



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# OBOHACOVÁNÍ SPALOVACÍHO VZDUCHU VYSOCE ČISTÝM KYSLÍKEM

AIR ENRICHMENT WITH HIGHLY PURE OXYGEN IN COMBUSTION PROCESSES

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kryštof Polášek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

BRNO 2018

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	<b>Kryštof Polášek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

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 bakalářské práce:

## **Obohacování spalovacího vzduchu vysoce čistým kyslíkem**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Průmyslové aplikace, např. zpracování kovových a nekovových materiálů, zpracování sklářských písků aj., se vyznačují vysokou spotřebou tepelné energie. Zdrojem tepelné energie je ve většině aplikací proces spalování, kde se obvykle jako oxidační činidlo používá atmosférický vzduch. Pokud je požadavkem zvýšení účinnosti spalovacího procesu, snížení spotřeby paliva anebo velmi vysoké teploty, je výhodné použít spalovací vzduch, ve kterém je koncentrace kyslíku vyšší než 21 %. Takový proces se v anglické terminologii nazývá jako „oxygen-enhanced combustion“ (OEC). OEC se vyznačuje významnou úsporou paliva, nízkým objemem spalin, vysokými teplotami a velkou mírou intenzity přenosu tepla.

Předmětem bakalářské práce tedy je:

- Seznámit se s problematikou průmyslového spalování, zejména OEC.
- Seznámit se hlavními zásadami bezpečné manipulace s vysoce čistým kyslíkem.
- Provést zhodnocení kladů a záporů OEC v porovnání s konvenčním způsobem spalování.
- Na jednoduchém praktickém příkladu provést bilanční výpočet spalování pro různé koncentrace O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu.
- Provést souhrnné zhodnocení obdržených výsledků a diskusi zjištěných poznatků.

**Cíle bakalářské práce:**

- 1) Studium doporučených podkladů týkajících se problematiky a aspektů spalování se vzduchem obsahujícím více než 21 % kyslíku (OEC).
- 2) Zpracování základního přehledu problematiky OEC a oblastí využití OEC v průmyslu.
- 3) Zpracování zásad bezpečné manipulace s kyslíkem.
- 4) Provedení jednoduchých bilančních výpočtů OEC užitím simulačního software ChemCad pro vyhodnocení vlivu koncentrace kyslíku ve spalovacím vzduchu na charakteristické parametry spalovacího procesu.
- 5) Závěrečná diskuze dosažených výsledků a poznatků.

**Seznam doporučené literatury:**

BAUKAL, Charles E., ed. Industrial Combustion Pollution and Control. CRC Press, 2003. 916 s. ISBN 9780824746940.

BAUKAL, Charles E., ed. Industrial Burners Handbook. CRC Press, 2003. 808 s. ISBN 9780849313868.

BAUKAL, Charles E., ed. Oxygen-Enhanced Combustion. CRC Press, 2013, 792 s. ISBN 9781439862285.

WU, Kuo-Kuang et al. High-efficiency combustion of natural gas with 21–30% oxygen-enriched air. Fuel. 2010, 89, 2455-2462. ISSN 0016-2361.

MERLO, Nazim et al. Combustion characteristics of methane–oxygen enhanced air turbulent non-premixed swirling flames. Experimental Thermal and Fluid Science. 2014, 56, 53-60. ISSN 0894-1777.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kyslíkem obohacným spalováním (tzv. „*oxygen enhanced combustion*“). V práci jsou popsány jednotlivé metody obohacování spalovacího procesu, dále jsou zhodnoceny výhody a nevýhody obohacování. Následuje přehled využití v jednotlivých průmyslových oblastech. Jelikož při manipulaci s kyslíkem je potřeba dbát určitých bezpečnostních opatření, bezpečnosti při kyslíkem obohacném spalování se věnuje samostatná kapitola. V poslední části práce je provedena simulace kyslíkem obohacného spalování v softwaru ChemCAD. Simulací byl sledován vliv koncentrace kyslíku v oxidačním činidle na objem a teplotu spalin, hustotu a viskozitu spalin a koncentraci CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O ve spalinách.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Kyslíkem obohacené spalování, spalování, kyslík, NO<sub>x</sub> emise.

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the oxygen enhanced combustion (OEC). The thesis describes different methods of enriching the combustion process with oxygen, also the advantages and disadvantages of enhancing the combustion are evaluated. The next part contains an overview of the use of OEC in specific industries. Since certain safety precautions must be taken when handling of oxygen, a separate chapter deals with the safety of oxygen enhanced combustion. In the last part of the thesis a simulation of the OEC process in ChemCAD software was carried out. The influence of oxygen concentration in the oxidizing agent on the flue gas volume, temperature, density and viscosity and the concentration of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in the flue gas was investigated.

## KEYWORDS

Oxygen enhanced combustion, combustion, oxygen, NO<sub>x</sub> emissions.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POLÁŠEK, K. *Obohacování spalovacího vzduchu vysoce čistým kyslíkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Bělohradského, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2018

.....

Kryštof Polášek





## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Bělohradskému, Ph.D. za jeho ochotu a přínosné rady v průběhu celého jejího vypracování. Také bych rád poděkoval své rodině a všem svým blízkým za jejich podporu v průběhu celého studia.



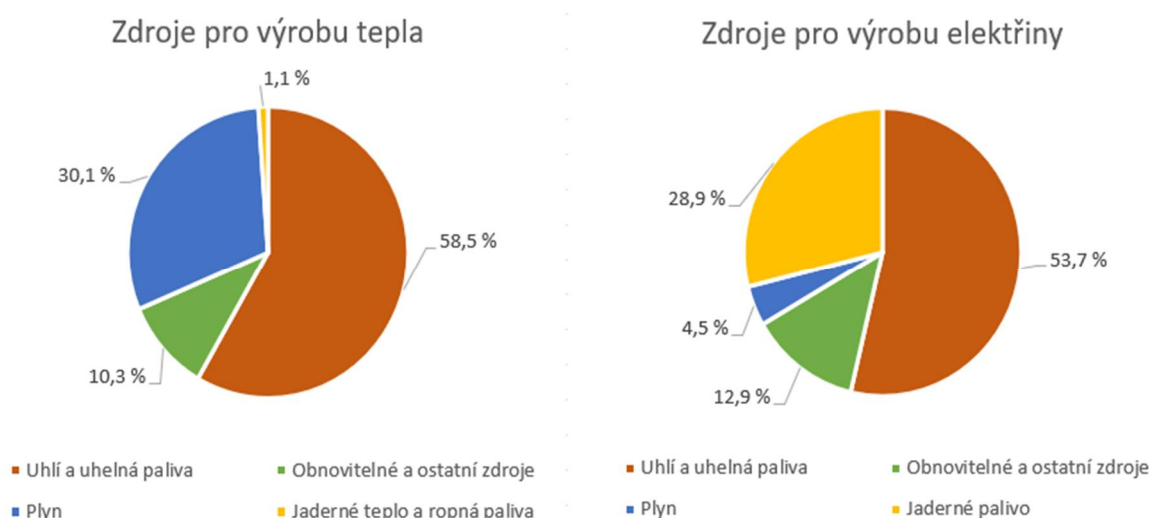
## OBSAH

Úvod .....	15
1 Proces spalování .....	17
1.1 Zemní plyn .....	18
1.2 Oxidy dusíku .....	19
1.3 Přenos tepla .....	20
2 Spalování za zvýšeného přístupu kyslíku .....	23
2.1 Kyslík .....	23
2.2 Metody OEC .....	23
2.3 Výhody OEC .....	31
2.4 Nevýhody OEC .....	33
2.5 Využití OEC v průmyslu .....	34
3 Bezpečnost při OEC .....	37
3.1 Spalovací trojúhelník .....	37
3.2 Konstrukční návrh .....	37
3.3 Nebezpečí požáru .....	38
3.4 Kontrola meze zápalnosti .....	38
3.5 Kontrola zapalování .....	40
3.6 Kompatibilita s kyslíkem .....	41
4 Simulační výpočet .....	43
4.1 Výpočet vlhkosti spalovacího vzduchu .....	43
4.2 Chemické rovnice spalování zemního plynu .....	44
4.3 Bilanční schéma spalovacího procesu .....	45
4.4 Výsledky simulace .....	46
Závěr .....	49
Použité informační zdroje .....	51
Seznam použitých symbolů .....	55
Seznam použitých chemických vzorců .....	57
Seznam obrázků .....	59
Seznam tabulek .....	61



## ÚVOD

Spalování paliv je významným průmyslovým zdrojem energie již více než 200 let. Většina energie je získávána spalováním fosilních paliv, jakými jsou například zemní plyn či uhlí. Pro proces spalování jsou nezbytné tři hlavní složky: palivo, oxidační činidlo a zdroj zapálení. Průmyslové spalování je definováno jako prudká oxidace uhlovodíkového paliva za současného uvolnění velkého množství tepla, které je následně využito, např. pro tepelné zpracování materiálů, ohřev procesních látek atd. [1]. Většina takovýchto průmyslových procesů vyžaduje značné množství energie a toto množství vyžadované energie se neustále zvyšuje. Poměrné zastoupení zdrojů pro výrobu tepla a elektřiny v České republice je znázorněno v grafech na obrázku 1.



Obr. 1 Poměrné zastoupení zdrojů pro výrobu tepla a elektřiny v České republice v roce 2016 [2, 3]

Ve většině spalovacích procesů je jako oxidační činidlo využíván vzduch. V mnoha případech mohou být tyto procesy intenzifikovány využitím vzduchu se zvýšenou koncentrací kyslíku jako oxidačního činidla. Takový proces se nazývá „*oxygen enhanced combustion*“ (OEC), v překladu kyslíkem obohacené spalování. Vzduch se skládá přibližně ze 79 % dusíku a 21 % kyslíku. Kyslíkem obohacené spalování tedy využívá koncentrací kyslíku v oxidačním činidle vyšších než 21 %. Mezi hlavní výhody OEC patří zvýšení efektivity spalovacího procesu, zvýšení dosahovaných teplot plamene, úspora paliva či snížení objemu spalin. V dnešní době je také aktuálním tématem otázka produkce emisí znečišťujících látek, které vznikají při spalování jako nežádoucí produkt. Emisní limity se neustále zpřísňují a hledají se způsoby, jak minimalizovat dopady průmyslové výroby na životní prostředí. Využitím metody OEC lze dosáhnout redukce emisí oxidů dusíku i oxidů uhlíku produkovaných při spalování [4].

Mezi cíle této práce patří popsání problematiky kyslíkem obohaceného spalování, konkrétně jednotlivých metod využívaných při OEC. Dále zhodnocení výhod a nevýhod, které OEC přináší a také popsání jednotlivých průmyslových oblastí ve kterých je OEC využíváno. Vzhledem k tomu, že při manipulaci a využívání kyslíku je nutno dbát na bezpečnost, jsou v samostatné kapitole také popsány zásady bezpečného využívání kyslíku. Na závěr je proveden bilanční simulační výpočet v softwaru ChemCAD. Je sledován vliv vzrůstající koncentrace kyslíku ve spalovacím vzduchu na objem a teplotu spalin, hustotu a viskozitu spalin a koncentraci CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O ve spalinách.



## 1 PROCES SPALOVÁNÍ

Spalování je specifická skupina chemických reakcí, kdy dochází ke sloučení uhlovodíkového paliva se vzduchem, který obecně obsahuje přibližně 79 % dusíku ( $N_2$ ) a 21 % kyslíku ( $O_2$ ), který funguje jako oxidační činidlo. Při procesu spalování spolu tyto složky reagují za vzniku oxidu uhličitého ( $CO_2$ ), vodní páry ( $H_2O$ ) a tepla. Pokud je palivem metan ( $CH_4$ ), hlavní složka zemního plynu, pak reakci reprezentuje rovnice (1.1) [1].



Vzduch je v této rovnici (1.1) pospán jako 2  $O_2$  a 7,52  $N_2$ . Jelikož se vzduch skládá z 21 %  $O_2$  a 79 %  $N_2$  platí, že na každou jednotku  $O_2$  připadá  $0,79/0,21 \doteq 3,76$  jednotek  $N_2$ . Na 2 jednotky kyslíku tedy ve vzduchu připadá 7,52 jednotek dusíku.

Důležitým faktorem při spalování je poměr paliva a oxidačního činidla (tzv. stechiometrický poměr). Existuje více způsobů, jak ho vyjádřit. Stechiometrie reakce určuje kvantitativní poměr kyslíku a paliva pro daný systém. Jedna z metod jejího stanovení je zanedbání inertních prvků a uvažování pouze čistého kyslíku jako oxidačního činidla, jelikož inertní složky oxidačního činidla nejsou pro reakci potřeba. Tato metoda je daná vztahem [1]:

$$S_1 = \frac{\text{Objemový průtok } O_2 \text{ v oxidačním činidle}}{\text{Objemový průtok paliva}} \quad (1.2)$$

Po dosazení z rovnice (1.1) má pak stechiometrie  $S_1$  tvar:

$$S_1 = \frac{2}{1} = 2$$

Tato metoda se častěji využívá pro spalovací systémy, ve kterých dochází k obohacování kyslíkem. To je dáno tím, že složení oxidačního činidla se může lišit, zatímco množství kyslíku přiváděného do spalovacího systému je konstantní [1].

