
AE dvoustupňový	22,00	10	105	13,8
AE dvoustupňový	23,10	20	145	10,0
AE dvoustupňový	24,30	30	199	7,3
AE dvoustupňový	25,60	40	316	5,7
AE dvoustupňový	29,00	60	800	5,1
AE dvoustupňový	33,00	80	1724	4,9
AE dvoustupňový	38,00	100	2949	4,9
AE dvoustupňový	46,00	120	4892	4,9
AO jednostupňový	21,50	5	168	8,6
AO jednostupňový	22,00	10	181	8,0
AO jednostupňový	23,10	20	212	6,9
AO jednostupňový	24,30	30	275	6,1
AO jednostupňový	25,60	40	434	5,4
AO jednostupňový	29,00	60	1181	5,0
AO jednostupňový	33,00	80	1579	4,9
AO jednostupňový	38,00	100	1450	5,0
AO dvoustupňový	21,50	5	98	14,8
AO dvoustupňový	22,00	10	92	15,8
AO dvoustupňový	23,10	20	82	17,7
AO dvoustupňový	24,30	30	84	17,2
AO dvoustupňový	25,60	40	81	18,0
AO dvoustupňový	29,00	60	104	13,9
AO dvoustupňový	33,00	80	111	13,1
AO dvoustupňový	38,00	100	85	17,1
OL jednostupňový	21,50	5	181	8,0
OL jednostupňový	22,00	10	203	7,1
OL jednostupňový	23,10	20	218	6,9
OL jednostupňový	24,30	30	230	6,7
OL jednostupňový	25,60	40	267	6,3
OL jednostupňový	29,00	60	351	5,7
OL dvoustupňový	21,50	5	83	17,5
OL dvoustupňový	22,00	10	95	15,2
OL dvoustupňový	23,10	20	114	12,8
OL dvoustupňový	24,30	30	117	12,4
OL dvoustupňový	25,60	40	114	12,8
OL dvoustupňový	29,00	60	130	11,2
OL dvoustupňový	33,00	80	149	9,7

B-I Chybová analýza NO_x.

Režim spalování	Celková konc. O ₂ [%]	Průtok O ₂ [mN ³ /h]	Relativní chyba						
			Sekce 1 [%]	Sekce 2 [%]	Sekce 3 [%]	Sekce 4 [%]	Sekce 5 [%]	Sekce 6 [%]	Sekce 7 [%]
AE jednostupňový	21,00	0	4,66	2,62	1,74	1,99	2,22	2,67	2,03
AE jednostupňový	22,78	20	3,78	2,23	1,76	1,84	2,14	2,57	1,96
AE jednostupňový	25,36	40	4,10	2,23	1,48	1,78	1,97	2,41	1,99
AE jednostupňový	30,80	70	3,05	1,69	1,32	1,60	1,62	2,11	1,97
AE dvoustupňový	21,00	0	3,53	1,57	1,32	1,85	1,88	2,31	2,11
AE dvoustupňový	22,79	20	3,81	1,75	1,47	1,92	2,25	2,71	2,40
AE dvoustupňový	25,35	40	2,89	1,41	1,28	1,67	2,11	2,69	2,58
AE dvoustupňový	33,20	80	2,55	1,25	1,09	1,64	2,07	2,30	2,35
AE dvoustupňový	48,74	119	2,58	1,28	1,15	1,64	2,02	2,37	2,08
AO jednostupňový	21,00	0	4,66	2,62	1,74	1,99	2,22	2,67	2,03
AO jednostupňový	22,80	20	3,73	2,27	1,59	1,97	2,18	2,57	2,16
AO jednostupňový	25,37	40	4,13	2,05	1,52	1,65	1,85	2,01	1,86
AO jednostupňový	33,29	80	2,99	1,67	1,37	1,54	1,60	1,65	1,74
AO dvoustupňový	21,00	0	3,53	1,57	1,32	1,85	1,88	2,31	2,11
AO dvoustupňový	22,79	20	3,60	1,81	1,51	1,94	2,20	2,61	2,30
AO dvoustupňový	25,36	40	3,15	1,52	1,39	1,73	1,97	2,14	2,00
AO dvoustupňový	33,14	80	2,52	1,56	1,33	1,56	1,69	2,16	2,04
OL jednostupňový	21,00	0	4,66	2,62	1,74	1,99	2,22	2,67	2,03
OL jednostupňový	22,80	20	3,15	1,93	1,48	1,74	2,14	2,73	2,09
OL jednostupňový	25,37	40	3,25	2,26	1,55	1,72	2,05	2,42	1,83
OL dvoustupňový	21,00	0	3,53	1,57	1,32	1,85	1,88	2,31	2,11
OL dvoustupňový	22,79	20	2,44	1,53	1,27	1,76	2,04	2,60	1,97
OL dvoustupňový	25,34	40	2,77	1,78	1,43	1,70	2,11	2,65	2,16
OL dvoustupňový	33,27	80	2,03	1,19	1,16	1,55	2,16	2,93	2,59

B-II Chybová analýza tepelných toků.