Druhá z metod nebere v potaz pouze kyslík, ale zohledňuje celý průtok oxidačního činidla [1]:

$$S_2 = \frac{\text{Objemový průtok oxidačního činidla}}{\text{Objemový průtok paliva}} \quad (1.3)$$

Po dosazení z rovnice (1.1) má pak stechiometrie  $S_2$  tvar:

$$S_2 = \frac{2 + 7,52}{1} = 9,52$$

Z tohoto výpočtu je patrné, že na stechiometricky přesné spálení 1 jednotky paliva (metanu) je potřeba 9,52 jednotek atmosférického vzduchu. Pro dokonalé spálení je však potřeba dodat více kyslíku, než je teoreticky nutné. Toho se docílí přidáním tzv. přebytku vzduchu, který zajistí spálení celého objemu paliva a minimalizuje množství oxidu uhelnatého ( $CO$ ) a nespálených uhlovodíků ( $C_xH_y$ ) ve spalinách. Příliš velké množství přebytečného vzduchu však snižuje účinnost procesu, jelikož část energie je neefektivně využita na ohřátí přebytečného vzduchu. Součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  je dán vztahem [1]:



$$\lambda = \frac{\text{Skutečné \% } O_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}}{\text{Stechiometrické \% } O_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}} \quad (1.4)$$

## 1.1 ZEMNÍ PLYN

Zemní plyn je bezbarvý, sám o sobě nezapáchající, hořlavý plyn. Je nejedovatý, nedýchatelný a lehčí než vzduch. Jeho hlavní složkou je metan. Dále se v něm vyskytují vyšší uhlovodíky a malé množství inertních plynů (přesné složení je uvedeno v tab. 1). Zemní plyn se řadí do skupiny tzv. velmi výhřevných plynů a je využíván pro široké spektrum potřeb – k vytápění, ohřevu vody, v elektrárnách, v teplárnách nebo třeba v dopravě [5]. Zemní plyn je také považován za ekologický zdroj energie v rámci fosilních paliv. Při spalování zemního plynu nedochází ke vzniku pevných nespálených částic (prach, saze) ani oxidů síry ( $SO_x$ ), vznikají pouze emise oxidů dusíku ( $NO_x$ ) a v zanedbatelné míře emise oxidu uhelnatého (CO). Díky vysokému obsahu metanu má zemní plyn ve spalinách nízké množství oxidu uhličitého ( $CO_2$ ), které je až o 50 % menší ve srovnání s hnědým uhlím [6, 7].

Tab. 1 Složení vybraných zemních plynů používaných v EU [8]

Složky zemního plynu	Podíl složky v daném typu zemního plynu v obj. %				
	Tranzitní ZP	Norský ZP	Alžírský ZP	Jihomoravský ZP	Holandský ZP
<b>Methan (<math>CH_4</math>)</b>	98,39	85,80	86,90	97,70	81,31
<b>Ethan (<math>C_2H_6</math>)</b>	0,44	8,49	9,0	1,20	2,85
<b>Propan (<math>C_3H_8</math>)</b>	0,16	2,30	2,60	0,50	0,37
<b>Butan (<math>C_4H_{10}</math>)</b>	0,07	0,70	1,20	-	0,14
<b>Pentan (<math>C_5H_{12}</math>)</b>	0,03	0,25	-	-	0,09
<b>Dusík (<math>N_2</math>)</b>	0,84	0,96	0,30	0,60	14,35
<b>Oxid Uhličitý (<math>CO_2</math>)</b>	0,07	1,50	-	-	0,89

Výhřevnost je vlastnost paliva, která udává, kolik energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky (obvykle 1 kg). Proti spalnému teplu není v hodnotě zahrnuto měrné skupenské teplo páry, obsažené ve spalinách. Předpokládá se, že její teplo je nevyužitelné a uniká v plynném stavu se spalinami. Hodnota výhřevnosti pro zemní plyn je  $33,48 \text{ MJ/m}_N^3$  [9].

Spalné teplo je takové množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva. Předpokládá se, že voda uvolněná spalováním zkondenzuje a energii chemické reakce není třeba redukovat o její skupenské teplo. Tím se spalné teplo liší od výhřevnosti, kde se předpokládá na konci reakce voda v plynném skupenství. Proto je hodnota spalného tepla vždy větší, nebo rovna hodnotě výhřevnosti. Rovnost nastává, když spalováním nevzniká voda [10]. Hodnota spalného tepla je pro zemní plyn je  $37,8 \text{ MJ/m}_N^3$  [5].

## 1.2 OXIDY DUSÍKU

Hlavními produkty při spalování fosilních paliv jsou oxid uhličitý a vodní pára. Vedle nich však vzniká i řada vedlejších a nežádoucích produktů, souhrnně nazývaných emise. Emise zahrnují oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ , oxidy síry  $\text{SO}_x$ , pevné částice, popílek aj. Tyto vedlejší produkty mohou pocházet z prvků nebo sloučenin obsažených, buď přímo v palivu, anebo v okysličovadle, kterým bývá nejčastěji atmosférický vzduch.

Dusík může tvořit osm různých oxidů, pro životní prostředí však představují velké nebezpečí zejména oxid dusnatý  $\text{NO}$  a oxid dusičitý  $\text{NO}_2$ , které se souhrnně označují jako  $\text{NO}_x$ . Při spalování vzniká především oxid dusnatý  $\text{NO}$  (cca 95 %), jeho další oxidací pak vzniká mnohem jedovatější oxid dusičitý  $\text{NO}_2$  [11].

Oxid dusnatý  $\text{NO}$  je bezbarvý plyn, který má silnou tendenci reagovat s kyslíkem v atmosféře a vytváří tak  $\text{NO}_2$ .  $\text{NO}$  je jedovatý a může způsobovat podráždění očí a hrdla, bolesti hlavy či nevolnost. Déle trvající vystavení  $\text{NO}$  může způsobovat prudký kašel, dýchací obtíže a může být smrtelné. Pro lidské tělo je však  $\text{NO}$  nepostradatelný, jelikož funguje jako přenašeč nervových vzruchů v nervovém systému [1].

Oxid dusičitý  $\text{NO}_2$  je červenohnědý, vysoce toxický plyn. Jeho vdechnutí způsobuje záněty plic a otoky plic, které mohou být až smrtelné.  $\text{NO}_2$  je také silně reaktivní a používá se jako oxidační činidlo pro raketové pohony.  $\text{NO}_2$  v atmosféře se podílí na vzniku kyselých dešťů, také přispívá k tvorbě přízemního ozonu a vzniku takzvaného fotochemického smogu [12, 1].

### 1.2.1 TERMICKÉ NO

Vysokoteplotní (termické) oxidy dusíku se tvoří při spalovacích procesech za vysokých teplot (nad 1100 °C) v oblastech plamene se sníženou koncentrací paliva oxidací dusíku, který je obsažen ve spalovacím vzduchu [13]. Způsob vzniku termických  $\text{NO}$  je popsán Zeldovichovým dvoukrokovým mechanismem [14]:



Množství vzniklých  $\text{NO}$  exponenciálně roste s teplotou. Při spalování s předehřátým vzduchem nebo při využití některé z metod obohacování spalovacího vzduchu kyslíkem (OEC) vzniká tímto způsobem většina  $\text{NO}$ , jelikož se následkem těchto metod zvyšuje teplota plamene [1]. Soustavu dvou výše uvedených rovnic lze rozšířit o rovnici třetí (1.7), která zohledňuje výskyt vyšší koncentrace hydroxylových radikálů  $\text{OH}$  ve směsích bohatých na palivo. Jedná se pak o rozšířený Zeldovichův mechanismus [14]:



### 1.2.2 PROMPTNÍ NO

Promptní oxidy dusíku vznikají při rychlé reakci molekulárního dusíku s uhlovodíkovými radikály za přítomnosti atomárního kyslíku v oblastech plamene bohatých na palivo [1]. Tento způsob vzniku  $\text{NO}$  jako první popsal Fenimore [15]. Hlavní reakce popisující proces tvorby promptních  $\text{NO}$  jsou následující [13]:



Reakce (1.8) je považována za hlavní reakci, jelikož zhruba 90 % vytvořených promptních oxidů dusíku vzniká jako výsledek této reakce [13]. Vznik promptních NO je významný zejména při nižších spalovacích teplotách a v oblastech plamene bohatých na palivo. Tyto podmínky se však v technické praxi příliš nevyskytují, a proto je mnohem více významný mechanismus vzniku termických NO [1]. Podíl promptních NO na celkovém objemu vzniklých NO je tedy velmi malý, proto se také tvorba promptních NO často zanedbává ve spalovacích modelech [13].

### 1.2.3 PALIVOVÉ NO

Palivové oxidy dusíku vznikají z dusíku chemicky vázaného v palivu především při spalování tuhých a kapalných paliv. Nevznikají při spalování kvalitních plynných paliv, jelikož ty obvykle neobsahují chemicky vázaný dusík. Zato pevná paliva jako například uhlí, palivové oleje či koks obsahují významné množství vázaného dusíku. Při spalování těchto paliv převládá vznik palivových NO nad ostatními mechanismy, jelikož je v nich dusík vázán jednoduchými vazbami N-H a N-C. Tyto vazby jsou totiž slabší než trojné vazby atomů v molekule dusíku, které musí být přerušeny při vzniku termického NO [1, 13].

Palivové NO ve skutečnosti vznikají postupnými reakcemi, při nichž se tvoří meziprodukty HCN a NH<sub>3</sub>. Ty jsou dále oxidovány na NO, který může být následně redukován na N<sub>2</sub> [13]. Souhrnné reakce vzniku palivových NO popsal de Soete [16]:



## 1.3 PŘENOS TEPLA

K přenosu tepla musí existovat rozdíl teplot nebo teplotní gradient. Tento rozdíl teplot vzniká při spalování mezi teplotou spalin a teplotou stěn spalovací komory. Proces přenosu tepla se skládá ze tří mechanismů: vedení tepla (kondukce), proudění (konvekce), záření (radiace).

### 1.3.1 RADIACE

Radiace může být chápána jako vyzáření energie ve formě elektromagnetických vln nebo ve formě protonových částic. Atom či molekula získá přebytečnou energii a dojde k jejich přechodu na vyšší energetickou hladinu (excitaci), částice se stává nestabilní. Tato částice se snaží vrátit do svého stabilního stavu tím, že vyzáří foton. Tento foton volně putuje od původní částice, dokud nenarazí na novou částici, která ho absorbuje, dostane se do excitovaného stavu a znova se opakuje celý cyklus [4].

Radiace je nejvýznamnější mechanismus přenosu tepla při spalování. Na rozdíl od konvekce či kondukce nepotřebuje žádnou zprostředkující látku a může tak probíhat i ve vakuu. Tepelný tok při radiaci popisuje Stefan-Boltzmannův zákon (rovnice (1.13)) a je závislý na čtvrté

mocnině teploty povrchu tělesa. S rostoucí teplotou tedy radiace více převažuje nad kondukcí a konvekcí [10].

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (1.13)$$

kde:

$\dot{Q}$	je tepelný tok [W],
$\sigma$	je Stefan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> ]),
$\varepsilon$	je emisivita (poměrná zářivost) [-],
$S$	je plocha povrchu [m <sup>2</sup> ],
$T$	je teplota povrchu [K].

Poměrná zářivost nabývá hodnoty vždy mezi nulou a jedničkou a představuje poměr energie emitované z daného povrchu a energie emitované z tohoto povrchu, kdyby byl černý, při stejné teplotě obou povrchů.

### 1.3.2 KONDUKCE

Kondukcí je přenos tepla mezi sousedními molekulami nebo mezi částicemi v pohybu. Může se jednat o různé druhy pohybů, od vibrací atomů v krystalových mřížkách pevných látek až po neuspořádaný pohyb molekul v plynech. Podle Fourierova zákona je hustota tepelného toku pro přenos tepla vedením popsána rovnicí (1.14) [4]. Hustota tepelného toku přenášeného vedením v látce je přímo úměrná velikosti teplotního gradientu, ale má opačný směr [10].

$$\dot{q} = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1.14)$$

kde:

$\dot{q}$	je hustota tepelného toku [W·m <sup>-2</sup> ],
$k$	je tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ],
$dT$	je rozdíl teplot mezi dvěma místy [K],
$dx$	je vzdálenost mezi dvěma místy [m],
$T$	je teplota povrchu [K].

### 1.3.3 KONVEKCE

Při přenosu tepla konvekcí je tepelný tok nejčastěji přenášen mezi povrchem nějakého tělesa a okolní tekutinou. Přenos tepla konvekcí je složen ze dvou mechanismů. Prvním mechanismem je náhodný pohyb molekul (difúze), druhým mechanismem je objemový, makroskopický pohyb tekutiny. Mechanismus difúzní je dominantní v blízkosti povrchu tělesa, kde je rychlost tekutiny nízká a přímo na povrchu rychlost klesá na nulu a teplo je přenášeno pouze vedením. Druhý mechanismus se uplatní tak, že tekutina je strhávána z okolního proudu směrem k povrchu tělesa, kde vytváří tzv. mezní vrstvu, v níž odebírá nebo přidává teplo. Konvekce se rozděluje na nucenou a přirozenou (volnou). Přirozená konvekce je vyvolána rozdílnými hustotami molekul v tekutině a gravitační silou, kdy těžší molekuly klesají ve směru gravitačního zrychlení a lehčí molekuly stoupají opačným směrem. Nucená konvekce je vyvolána účinkem vnější síly, např. čerpadlem nebo kompresorem [10]. Přenos tepla při konvekcí je určen následující zjednodušenou Newtonovou rovnicí [4]:

$$\dot{Q} = A_s \cdot \alpha_t \cdot (T - T_w) \quad (1.15)$$

kde:

$\dot{Q}$	je tepelný tok [W],
$A_s$	je plocha přestupu tepla [m <sup>2</sup> ],
$\alpha_t$	je součinitel přestupu tepla [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ],
$T$	je teplota tekutiny [K],
$T_w$	je teplota povrchu tělesa [K].

## 2 SPALOVÁNÍ ZA ZVÝŠENÉHO PŘÍSTUPU KYSLÍKU

### 2.1 KYSLÍK

Za standardních podmínek ( $t = 0\text{ °C}$ ,  $p = 101,325\text{ kPa}$ ) je kyslík bezbarvý plyn bez chuti a bez zápachu. Nejběžněji se kyslík vyskytuje jako dvouatomová molekula označovaná jako  $O_2$  s molekulovou hmotností  $32\text{ g/mol}$ . Kyslík v plynném skupenství je mírně těžší než vzduch. Při ochlazení pod  $-183\text{ °C}$  kyslík přechází do kapalného skupenství [17]. Kapalný kyslík má světle modrou barvu, je průhledný, bez zápachu a mírně těžší než voda. Čistý kyslík je velice reaktivní a působí jako silné oxidační činidlo. To znamená, že sám o sobě je nehořlavý, ale může výrazně zvýšit rychlost spalování. Ačkoliv je kyslík nezbytně nutný pro existenci života na Zemi, dýchání čistého  $O_2$  může způsobovat kašláni, bolesti na hrudi až trvalé poškození plic. Je to nejvíce zastoupený prvek na Zemi a čtvrtý nejvíce rozšířený v celém vesmíru po vodíku, heliu a neonu [4].

Kyslík se využívá v široké řadě průmyslových odvětví. V kovo zpracujícím průmyslu se využívá při sváření, řezání, ohřevu, tavení a při výrobě různých druhů kovů. V chemickém průmyslu se využívá jak na ohřev, tak na chemickou syntézu. V ekologii se využívá při čištění odpadních vod a při spalování odpadu. Dále se také kyslík využívá ve sklářském průmyslu při výrobě skla, v cihlářském průmyslu při výrobě cihel, v keramickém průmyslu při výrobě keramiky a také při zpracování vápence [4].

Velké množství průmyslových procesů může být zefektivněno částečným či úplným nahrazením vzduchu vysoce čistým kyslíkem. Typickým příkladem je ohřev a tavení kovů, tavení skla či kalcinace. Obecně procesy mající následující vlastnosti jsou vhodné pro využití technologie OEC [4]:

- vysoká teplota spalin, obvykle překračující  $1400\text{ K}$ ,
- nízká tepelná účinnost, obvykle kvůli omezení přenosu tepla,
- omezená propustnost, kdy může být výhodné zvýšení přenosu tepla,
- znečištěné spaliny, vysoké emise  $NO_x$  nebo omezení objemu spalin.

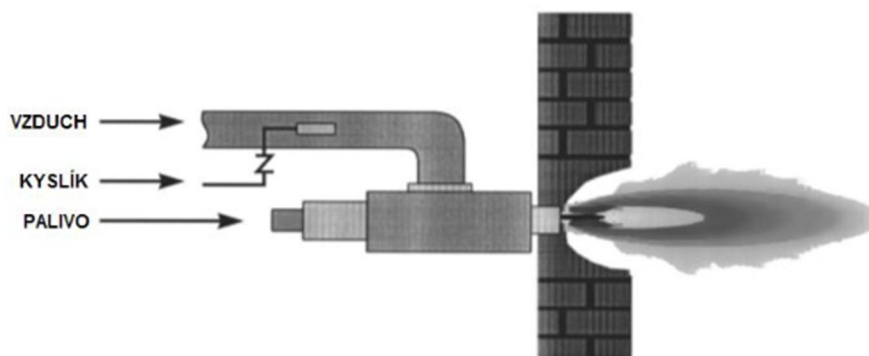
### 2.2 METODY OEC

Přidání kyslíku do spalovacího procesu se provádí následujícími způsoby [4]:

- 1) přidání  $O_2$  do vstupního proudu vzduchu (tzv. „*air enrichment*“),
- 2) vstříkávání  $O_2$  do plamene (tzv. „*O<sub>2</sub> lancing*“),
- 3) nahrazení spalovacího vzduchu vysoce čistým kyslíkem (tzv. „*oxy/fuel combustion*“),
- 4) oddělené přivádění spalovacího vzduchu a kyslíku do hořáku (tzv. „*air-oxy/fuel combustion*“).

#### 2.2.1 OBOHACOVÁNÍ SPALOVACÍHO VZDUCHU KYSLÍKEM

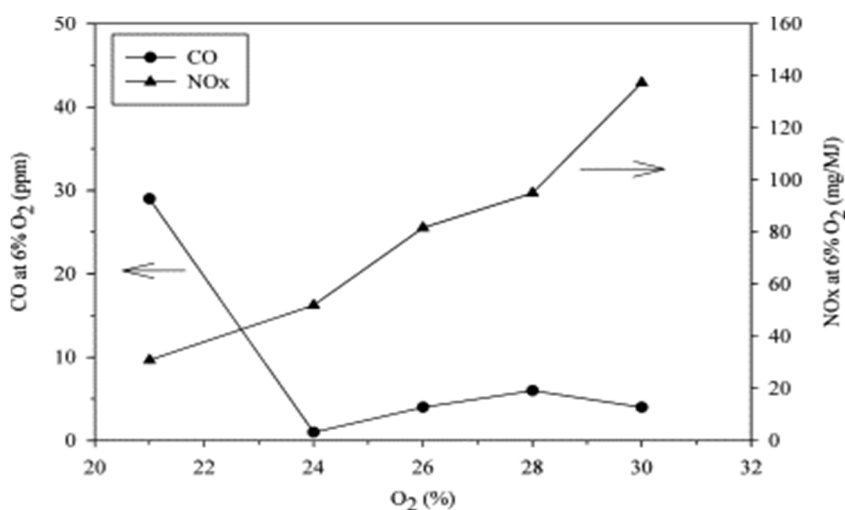
Tento způsob obohacování je považován za nízko úrovněvé obohacování kyslíkem, nebo také před smíšené obohacování. Při této variantě obohacování je kyslík vstříkáván do vstupního proudu spalovacího vzduchu, obvykle přes difuzor, pro zajištění dostatečného promíchání směsi (obr. 2) [4].



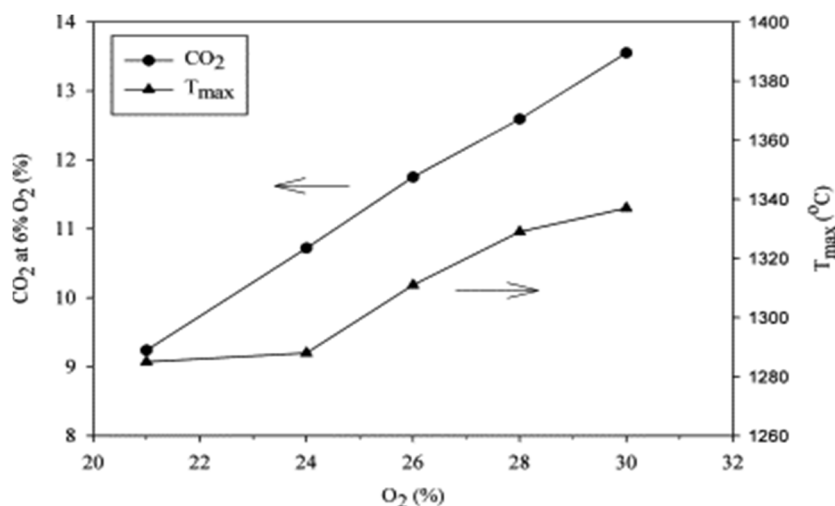
Obr. 2 Schéma hořáku s obohacováním spalovacího vzduchu kyslíkem [4]

Na tuto metodu může být přizpůsobeno velké množství běžných hořáků, které jsou původně konstruovány pro spalování paliva s atmosférickým vzduchem. Takovéto přizpůsobení hořáků je finančně nenákladné a přináší značné výhody. Obvykle je to zkrácení délky plamene a zvýšení jeho intenzity. Avšak při přidání příliš velkého množství kyslíku do spalovacího vzduchu, který je přiveden do konvenčního hořáku se může délka plamene až nepříjemně zkrátit. Vyšší teplota plamene pak může také poškodit samotný hořák nebo vyzdívkou hořáku. Z bezpečnostních důvodů je někdy nezbytné upravit přívodní potrubní systém pro zvládnutí vyšších koncentrací kyslíku [4].

Wu a kol. [18] se experimentálně zabývali spalováním zemního plynu s obohacováním spalovacího vzduchu kyslíkem v rozmezí 21-30 %. Bylo zjištěno, že čas potřebný pro dosažení teploty 1200 °C ve spalovací komoře za stálého hmotnostního průtoku paliva při 30 % O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu byl pouze 46,4 % z času potřebného pro dosažení dané teploty při použití atmosférického vzduchu bez obohacení O<sub>2</sub>. Jinými slovy bylo ušetřeno 53,6 % paliva. To je způsobeno tím, že s rostoucí koncentrací kyslíku ve spalovacím vzduchu klesá koncentrace dusíku a zmenšují se ztráty energie spaliny. Rychlost ohřevu však byla srovnatelná pro všechny koncentrace O<sub>2</sub> při teplotách nižších než 700 °C, což znamená, že výhoda obohacení kyslíkem je významná zejména při vyšších spalovacích teplotách. Zatímco hodnoty CO emisí vztažených k referenční hodnotě 6 % O<sub>2</sub> byly nízké pro všechny koncentrace kyslíku, množství NO<sub>x</sub> emisí prudce rostlo se zvyšující se koncentrací O<sub>2</sub> (obr. 3). Hodnoty emisí CO<sub>2</sub> se zvyšovaly téměř lineárně s rostoucí koncentrací O<sub>2</sub> (obr. 4). Protože koncentrace N<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu klesala s rostoucí koncentrací O<sub>2</sub>, klesala také koncentrace N<sub>2</sub> ve spalinách, což způsobilo zvýšení koncentrace CO<sub>2</sub> ve spalinách. Tento jev může zvýšit efektivitu zachytávání CO<sub>2</sub> a snížit náklady. Maximální naměřená teplota ve spalovací komoře také rostla společně s koncentrací O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu (obr. 4). Dále bylo zjištěno, že s vyšší koncentrací O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu rostl přenos tepla radiací díky zvýšeným koncentracím CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O, což jsou sloučeniny, které dobře emitují záření. Zvyšující se koncentrace O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu také vedla k nerovnoměrnému šíření tepla zejména v oblastech blízko kolem hořáku.



Obr. 3 Množství emisí NO<sub>x</sub> a CO v závislosti na podílu O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu [18]



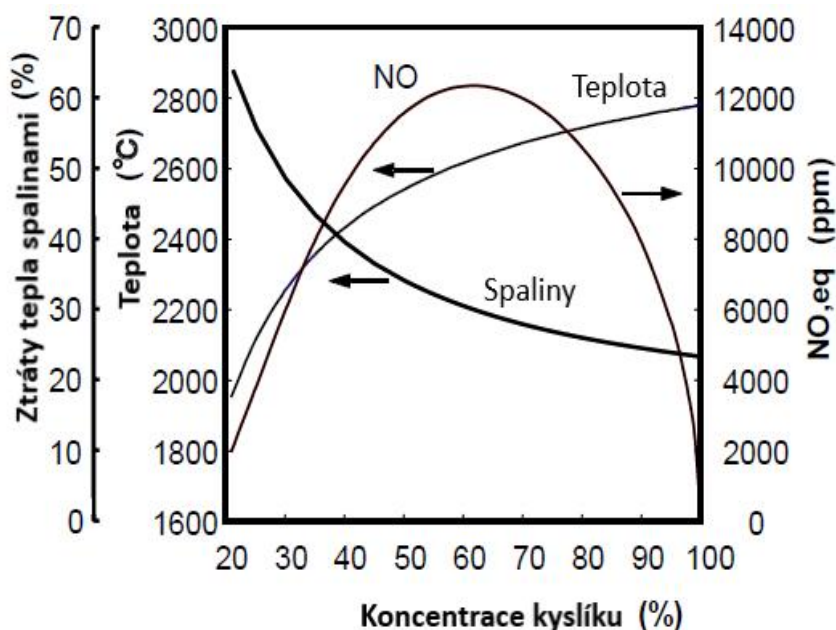
Obr. 4 Množství emisí CO<sub>2</sub> a maximální teplota v závislosti na podílu O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu [18]

Merlo a kol. [19] zkoumali spalovací charakteristiky při kyslíkem obohaceném spalování metanu s turbulentními vířivými plameny. Obohacení kyslíkem bylo v rozmezí od 21 do 30 %. Bylo zjištěno, že se zvyšující koncentrací kyslíku se zvyšuje stabilita plamene a rozšiřují meze hořlavosti. Emise CO s rostoucí koncentrací kyslíku prudce klesají a obohacování kyslíkem zvyšuje míru konverze CO na CO<sub>2</sub>. Emise CO<sub>2</sub> rostou kvazilineárně s rostoucí koncentrací O<sub>2</sub>. Emise NO<sub>x</sub> také rostou zároveň s mírou obohacení kyslíkem. Při růstu koncentrace kyslíku v oxidačním činidle z 21 % na 30 % vzrostou emise NO<sub>x</sub> z 10 na 170 ppm. Snížení tvorby NO<sub>x</sub> lze však dosáhnout zvýšením stupně víření.

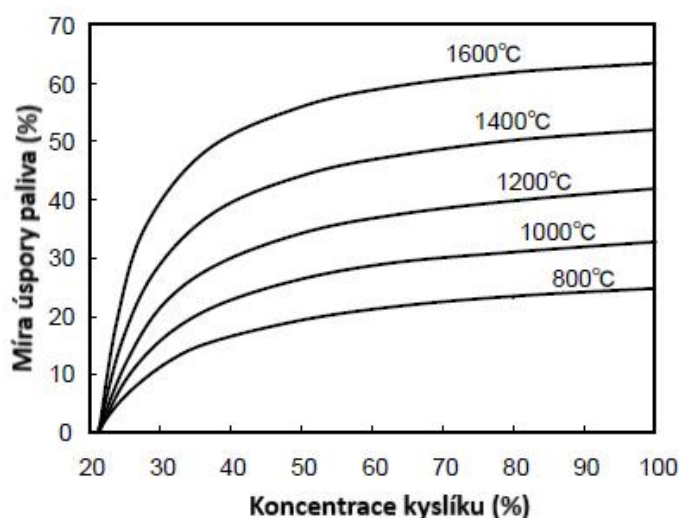
Hagihara a kol. [20] se zabývali vývojem kyslíkem obohacovaného spalovacího systému využívajícího oscilační spalovací metodu pro dosažení extrémně nízkých NO<sub>x</sub> emisí při spalování. Na obr. 5 je vztah mezi teplotou plamene, NO<sub>x</sub> emisemi, ztrátami tepla ze spalin a koncentrací kyslíku v oxidačním činidle při spalovací reakci s metanem. Při spalování s čistým kyslíkem oxidační činidlo neobsahuje žádný dusík, díky čemuž je možné dosáhnout vyšší teploty plamene. Na obr. 6 je závislost míry úspory paliva na koncentraci kyslíku



v oxidačním činidle za různých teplot spalin. Míra úspory paliva se významně zvětšuje se zvyšující se teplotou spalin v rozmezí od 21 do 40 % koncentrace kyslíku. Tudíž v rozmezí od 30 do 40 % koncentrace kyslíku je míra úspory paliva relativně opodstatněná bez přílišného zvýšení nákladů za kyslík a technologie OEC tudíž využitelná a přínosná pro redukci CO<sub>2</sub>. Ačkoliv, jak je patrné z obr. 5, v tomto rozmezí výrazně vzrůstá produkce NO<sub>x</sub> emisí. Vzhledem k této situaci byl vyvinut nový spalovací systém „Innova-Jet“, který je přínosný pro významné snížení NO<sub>x</sub> emisí při kyslíkem obohaceném spalování.



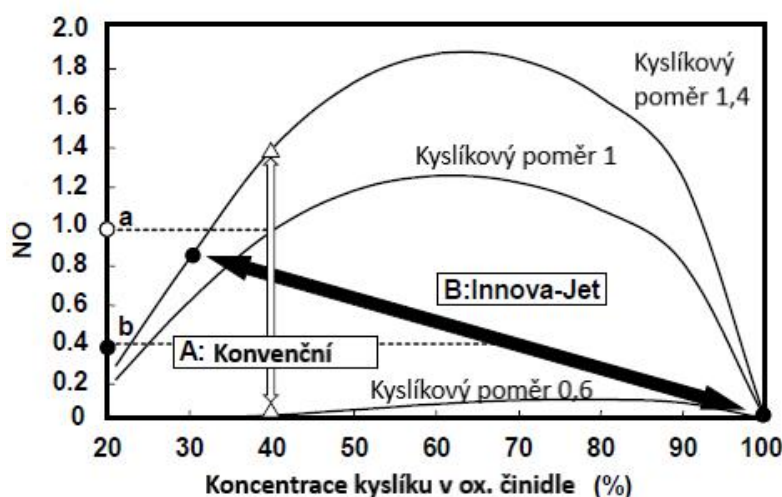
Obr. 5 Závislost ztrát tepla spalinami, teploty plamene, NO<sub>x</sub> emisí na koncentraci kyslíku v oxidačním činidle [20]



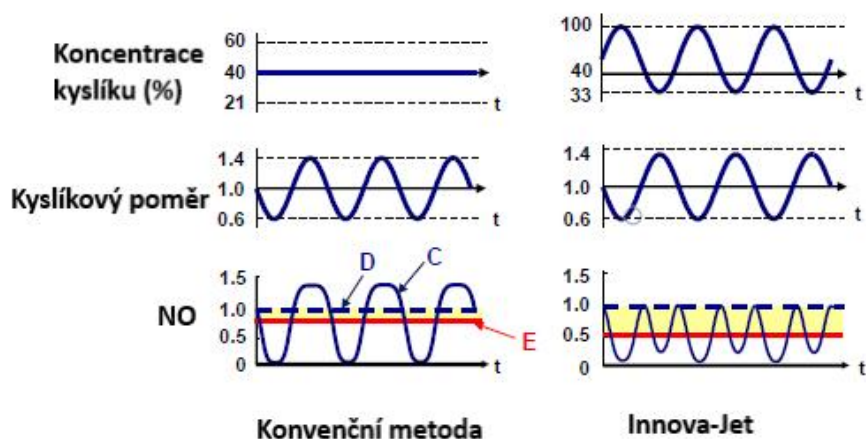
Obr. 6 Závislost míry úspory paliva na koncentraci kyslíku v oxidačním činidle a teplotě spalin [20]

Princip „Innova-Jet“ je zobrazen na obr. 7 na grafu závislosti rovnovážné koncentrace NO (NO emise za oscilačního spalování vs. NO emise za neoscilačního spalování) na koncentraci

kyslíku při různých kyslíkových poměrech. Kyslíkový poměr vyjadřuje podíl dodávaného kyslíku a množství kyslíku potřebného pro stechiometrické úplné spálení. Konvenční periodické spalovací metody mění průtok paliva či oxidačního činidla a kyslíkový poměr je periodicky měněn, což ukazuje na obr. 7 šipka A. Při tomto způsobu je koncentrace kyslíku neměnná a redukce  $\text{NO}_x$  je průměrná, její hodnotu ukazuje na obr. 7 přerušovaná čára a. V „Innova-Jet“ systému se mění koncentrace kyslíku i kyslíkový poměr, jak ukazuje na obr. 7 šipka B. Periodicky se střídají stavy s vysokou koncentrací kyslíku a nízkým kyslíkovým poměrem a stav s nízkou koncentrací kyslíku a vysokým kyslíkovým poměrem. Emise jsou ještě více redukovány na úroveň vyznačenou přerušovanou čarou b na obr. 7. Schéma fluktuace koncentrace kyslíku, kyslíkového poměru a koncentrace  $\text{NO}$  jsou na obr. 8. Koncentrace kyslíku je periodicky měněna v rozmezí od 33 do 100 % (průměrně 40 %), kyslíkový poměr je periodicky měněn od 0,6 do 1,4 (průměrně 1,0). Přerušovaná čára D na obr. 8 vyznačuje koncentraci  $\text{NO}$  při kyslíkovém poměru 1,0 a koncentraci kyslíku 40 %. Červená čára vyznačuje průměrnou koncentraci  $\text{NO}$  při periodickém spalování.

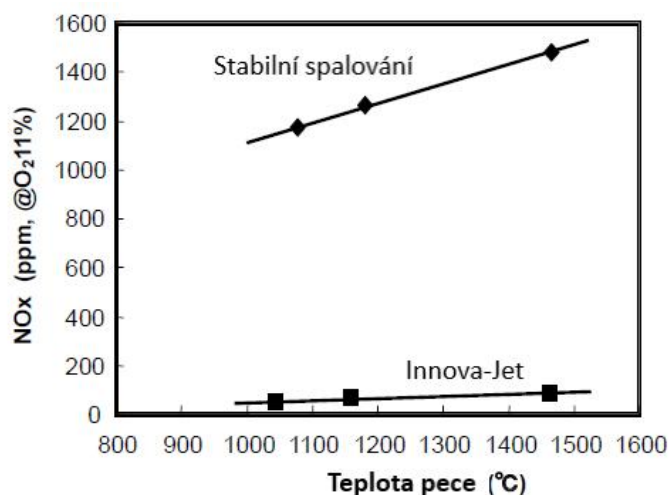


Obr. 7 Princip „Innova-Jet“ (závislost rovnovážné koncentrace  $\text{NO}$  na koncentraci kyslíku) [20]



Obr. 8 Porovnání konvenční metody a „Innova-Jet“ (závislost koncentrace  $\text{O}_2$ , kyslíkového poměru a koncentrace  $\text{NO}$  na čase) [20]

Metoda byla následně otestována při experimentálním spalovacím testu. Emisní  $\text{NO}_x$  charakteristiky stabilního spalování a „Innova-Jet“ metody jsou na obr. 9. Při teplotě spalovací komory  $1450\text{ }^\circ\text{C}$  je koncentrace  $\text{NO}_x$  při stabilním spalování  $1480\text{ ppm}$ , zatímco „Innova-Jet“ metoda dramaticky snižuje koncentraci  $\text{NO}_x$  na  $79\text{ ppm}$ . Koncentrace CO je  $50\text{ ppm}$  nebo méně při obou metodách. Bylo také dosaženo rovnoměrnější distribuce tepla. Rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou teplotou ve spodní části spalovací komory byl při stabilním spalování  $32\text{ }^\circ\text{C}$ , zatímco při využití metody Innova-Jet byl rozdíl pouze  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Z hlediska celkového množství přeneseného tepla, při stabilním spalování byl naměřen tepelný výkon  $53,1\text{ kW}$ , kdežto při použití metody Innova-Jet byl tepelný výkon  $60\text{ kW}$ , což je  $13\%$  zvýšení. Obzvláště v rozmezí vzdáleností od  $0$  do  $1000\text{ mm}$  od hořáku bylo zvýšení přenosu tepla nejvýraznější.



Obr. 9 Emise  $\text{NO}_x$  v závislosti na teplotě pece při stabilním spalování a při Innova-Jet metodě [20]

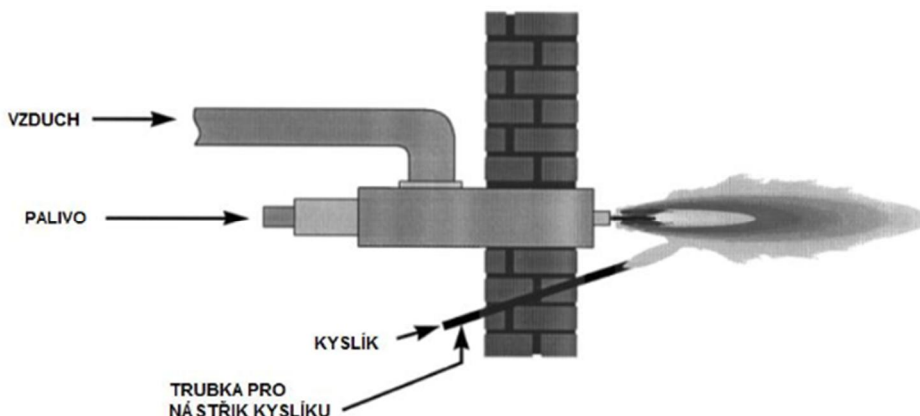
### 2.2.2 VSTŘIKOVÁNÍ KYSLÍKU DO PLAMENE

Tak jako předešlá metoda i tato metoda je využívána pro nízkoúrovňové obohacování. Vstřikování kyslíku do plamene však může mít oproti obohacování vzduchu několik výhod. Tvorba  $\text{NO}_x$  emisí je obvykle nižší v porovnání s první metodou, jelikož se jedná o formu stupňovitého spalování, což je metoda využívaná pro redukcí emisí  $\text{NO}_x$ . Oproti metodě obohacování vzduchu se také při vstřikování kyslíku teplo z plamene šíří rovnoměrněji. Délka plamene může být prodloužena díky stupňovitému spalování v závislosti na místě vstřiku kyslíku. Nevýhodou je však cena za vytvoření dalšího otvoru do spalovací komory pro trubku přivádějící  $\text{O}_2$  [4].

Za určitých podmínek vstřikování kyslíku mezi plamen hořáku a ohřivaný materiál může „přitáhnout“ plamen směrem k ohřivanému materiálu, což zlepšuje efektivitu přenosu tepla a zmenšuje pravděpodobnost přehřívání hořáku. Další variantou zahrnující stupňovité spalování je vstřikování kyslíku do některého jiného místa spalovací komory. Tato varianta je známá jako „oxygen enriched air staging“ (OEAS) [4].

Jedním specifickým provedením vstřikování  $\text{O}_2$  je tzv. spodní obohacování, kdy je kyslík vstřikován do plamene zespoda (obr. 10). Zatímco obohacení spalovacího vzduchu kyslíkem zvyšuje teplotu plamene rovnoměrně, metoda spodního obohacování selektivně obohacuje spodní část plamene a soustředí tak přidané teplo směrem dolů k ohřivanému materiálu. Promíchání  $\text{O}_2$  a spalovacího vzduchu při této metodě není tak dokonalé jako při obohacování

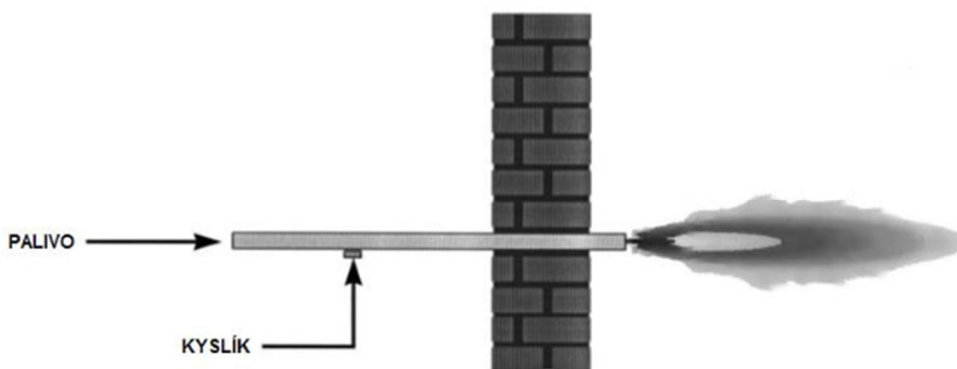
přímo spalovacího vzduchu, to je však vyváženo efektivnějším umístěním přidaného tepla [4]. Další výhodou je, že žáruvzdorný strop pece je vystaven menším teplotám než při obohacování přímo spalovacího vzduchu, což zvyšuje jeho životnost [4].



Obr. 10 Schéma hořáku se vstřikováním kyslíku do plamene [4]

### 2.2.3 NAHRAZENÍ SPALOVACÍHO VZDUCHU KYSLÍKEM

U této metody jsou téměř vždy palivo a kyslík dopravovány do hořáků odděleně, k jejich smísení dochází až těsně před výstupem z hořáku (obr. 11). Toto je často nazýváno jako hořáky s mísením v trysce hořáku, které vytváří difuzní plamen. K dřívějšímu smísení obou složek nedochází z bezpečnostních důvodů, jelikož čistý  $O_2$  je extrémně reaktivní a při dřívějším smísení by mohlo dojít k explozi. Při této metodě se využívá vysoce čistý kyslík (>90 % v celkovém objemu). Existuje několik způsobů výroby kyslíku, jehož čistota pak závisí právě na metodě, kterou byl vyroben [4].



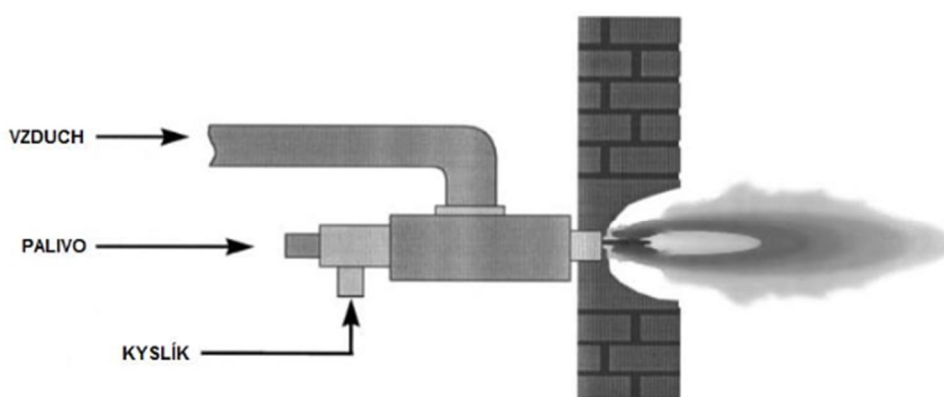
Obr. 11 Schéma hořáku s nahrazením spalovacího vzduchu kyslíkem [4]

Speciální variantou spalování s kyslíkem je tzv. „zředěné kyslíkové spalování“, kdy jsou kyslík a palivo odděleně vstříkávány do spalovací komory. Pro zajištění vznícení paliva musí být teplota spalovací komory vyšší než teplota samovznícení paliva. V závislosti na konkrétní geometrii může být dosaženo až téměř neviditelného plamene. Toto se nazývá bezplamenná oxidace a vede k redukci tvorby  $NO_x$  emisí, lepšímu rozptylu uvolněného tepla a zamezení

tvorby míst s teplotními špičkami (tzv. „hot spots“) [21]. Potenciální nevýhodou této varianty, kromě otázky bezpečnosti, je snížení přenosu tepla v závislosti na snížené teplotě a emisivitě plamene [4].

#### 2.2.4 ODDĚLENÝ PŘÍVOD KYSLÍKU A SPALOVACÍHO VZDUCHU DO HOŘÁKU

Čtvrtá metoda je založena na odděleném vstřikování vzduchu a kyslíku do hořáku (obr. 12). Jde o kombinaci předchozích tří metod. Obvykle se při ní využívá vyšších koncentrací kyslíku než u prvních dvou metod, což přináší větší výhody. Navíc provozní náklady jsou výrazně sníženy oproti metodě nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem, při které se využívá velké množství kyslíku. Tvar plamene a množství uvolněného tepla mohou být regulovány změnou množství kyslíku přiváděného do hořáku [4].



Obr. 12 Schéma hořáku s odděleným přívodem kyslíku a spalovacího vzduchu [4]

Pro tuto metodu lze využít klasické hořáky, které jsou navrženy pro spalování dvou druhů paliv, obvykle kapalného (např. olej) a plyného (např. zemní plyn). Zařízení pro vstřikování kapalného paliva do hořáku (tzv. atomizér), které se nachází ve středu duálního hořáku, může být jednoduše vyjmuto a nahrazeno buď tryskou pro vstřikování  $O_2$ , nebo hořákem pro spalování s kyslíkem. Při této metodě je možné měnit složení oxidačního činidla. Namísto definování celkové koncentrace  $O_2$  v oxidačním činidle může být dáno množství kyslíku ve vzduchu a množství  $O_2$  přivedeného zvlášť. Pro výpočet celkového množství kyslíku v oxidačním činidle pak lze využít následující vztah [4]:

$$\Omega = \frac{20,9}{0,209(\text{objem. \% } O_2) + (\text{objem. \% vzduchu})} \quad (2.1)$$

Sledováním spalovacích charakteristik a porovnáním metod odděleného přivádění spalovacího vzduchu a kyslíku a obohacení spalovacího vzduchu se zabýval Bělohradský a jeho tým [22]. Koncentrace kyslíku se pohybovala v rozmezí od 21 do 46 %. Bylo zjištěno, že s rostoucí koncentrací kyslíku roste tvorba  $NO_x$ , zejména díky dosahování vyšších teplot při spalování, které mají vliv na formaci termických  $NO_x$ . Při metodě obohacení spalovacího vzduchu kyslík s rostoucí koncentrací kyslíku od 21 % do 33 % vzrostla tvorba  $NO_x$  z  $170 \text{ mg/Nm}^3$  na  $7100 \text{ mg/Nm}^3$ . Při použití metody odděleného přívodu kyslíku a vzduchu a dvou stupňového spalování však bylo dosaženo velmi nízkých hodnot  $NO_x$ , maximum bylo  $110 \text{ mg/Nm}^3$  při koncentraci kyslíku 33 %. Bylo zjištěno také zvýšení přenosu tepla zářením se zvyšující se koncentrací kyslíku. Vyprodukované teplo při 33 %  $O_2$  bylo přibližně o 20 % vyšší

než při 21 % O<sub>2</sub>. Zároveň se také efektivita spalovacího procesu zvýšila z 61 % na téměř 80 %. Při obohacení kyslíkem bylo dosaženo zářivějšího, stabilnějšího a delšího plamene.

## 2.3 VÝHODY OEC

Vzduch je složen přibližně ze 79 % N<sub>2</sub> a 21 % O<sub>2</sub>, avšak pouze kyslík je potřebný pro spalovací reakci. Snížením objemového množství dusíku vstupujícího do spalovací reakce může být dosaženo mnoha výhod [4].

### 2.3.1 ZVÝŠENÁ PRODUKTIVITA

U většiny tepelných procesů je radiace dominantní způsob přenosu tepla. Radiace je přímo závislá na čtvrté mocnině absolutní teploty. Díky vyšším teplotám dosaženým při kyslíkem obohaceném spalování se zvýší přenos tepla radiací do ohřívaného materiálu, čímž se také zvýší rychlost zpracování materiálu a tok materiálu systémem. Tím pádem může být v stávajícím systému zpracováno více materiálu za stejný čas, nebo může být vytvořen nový menší systém s produktivitou toho stávajícího. Tato výhoda je důležitá, zejména pokud je místo pro spalovací zařízení omezené. Pro plné využití získané zvýšené produktivity musí být pro toto navýšení přizpůsoben i zbytek systému, aby byl schopen zvládat zvýšený tok materiálu [4].

Náklady na zavedení technologie OEC do stávajícího spalovacího systému jsou obvykle malé v porovnání s náklady na rozšíření stávajícího systému či přidání vybavení za účel zvýšení produktivity. Výhoda technologie OEC je i ta, že může být využívána přerušovaně k uspokojení občasných požadavků na zvýšené produkce [4].

### 2.3.2 VYŠŠÍ TEPELNÁ ÚČINNOST

Částečným či úplným nahrazením atmosférického vzduchu kyslíkem při spalování dochází k redukci množství dusíku vstupujícího do reakce a více energie je přeneseno do ohřívaného materiálu, namísto aby bylo vyplýváno na ohřátí dusíku. Díky nižšímu obsahu dusíku ve spalovacím vzduchu je možné dosáhnout vyšší teploty plamene při spalování, tím pádem i vyššího teplotního rozdílu mezi teplotou plamene a teplotou ohřívaného materiálu, což vede k efektivnějšímu přenosu tepla. Navíc je snížen objem spalin, což vede ke snížení ztrát tepla odváděného spalinami. Energie potřebná pro výrobu kyslíku ze vzduchu je pouze zlomkem energie využitě ve spalovacím procesu. Tím pádem celkový proces využije menší množství energie pro dané množství výroby díky zvýšení dostupného tepla. V některých případech mohou být náklady na kyslík vykompenzovány sníženou spotřebou paliva díky zvýšení tepelné účinnosti. To je častý případ při použití OEC v procesech využívajících elektrickou energii, která je obvykle dražší než energie získaná spalováním fosilních paliv. Například ve sklářském průmyslu pece spalují primárně olej nebo zemní plyn obvykle s využitím elektrické energie jako podpory. Výdaje za elektřinu však mohou být částečně či úplně odstraněny při správném využití OEC technologie [4, 20].

Obvyklým důvodem pro využití OEC je snížení spotřeby paliva na jednotku produkce díky zvýšení dostupného tepla. Tato úspora paliva může dosahovat až řádů desítek procent. [4, 18, 22].

### 2.3.3 ZLEPŠENÉ CHARAKTERISTIKY PLAMENE

Se zvyšující se koncentrací kyslíku v oxidačním činidle se také zvyšují meze výbušnosti a rozšiřují meze hořlavosti paliva. To vede k zvětšení rozptylu podmínek, za kterých je možné udržet plamen spalovat v daném spalovacím systému. Například plamen při spalování směsi

vzduchu a metanu může existovat při stechiometrickém poměru od 1,3 do 3,8. Avšak plamen směsi kyslíku a metanu je schopen existence při stechiometrickém poměru od 0,7 do téměř 18, což je důsledek odstranění dusíku [4, 19].

Kyslíkem obohacené spalování také přináší vyšší rychlost šíření plamene oproti spalování se vzduchem. To znamená, že u OEC musí být výstupní rychlost plynu vyšší než u klasického spalování se vzduchem, aby se tak zamezilo zhasnutí či zpětnému šlehnutí plamene. Při těchto vyšších rychlostech spalin je obecně snazší dosáhnout větší stability plamene, který není tolik ovlivnitelný prouděním uvnitř spalovací komory [4]. Kritická hranice rychlostního gradientu pro válcovité potrubí byla definována následovně [23]:

$$g = \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \quad (2.2)$$

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

Další výhodou při využití OEC oproti spalování se vzduchem spočívá ve snížení množství energie potřebné k zapálení paliva, ke kterému dochází při nižších teplotách. Toto zdokonalení zapalování může být důležité zejména při spalování tuhých a tekutých paliv, která jsou obecně hůře zapalitelná v porovnání s plynnými palivy. Nevýhodou však je, že může snáze dojít k neúmyslnému zapálení OEC systému, což je důvodem pro důsledné dodržování náležitých bezpečnostních opatření [4].

Kyslíkem obohacené spalování může být využito pro kontrolu plamene stávajícího vzduch/palivo spalovacího systému. Například přimíchání kyslíku do přívodního proudu vzduchu do spalování bývá využito pro zkrácení délky plamene. Vstřikováním kyslíku do spodní části plamene může naopak dojít k jeho prodloužení. Kontrolování plamene může být využito k zamezení přehřívání určitých částí spalovací komory nebo k pozměnění tepelných toků a teplotních profilů uvnitř komory [4].

### 2.3.4 MENŠÍ OBJEM SPALIN

Snížení koncentrace dusíku či jeho úplné odstranění ze spalovacího vzduchu může vést ke snížení objemového průtoku spalin. Například při procese ve sklářském průmyslu byla naměřena hmotnostní redukce spalin až o 98 % [24]. Díky redukci objemu spalin může být také zmenšeno potrubí odvádějící spaliny. OEC může být využito ke zvýšení produkce spalovacích systémů, které jsou limitovány kapacitou odvodu spalin. Za normální okolností by zvýšení produkce vedlo k potřebě zvětšit systém, který odvádí a zpracovává spaliny, avšak to se snížením objemu spalin při využití OEC metody není potřeba [25]. Snížení objemu spalin také přináší výhodu v podobě zvýšení účinnosti stávajících systémů pro zpracování spalin, jelikož jsou škodlivé emise ve větších koncentracích a je tak snazší je odstranit [4].

### 2.3.5 VYŠŠÍ EFEKTIVITA PŘENOSU TEPLA

Efektivita přenosu tepla z plamene na ohříváný materiál může být zvýšena využitím kyslíkem obohaceného spalování. Dochází zejména k většímu přenosu tepla radiací díky zvýšení koncentrace  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ , což jsou sloučeniny, které jsou zodpovědné za emitaci záření z plamene. Naopak  $\text{N}_2$  v plameni žádné záření neemituje [4, 18].

## 2.4 NEVÝHODY OEC

### 2.4.1 POŠKOZENÍ VYZDÍVKY SPALOVACÍ KOMORY

Jak již bylo uvedeno, při spalování s obohacením kyslíkem bývá dosahováno významně vyšších teplot oproti konvenčnímu spalování se vzduchem. Zvýšená radiace tepla z plamene může zapříčinit poškození vyzdívky, pokud není teplo vhodně rozptýleno. Současné hořáky pro obohacované spalování jsou navrženy tak, aby docházelo k rovnoměrnému šíření a rozprostření tepla a zamezení poškození vyzdívky v blízkosti hořáku. Hořáky jsou obvykle namontovány do žáruvzdorného bloku hořáku, který je potom upevněn do spalovací komory. Tyto bloky hořáků jsou vyrobeny z moderních žáruvzdorných materiálů, jakými jsou například materiály z oxidu zirkoničitého či oxidu hlinitého. Také špatně zvolený průtok hořákem nebo jeho pozice mohou vést k poškození vyzdívky. Například pokud je umožněno plamenu OEC hořáku se přímo dotýkat stěny spalovací komory, většina klasických materiálů toto vystavení vysoké teplotě nevydrží a bude poškozena. Tomu může být zabráněno výběrem vhodného designu hořáku a jeho umístění ve spalovací komoře [4].

Dalším potenciálním problémem, který by mohl způsobit poškození vyzdívky, je zvýšená koncentrace těkavých látek ve spalovací komoře při obohaceném spalování. To je například problém ve sklářském průmyslu, kde jsou emitovány těkavé korozivní látky během procesu výroby skla. Odstraněním velkého množství  $N_2$ , který je normálně přítomen při spalování se vzduchem, dojde ke značnému navýšení koncentrací těchto těkavých látek. To může vést ke korozivnímu poškození vyzdívky [4].

### 2.4.2 NEROVNOMĚRNÁ DISTRIBUCE TEPLA

Díky využití OEC metody dochází k zintenzivňování spalovacích procesů, což může nepříznivě ovlivnit charakteristiky přenosu tepla a hmoty uvnitř spalovací komory. Kyslíkem obohacené spalování obecně zvyšuje teplotu plamene, což také zvyšuje radiální tepelný tok z plamene do materiálu [Q, R]. Pokud je zvýšení radiace lokální, existuje možnost tvorby velmi horkých míst (tzv. „hot spots“) na ohřivaném materiálu. To může zapříčinit přehřívání, které může poškodit či snížit kvalitu produktu. Tomuto problému se dá úspěšně vyhnout použitím hořáku, který byl speciálně navrhnut pro OEC [4].

Při využití OEC metody dochází ke značnému snížení objemového průtoku spalin. Ačkoliv je průměrná teplota spalin vyšší, není to dostatečné ke kompenzaci sníženého průtoku spalin. V důsledku toho může být snížen přenos tepla konvekcí ze spalin to ohřivaného materiálu. Snížený tok spalin spalovací komorou může nepříznivě ovlivnit proces přenosu hmoty při některých ohřevných procesech, zejména při procesech souvisejících s vysoušením či odstraňováním těkavých látek. To lze kompenzovat využitím hořáku, který zahrnuje recirkulaci spalin ve spalovací komoře, což zvyšuje objemový průtok uvnitř komory a pomáhá odstranit těkavé látky uvolňující se z ohřivaného materiálu [4].

### 2.4.3 PORUCHA PLAMENE

V posledních letech je trendem využívat pro OEC hořáky s menší hybností plamene. Příkladem je hořák Cleanfire využívaný ve sklářském průmyslu [26]. Tyto plameny s nižší hybností mají tendenci být delší a více svítivé než plameny hořáků, které bývaly tradičně využívány v minulosti. Problémem však je, že tyto plameny s menší hybností mohou být snáze narušeny oproti plamenům s vysokou hybností. Příkladem je přidání OEC hořáku s nízkou hybností plamene do pece obsahující hořáky spalující palivo se vzduchem, které mají vysokou hybnost plamene. Plameny s vysokou hybností mohou negativně ovlivnit spalovací charakteristiky



hořáku s nízkou hybností plamene, pokud není správně navržena geometrie spalovací komory. Problém s poruchou plamene může být odstraněn správnou volbou hořáků, jejich umístěním a provozními podmínkami [4].

#### 2.4.4 ZVÝŠENÉ EMISE ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

Pokud je obohacování kyslíkem využito ve stávajícím vzduch/palivo spalovacím systému, může dojít ke zvýšení  $\text{NO}_x$  emisí díky zvýšené teplotě plamene a následné zvýšené tvorbě termálních  $\text{NO}_x$ . Při využití OEC může také dojít ke zvýšené produkci  $\text{CO}_2$  [18, 19]. To však může být naopak výhodou a může vést k snazšímu zachytávání  $\text{CO}_2$  po spalování, tzv. „carbon capture storage“ technologie [27].

#### 2.4.5 ZPĚTNÉ ŠLEHNUTÍ PLAMENE

Využití OEC zintenzivňuje spalovací reakce. Jedním z důsledků této zvýšené reaktivity je zvýšené riziko zpětného šlehnutí plamene. To nastává, když rychlost plynu opouštějícího hořák je menší než rychlost plamene. Konec plamene se pak posunuje směrem k ústí hořáku. Pokud jsou palivo a oxidační činidlo předem smíchané, plamen může hořet uvnitř hořákové konstrukce a hrozí riziko exploze. U systémů s před smícháním paliva a oxidačního činidla existuje často opatření pro zastavení plamene v případě, kdy by mělo dojít k zpětnému šlehnutí. Může to být samostatné zařízení nazývané „flame arrestor“ nebo to může začleněno do konstrukce samotného hořáku. U OEC systémů, kde je palivo a oxidační činidlo smícháno až před výstupem z hořáku, v podstatě nehrozí zpětné šlehnutí. V případě zpětného šlehnutí by plamen nemohl pokračovat dále do hořáku, protože by zde nebyla směs paliva a oxidačního činidla, protože obě složky by byly oddělené [4].

## 2.5 VYUŽITÍ OEC V PRŮMYSLU

Kyslíkem obohacené spalování se využívá v široké škále průmyslových oborů a aplikací. V některých oborech je tato technologie novinkou, v jiných je dobře zavedená a využívána již řadu let. Obecně se OEC využívá při vysokoteplotních ohřevných či tavících procesech [4].

### 2.5.1 SKLÁŘSKÝ PRŮMYSL

Metoda spalování s obohacením kyslíkem je ve sklářském průmyslu značně rozšířená a hojně využívána. Hlavními benefity využití OEC technologie jsou snížení emisí, zvýšení účinností procesů a produktivity, snížení spotřeby paliva a také zlepšení kvality skla [28, 29]. Například společnost AGC Glass Europe vyvinula systém nazývaný „Hot-Oxycombustion“, který využívá spalování s čistým kyslíkem, což snižuje tvorbu  $\text{NO}_x$  emisí a také redukuje energetické nároky, jelikož se ušetří teplo, které by bylo potřeba na ohřátí dusíku ve vzduchu. Dále tento systém využívá rekuperaci tepla ze spalin. Teplo ze spalin je využito k předeřtání zemního plynu před jeho přivedením do pece, což přináší další energetickou úsporu. Po třech letech provozu bylo zjištěno, že emise  $\text{CO}_2$  byly sníženy o 15 %, emise  $\text{NO}_x$  o 83 % a emise  $\text{SO}_x$  byly sníženy o 34,5 %. Navíc bylo spotřebováno o 25 % méně energie [30].

Společnost Linde Gases vyvinula technologii COROX Low $\text{NO}_x$ , která využívá speciální horizontální kyslíkové trysky a hořáky k vytvoření atmosférických podmínek uvnitř pecí, což vede k podstatnému snížení tvorby  $\text{NO}_x$  emisí. Kyslík je do pece vstříkovan prostřednictvím vysokotlakých přívodních trysek a dochází k recirkulaci atmosféry uvnitř pece, což vede k zředění paliva a stupňovitějšímu spalování. Také je dosaženo větší homogenity plamene a snížení teploty plamene, což má značný dopad na snížení emisí. Nižší teplota plamene snižuje koncentraci uhlovodíkových radikálů v peci a tím redukuje vznik promptních  $\text{NO}_x$ . [31].

Společnost Air Products vyvinula integrovaný systém pro kyslíkové spalování zahrnující hořáky Cleanfire. Tento systém může výrobcům přinést benefity zahrnující snížení NO<sub>x</sub> emisí přibližně o 80 %, zvýšení produktivity o více než 25 %, 25-60% úsporu energie a zlepšení efektivity a kvality vyrobeného skla [32].

### 2.5.2 KOVOZPRACUJÍCÍ PRŮMYSL

Ohřívání a tavení kovů bylo jednou z prvních průmyslových oblastí, kde byla využita technologie OEC. Obohacování kyslíkem je využíváno jak při výrobě železných kovů, tak i při výrobě barevných kovů, jakými jsou například měď či hliník [4]. Využití OEC může vést ke zvýšení produktivity, energetickým úsporám, snížení emisí a zvýšení kvality produktu [33]. Při výrobě železa se využívá předehřívání vzduchu před jeho vstupem do vysoké pece. Při využití OEC může být teplota tohoto předehřátého vzduchu zvýšena díky vyšší teplotě plamene obohacovaného kyslíkem. Díky redukci objemu spalin se také snižují ztráty tepla spalinami [34].

Například společnost Praxair používá pro kyslíkem obohacené bezplamenné spalování technologii „Dilute Oxygen Combustion“ (DOC). Mezi benefity z využití této technologie patří až 50% úspora paliva, zvýšená produktivita o 10 až 35 %, snížená tvorba NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub> emisí a větší rovnoměrnost ohřevu [35].

### 2.5.3 PETROCHEMICKÝ A CHEMICKÝ PRŮMYSL

Tak jako v jiných průmyslových odvětvích i v petrochemickém a chemickém průmyslu je v dnešní době snaha o snížení vstupních nákladů, snížení produkovaných emisí a co největší zvýšení produktivity. Pro dosažení těchto cílů je výhodné využít OEC technologii. Společnost Praxair například využívá OEC v široké škále procesů, od parních reformerů metanu až po různé ohříváče. Využitím kyslíkem obohaceného spalování může být dosaženo rovnoměrnější distribuce tepla, delší doby chodu a zvýšení kvality chemikálii. OEC může také přispět k překonání omezení produktivity hořáku způsobené omezeným průtokem spalin a kapacitou palivového systému. Společnost Praxair vyvinula OEC technologii, která může zvýšit množství vodíku nebo oxidu dusíku vyprodukovaného z parního metanového reformeru. Tato technologie může zvýšit produktivitu o více než 20 % v závislosti na provozních parametrech [36].

### 2.5.4 ENERGETICKÝ PRŮMYSL

Při výrobě elektřiny v elektrárnách se využívají paliva, které mají poměrně velké emise, například uhlí. Bylo však zjištěno, že využitím vstřikování čistého kyslíku lze snížit emise NO<sub>x</sub>, zvýšit efektivitu spalování, zvýšit produktivitu a flexibilitu procesu [37].

Spalovací systém obohacování spalování kyslíkem využívá také společnost Praxair. Přidání kontrolovaného množství kyslíku do spalovacího procesu vede k redukci tvorby NO<sub>x</sub> a pomáhá generovat větší výkon například v období letní špičky [38].

### 2.5.5 SVAŘOVÁNÍ A ŘEZÁNÍ

Běžným a obecně známým typem je svařování za použití směsi kyslíku a acetylenu. Spočívá ve spalování palivového plynu společně s kyslíkem a tavení svařovaného materiálu za přidávání plnicího materiálu. Využití kombinace kyslíku a acetylenu je velmi vhodné, protože při ní je dosahováno vyšších teplot plamene než při využití vzduchu a acetylenu či kombinace jiného palivového plynu a kyslíku. Při využití této metody dochází k pomalejšímu chladnutí svaru, což

je výhodné při svařování ocelí, které mají tendenci tvrdnout. Také to může přispět ke snížení zbytkového napětí ve svaru. Nevýhodou však je, že je díky tomu tato metoda poměrně pomalá. Tato metoda může být využita ke svařování ocelí i neželezných kovů [39, 40].

Proces řezání za použití směsi paliva a kyslíku vytváří chemickou reakci kyslíku s řezaným kovem při zvýšených teplotách. Požadovaná teplota je udržována plamene za spalování palivového plynu smíchaného s čistým kyslíkem. Tento způsob je založen na rychlé tvorbě oxidů železa, ke kterému dochází, když je do řezné oblasti přiváděn vysokotlaký proud kyslíku. Železo je rychle oxidováno vysoce čistým kyslíkem a zároveň je touto reakcí uvolňováno teplo. Tímto způsobem vzniká úzký řez nazývaný „kerf“. Manuálně je běžně možné za pomoci kyslíku a paliva řezat materiály o tloušťce od 1,6 mm do 102 mm [41].

### 3 BEZPEČNOST PŘI OEC

Ačkoliv kyslík sám o sobě je chemicky stabilní, nerozkládá se a není hořlavý, jeho použití zahrnuje určitý stupeň rizika. Kyslík je silným oxidačním činidlem v plynném i kapalném stavu. Mnoho materiálů nehoří ve vzduchu, avšak v atmosféře obohacené kyslíkem ano. Reaktivita kyslíku vzrůstá se zvyšujícím se tlakem, teplotou a jeho koncentrací. Při požáru v kyslíkových systémech může být poraněn nebo zabit personál a vybavení může být poškozeno nebo zničeno. Proto musí být nebezpečí vznícení v kyslíkových systémech omezeno nebo úplně vyloučeno vhodným výběrem materiálu, konstrukcí systému a údržbovými postupy [42].

#### 3.1 SPALOVACÍ TROJÚHELNÍK

Pro existenci plamene jsou potřebné tři prvky: palivo, kyslík a zdroj zapálení. Tento koncept bývá prezentován jako spalovací trojúhelník (na obr. 13). Pokud je odebrán jakýkoliv z těchto prvků, plamen nemůže vzniknout a případný již existující plamen je zhasnut. Avšak samotný plamen může být považován za zdroj vznícení [4, 42].



Obr. 13 Spalovací trojúhelník [4]

#### 3.2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Většina spalovacích zařízení se skládá ze dvou samostatných částí: samotného hořáku a ostatního periferního vybavení zajišťujícího efektivní a bezpečné ovládání provozu hořáku. Toto vybavení zahrnuje zařízení pro kontrolu tlaku a průtoku paliva a okysličovač, zařízení pro kontrolu plamene a další související zařízení. Bezpečnostní problémy hořáku mají výrazně odlišný charakter oproti bezpečnostním otázkám řídicího zařízení. U hořáku je plamen požadovanou podmínkou, zatímco uvnitř řídicího systému a v okolním prostředí je potřeba se plamenu a hoření zcela vyhnout. Kritickými bezpečnostními problémy jsou udržení stability plamene (např. ztráta plamene, oscilace plamene atd.), kontrola tvaru a umístění plamene, vyhýbání se příliš vysokým teplotám a korozi, minimalizace nežádoucích produktů spalování (např.  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  atd.) a zabránění nežádoucímu tepelnému namáhání zbytku pece a vybavení. Při kyslíkem obohaceném spalování se stávají důležitými problémy týkající se teploty v důsledku zvýšení rychlosti a teploty plamene. Pro porovnání při spalování vzduch/metan je dosahováno teplot plamene okolo  $1725\text{ }^\circ\text{C}$ , naproti tomu při spalování kyslík/metan je to teplota plamene okolo  $4000\text{ }^\circ\text{C}$ . Tato teplota je však příliš vysoká, v praxi se tak používá např. recirkulace spalin, kterými se vstupující kyslík naředí [4].

Při spalování je snaha izolovat a řídit tok paliva a okysličovač. To zahrnuje oddělení paliva a okysličovač zkonstruováním potrubí takovým způsobem, který úniku a předčasnému promíchání obou plynů. V tomto úsilí je zahrnut návrh a výběr komponentů a materiálů pro kyslíkové potrubí tak, aby byly kompatibilní s kyslíkem. Kompatibilita materiálu s kyslíkem je vlastnost materiálu, kdy daný materiál hoří nebo nehoří v prostředí obohaceném kyslíkem.

Kyslík sám o sobě není nebezpečný, sám o sobě nehoří, dokud není přítomno palivo. Na druhé straně kyslík v kombinaci s palivem má potenciál být velmi nebezpečný (může způsobit rychlé spalování a/nebo výbuch). Mnoho materiálů, které jsou typicky nehořlavé ve vzduchu, hoří velmi rychle v atmosféře obohacené kyslíkem (např. maziva, kaučukové sloučeniny, uhlík, ocelové potrubí atd.) [4].

Kritické bezpečnostní problémy, kterým je nutno čelit při řízení spalování, jsou izolace a kontrola paliva a okysličovadla, zabránění vznícení, řízení poměru průtoku paliva k průtoku okysličovadla, kontrola plamene, odstranění hořlavých plynů z uzavřených prostor před zapálením, kontrola zapalování [4].

### 3.3 NEBEZPEČÍ POŽÁRU

Nebezpečí požáru může být definováno jako jakákoliv tekutina, produkt, část zařízení, proces, aj., které mohou způsobit požár, nebo přispět k jeho vzniku. Systém dodávky paliva je primárním nebezpečím vzniku požáru kvůli možnému úniku paliva do okolního prostředí nebo atmosféry, která je téměř vždy tvořena vzduchem. Jedná se o bezpečnostní riziko vzhledem k možnosti vzniku nekontrolovatelného požáru nebo výbuchu v závislosti na velikosti a místě úniku a dostupnosti zdroje zapálení [4].

Významným nebezpečím je únik kyslíku z procesu spalování. Hrozí nebezpečí požáru přívodního potrubí kyslíku a vybavení v blízkosti místa úniku kyslíku. Požár se pak může rozšířit na cokoli v okolí, co může působit jako palivo. Pravděpodobnost a rozsah požáru závisí na velikosti úniku, rychlosti, s jakou je kyslík uvolňován do okolní atmosféry a na dostupnosti zdrojů vznícení [4].

Případy, kdy dojde k současnému uvolnění paliva a okysličovadla mohou být velmi nebezpečné. Příkladem současného uvolnění je situace, kdy únik paliva způsobí požár, který zapříčiní prasknutí blízkého kyslíkového vedení a dodání čistého kyslíku do již existujícího ohně. Takový scénář může značně zvětšit ničivé následky požáru [4].

Tradiční techniky požární bezpečnosti využívané pro snížení rizik spojených s OEC jsou: kontrola meze zápalnosti (zabránění akumulaci hořlavých směsí paliva a okysličovadla), kontrola zapalování (vyhnutí se zapálení hořlavé směsi plynů), zhasnutí plamene (metody k ukončení spalování) a kontrola poškození (metoda pro minimalizaci škod při požáru či výbuchu) [4].

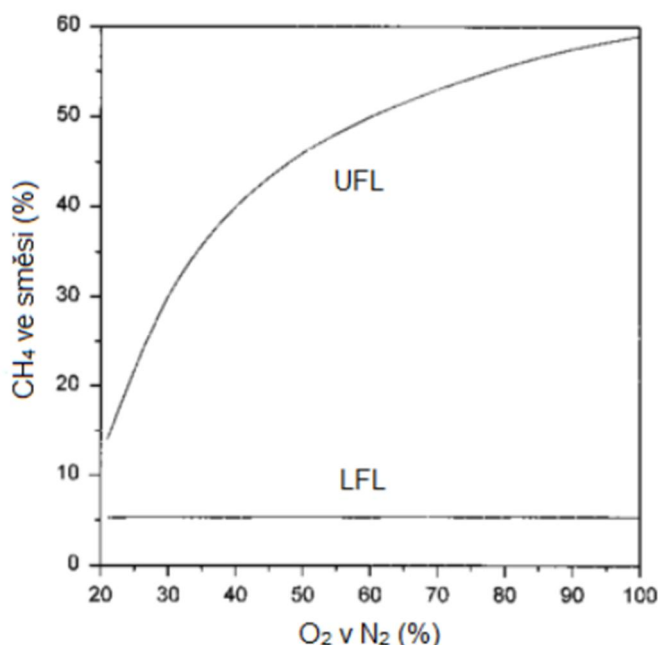
### 3.4 KONTROLA MEZE ZÁPALNOSTI

Ve většině spalovacích procesů spočívá primární přístup k zajištění bezpečného procesu v zamezení akumulace paliva a okysličovadla, které jsou v mezích hořlavosti. Existují dvě meze zápalnosti pro plynná paliva. Jedná se o dolní mez zápalnosti (LFL), horní mez zápalnosti (UFL). Dolní mez zápalnosti je definována jako nejnižší procentuální objemový podíl paliva smíchaného s okysličovadlem, při kterém již dochází k samovolnému šíření plamene. Horní mez zápalnosti je definována jako nejvyšší procentuální objemový podíl paliva smíchaného s okysličovadlem, při kterém ještě dochází k samovolnému šíření plamene. Šíření plamene nastává, když spalovací reakce několika molekul paliva a okysličovadla poskytne dostatečnou energii (ve formě rychlosti a teploty) k šířícímu se samovolnému vznícení sousedních molekul paliva a okysličovadla. energii potřebnou k zahájení spalovací reakce musí poskytnout zdroj zapálení (např. zápalka, zapalovací svíčka, statická elektřina atd.), nebo musí být teplota směsi

zvýšena nad teplotu samovznícení směsi. Teplota samovznícení je definována jako teplota, při které dojde k samovolnému zapálení bez vnějšího zdroje zapálení [4].

Údaje mezi zápalnosti závisí na chemickém chování spalovací reakce, teplotě a tlaku směsi, geometrii a povrchu zařízení, přítomnosti ředidla, inhibitoru a na mnoha dalších proměnných a aspektech.

Meze zápalnosti pro metan ve vzduchu (při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku) v závislosti na procentu kyslíkového obohacení jsou na obrázku 14. Při 21 % O<sub>2</sub> (vzduch) je dolní mez zápalnosti přibližně 5 % a horní mez zápalnosti zhruba 14 %. Při 100 % O<sub>2</sub> se dolní mez zápalnosti nezměnila, avšak horní mez zápalnosti je přibližně 59 %. Toto zvýšení horní meze zápalnosti znamená, že rozmezí zápalnosti pro metan v čistém kyslíku je šestkrát větší než rozmezí zápalnosti pro metan ve vzduchu. To je jasným příkladem nárůstu potenciálu požáru při kyslíkem obohacených spalovacích procesech [4].



Obr. 14 Meze zápalnosti metanu ve vzduchu/kyslíku v závislosti na obohacení kyslíkem [4]

Meze zápalnosti topných plynů lze vypočítat ze složení plynů a tabelovaných hodnot mezi zápalnosti pro jednotlivé čisté složky. Vzorec pro výpočet vypadá následovně [43]:

$$L_{(H,D)} = \frac{100}{\sum \frac{C_i}{L_{i(H,D)}} + \frac{n}{100}} \quad (3.1)$$

kde:  $L_{(H,D)}$  je horní nebo dolní mez zápalnosti 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 plynu (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) [obj. %].

Praktické techniky využívající meze zápalnosti pro spalovací procesy obohacené kyslíkem jsou založeny na prevenci vzniku jakýchkoliv směsí paliva a kyslíku (nebo vzduchu obohaceného o kyslík) napříč celým systémem, přičemž jedinou výjimkou je smíchání v hořáku během řízeného spalování. Systémy přívodu kyslíku a paliva, potrubí a kontrolní zařízení musí být vždy instalovány v dobře větraném prostoru, aby nedošlo k nahromadění hořlavých směsí unikajících malými netěsnostmi. Nově instalované palivové a kyslíkové potrubí se obvykle čistí inertním plynem (např. dusíkem) ve snaze vyhnout se krátkodobé možnosti vzniku hořlavé směsi během uvádění zařízení do provozu. Čištění pece vzduchem nebo inertním plynem před (a případně po) pokusu o zapálení hořáku se využívá k zamezení vzniku požáru nebo výbuchu. V peci se totiž může nahromadit směs hořlavých plynů v důsledku úniku paliva nebo kyslíku do pece nebo v důsledku neúspěšného pokusu o zapálení hořáku. Zapalování hořáku je řízeno v určitém časovém limitu za specifické nízké rychlosti hoření pro minimalizaci množství hořlavé směsi, která může vzniknout v důsledku neúspěšného pokusu o zapálení. Zařízení pro kontrolu přítomnosti plamene je propojené s kyslíkovým a palivovým bezpečnostním uzavíracím ventilem, které automaticky zastaví přívod paliva a kyslíku, jakmile je detekována ztráta plamene. Přívody vzduchu obohaceného o kyslík často obsahují kontinuální analyzátor (spojený s bezpečnostním zavíracím kyslíkovým ventilem), který kontroluje, že procento obohacování kyslíkem je na bezpečné úrovni [4].

### 3.5 KONTROLA ZAPALOVÁNÍ

Zapálení směsi paliva a oxidačního činidla, ke kterému dojde v rámci mezí zápalnosti, může mít mnoho možných příčin včetně zvýšené teploty, dopadu částic, elektrického výboje (obloukem nebo jiskrou), rychlého natlakování, spontánní exotermické reakce, tření a dalších. Bez ohledu na fyzikální dopad, proces zapalování musí poskytnout dostatečnou energii a teplotu. V případě spalovacího systému obohaceného kyslíkem má přítomnost vysokých koncentrací kyslíku tendenci snížit teplotu a energii potřebnou k zapálení plamene. Kontrola zapalování spočívá v pokusu minimalizovat nebo odstranit všechny zdroje zapalování, které mohou vyvolat nechtěný požár či výbuch. Celková eliminace všech zdrojů zapálení je však obecně obtížná. Existuje tolik různých možností zapalování, že nemusí být praktické nebo možné odstranit všechny z nich. Z těchto důvodů je kontrola zapalování všeobecně prováděna, ale je na ni zřídka spoléháno jako na primární bezpečnostní techniku [4].

Klíčovým problémem při navrhování bezpečného vybavení pro řízení průtoku kyslíku a potrubních systémů je rychlost kyslíku v systému. Tento problém je přímo spojen s prevencí zážehu. Jakýkoliv plyn pohybující se skrz uzavřený prostor má tendenci spolu s ním přenášet částice materiálu. Zdrojem těchto částic může být zařízení pro výrobu plynu, skladovací nádrže, samotné potrubí (např. odlupováním z vnitřní stěny), nečistoty vzniklé během výroby atd. Rychlosti těchto částic se blíží rychlosti plynu. Když takováto částice narazí do vnitřního povrchu potrubí, uvolní energii, která může být dostatečná k vznícení částice a případně potrubí. V závislosti na materiálu, ze kterého je potrubí zkonstruováno, je stanovena vrchní hranice rychlosti plynu, nad kterou již může docházet ke vznícení částic. Horní limit rychlosti 60 m/s pro trubky z uhlíkové nebo nerezové oceli je běžným příkladem, který je obecně považován za bezpečný limit. Pro snížení počtu a velikosti částic v kyslíkovém potrubí je nejdůležitější jeho správná instalace. Té předchází důkladné čištění všech komponentů a částí potrubí. Po úspěšném sestavení musí být potrubí opět vyčištěno, aby se tak odstranily částice nebo jiné cizí materiály zanesené během instalace. Většina kyslíkových potrubí je před uvedením do provozu počištěna inertním plynem. Kromě toho musí zařízení pro kontrolu průtoku kyslíku obsahovat filtry a síta, které minimalizují počet a velikost částic, které mohou proudit potrubím během provozu [4].

### 3.6 KOMPATIBILITA S KYSLÍKEM

Výběr materiálů a komponentů pro kyslíkem obohacené spalování vyžaduje specifické znalosti. Stávající systém dodávání vzduchu nemůže být bezpečně použit beze změn součástí potrubí, ovládacích prvků a provozních postupů ani při nízké úrovni obohacování kyslíkem. Termín „kompatibilní s kyslíkem“ se používá k popisu materiálu, který byl analyzován tak, aby byl přijatelný pro provoz v kyslíkovém prostředí či v prostředí obohaceném kyslíkem. V kyslíkových systémech může být použit kyslíkový index materiálu pro klasifikaci konstrukčních materiálů. Kyslíkový index materiálu je definován jako minimální koncentrace kyslíku, vyjádřená v objemových procentech, ve směsi kyslíku a dusíku, která pouze podpoří spalování materiálu. Bezpečnostní požadavky spojené s kompatibilitou s kyslíkem zahrnují pečlivé čištění součástí a používání kompatibilních materiálů. Všechny systémy musí být důkladně vyčištěny a musí být odstraněny jakékoliv stopy nekompatibilních kontaminantů, jako jsou např. oleje, mastnota, maziva či rozpouštědla. Jakékoliv kapaliny, které budou v systému použity, musí být vyhodnoceny jako kompatibilní s kyslíkem. To platí také pro všechny plastové materiály a materiály ze směsí s kaučuky [4].

Každý vzduchový systém, kterým je dopravován vzduch obohacený o kyslík, musí být důkladně zkontrolován. To zahrnuje kontrolu hořáků, systémů pro dodávku paliva a okysličovačů, elektrických systémů, řídicích systémů, místa mísení kyslíku a vzduchu, celkového ohřevného procesu, umístění zařízení, provozních postupů, personálu, který bude obsluhovat zařízení a dalších relevantních faktorů, které by mohly mít dopad na bezpečnost celého systému [4].





## 4 SIMULAČNÍ VÝPOČET

Každý zásah do spalovacího procesu vede ke změně fyzikálních veličin, jako jsou např. vstupní a výstupní průtoky a koncentrace jednotlivých prvků, změny teplot atd. V následujícím simulačním výpočtu byl sledován vliv koncentrace kyslíku v oxidačním činidle na objem a teplotu spalin, hustotu a viskozitu spalin a koncentraci CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O ve spalinách. Jako okysličovadlo byla použita směs čistého kyslíku a vlhkého vzduchu. Výpočet vlhkosti vzduchu je proveden v části 4.1. Jako palivo byl použit tranzitní zemní plyn, který se na našem území využívá nejčastěji a jehož složení je uvedeno v podkapitole 1.1.

### 4.1 VÝPOČET VLHKOSTI SPALOVACÍHO VZDUCHU

Obsah vodní páry byl vypočítán na základě relativní vlhkosti, teploty a tlaku vzduchu naměřených meteorologickou stanicí v Brně v den výpočtu [44].

Tab. 2 Hodnoty naměřené meteostanicí

Veličina	Jednotka	Naměřená hodnota
$t_{atm}$	[°C]	26,5
$p_{atm}$	[kPa]	101,07
$\varphi$	[%]	46

Ke stanovení tlaku nasycených par za dané teploty byla použita Antoineova rovnice, která má následující tvar:

$$\log p^0 = A - \frac{B}{C + t} \quad (4.1)$$

kde:  $p^0$  je parciální tlak sytých par [kPa],  
 $A$  je konstanta Antoineovy rovnice [-],  
 $B$  je konstanta Antoineovy rovnice [-],  
 $C$  je konstanta Antoineovy rovnice [-],  
 $t$  je teplota vzduchu [°C].

Konstanty Antoineovy rovnice pro vodu jsou [45]:

$$A = 7,19621$$

$$B = 1730,63$$

$$C = 233,426$$

Antoineova rovnice pro vodu má pak tvar:

$$\log p_{H_2O}^0 = 7,19621 - \frac{1730,63}{233,426 + 26,5} = 0,538 \quad (4.2)$$

Do rovnice (4.2) byla dosazena naměřená teplota vzduchu a byl z ní vyjádřen parciální tlak syté vodní páry. Ten byl následně dosazen do rovnice (4.3) pro výpočet relativní vlhkosti vzduchu, ze které byl vyjádřen parciální tlak vodní páry obsažené ve vlhkém vzduchu.

$$\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O}^0} \quad (4.3)$$

kde:  $p_{H_2O}^0$  je parciální tlak syté vodní páry [kPa],  
 $p_{H_2O}$  je parciální tlak vodní páry [kPa],  
 $\varphi$  je relativní vlhkost vzduchu [-].

Výsledná objemová koncentrace vody ve vzduchu byla stanovena pomocí rovnice (4.4).

$$x_{H_2O} = \frac{p_{H_2O}}{p_{atm}} \cdot 100 = \frac{1,5533}{101,07} \cdot 100 \doteq 1,54 \% \quad (4.4)$$

kde:  $x_{H_2O}$  je objemová koncentrace vody ve vzduchu [%],  
 $p_{H_2O}$  je parciální tlak vodní páry [kPa],  
 $p_{atm}$  je atmosférický tlak vzduchu [kPa].

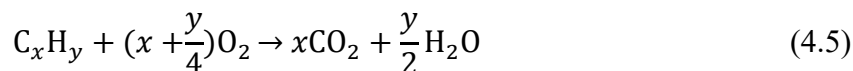
Objemové složení suchého a vlhkého vzduchu je porovnáno v následující tabulce:

Tab. 3 Složení suchého a vlhkého vzduchu [10]

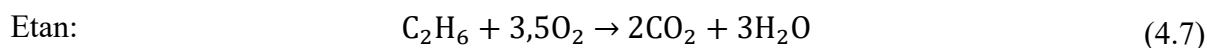
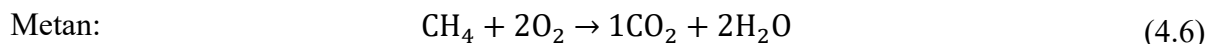
Plyn	Suchý vzduch	Vlhký vzduch
	$x_i$ [%]	$x_i$ [%]
<b>N<sub>2</sub></b>	78,09	76,887
<b>O<sub>2</sub></b>	20,95	20,627
<b>Ar</b>	0,93	0,916
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,03	0,03
<b>H<sub>2</sub>O</b>	0	1,54

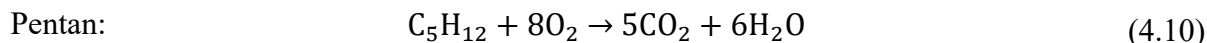
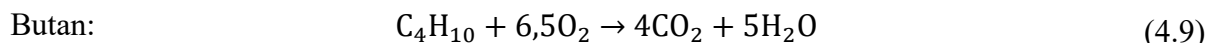
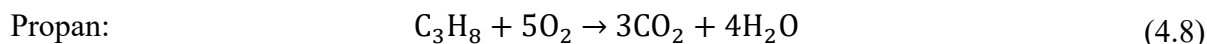
## 4.2 CHEMICKÉ ROVNICE SPALOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU

Při spalování zemního plynu dochází k reakci jeho uhlovodíkových složek s kyslíkem za vzniku oxidu uhličitého a vodní páry. Obecný předpis pro tyto reakce je následující:



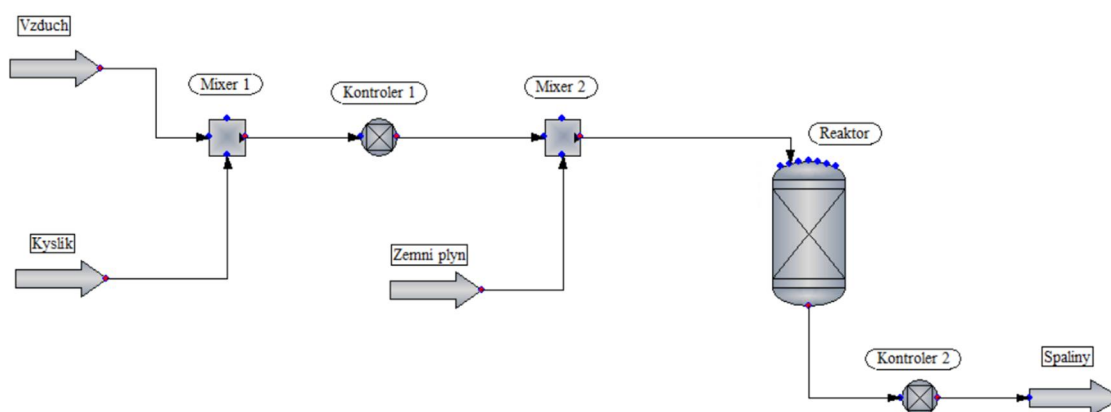
Podle vztahu (5.5) jsou vyjádřeny rovnice pro uhlovodíky obsažené v zemním plynu:





### 4.3 BILANČNÍ SCHÉMA SPALOVACÍHO PROCESU

Bilanční schéma spalovacího procesu sestaveného v simulačním softwaru ChemCAD je na obr. 15. Vstupní proudy kyslíku a vzduchu jsou nejdříve smíchány v prvním mixeru a poté je k této směsi přimíchán zemní plyn v druhém mixeru. Tato směs paliva a oxidačního činidla vstupuje do adiabaticky nastaveného rovnovážného reaktoru, ve kterém dochází ke spálení a reaktor opouští spaliny. V obvodu byly použity dvě jednotky Controller. Controller 1 reguluje přívod kyslíku tak, aby směs vzduchu a kyslíku před smíchání s palivem měla požadovanou koncentraci kyslíku. Controller 2 řídí přísun vzduchu do obvodu tak, aby spaliny obsahovaly 3 %  $O_2$  a zajišťuje tak přebytek vzduchu nutný pro dokonalé spálení paliva.



Obr. 15 Schéma spalovacího obvodu

Zadané vstupní podmínky:

$$P_{O_2} = 600 \text{ kPa}$$

$$P_{hoř} = 500 \text{ kW}$$

$$t_{O_2} = -10 \text{ °C}$$

$$LHV_{ZP} = 33\,480 \text{ kJ/m}_N^3$$

$$p_{vzduch} = 102 \text{ kPa}$$

$$t_{vzduch} = 26,5 \text{ °C}$$

Potřebný objemový průtok zemního plynu pro výkon 500 kW byl vypočítán ze vztahu pro výkon hořáku:

$$P_{hoř} = \frac{\dot{V}_{ZP} \cdot LHV_{ZP}}{3600} \quad (4.11)$$

kde:  $P_{hoř}$  je výkon hořáku [kW],  
 $\dot{V}_{ZP}$  je objemový průtok zemního plynu [ $m^3_N/h$ ],  
 $LHV_{ZP}$  je výhřevnost zemního plynu [ $kJ/m^3_N$ ].

$$\dot{V}_{ZP} = \frac{P_{hoř} \cdot 3600}{LHV_{ZP}} = \frac{500 \cdot 3600}{33\,480} = 53,763 \text{ m}^3_N/h$$

#### 4.4 VÝSLEDKY SIMULACE

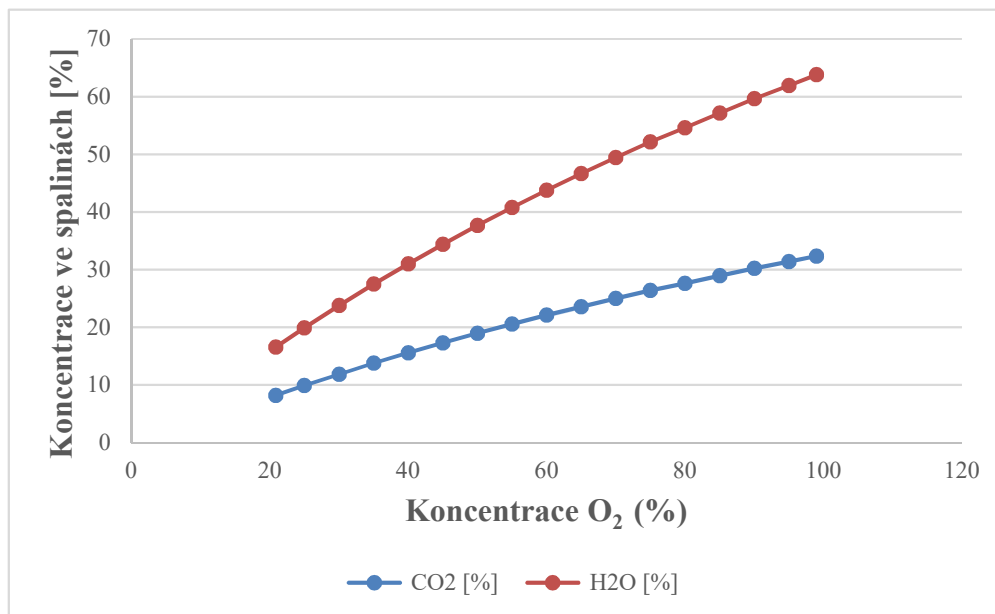
Výsledné hodnoty získané simulací jsou v tabulkách 4 a 5. Tabulky obsahují hodnoty skutečného průtoku spalin, průtoku spalin vztaženého na normální podmínky, adiabatickou teplotu spalin, hustotu a dynamickou viskozitu spalin a koncentrace  $CO_2$  a  $H_2O$  ve spalinách v závislosti na koncentraci kyslíku v oxidačním čínidle.

Tab. 4 Výsledky simulace

Koncentrace $O_2$ [%]	Koncentrace $CO_2$ ve spalinách [%]	Koncentrace $H_2O$ ve spalinách [%]	Viskozita spalin [ $N \cdot s \cdot m^{-2} \cdot 10^{-5}$ ]
20,6	8,2	16,6	6,8
25	9,9	19,9	7,4
30	11,9	23,8	8,1
35	13,8	27,5	8,7
40	15,6	31,0	9,2
45	17,3	34,4	9,6
50	19,0	37,7	10,0
55	20,6	40,8	10,4
60	22,1	43,8	10,7
65	23,6	46,7	11,0
70	25,0	49,5	11,3
75	26,4	52,1	11,5
80	27,6	54,6	11,7
85	28,9	57,1	11,9
90	30,2	59,7	12,1
95	31,4	62,0	12,3
99	32,3	63,8	12,4

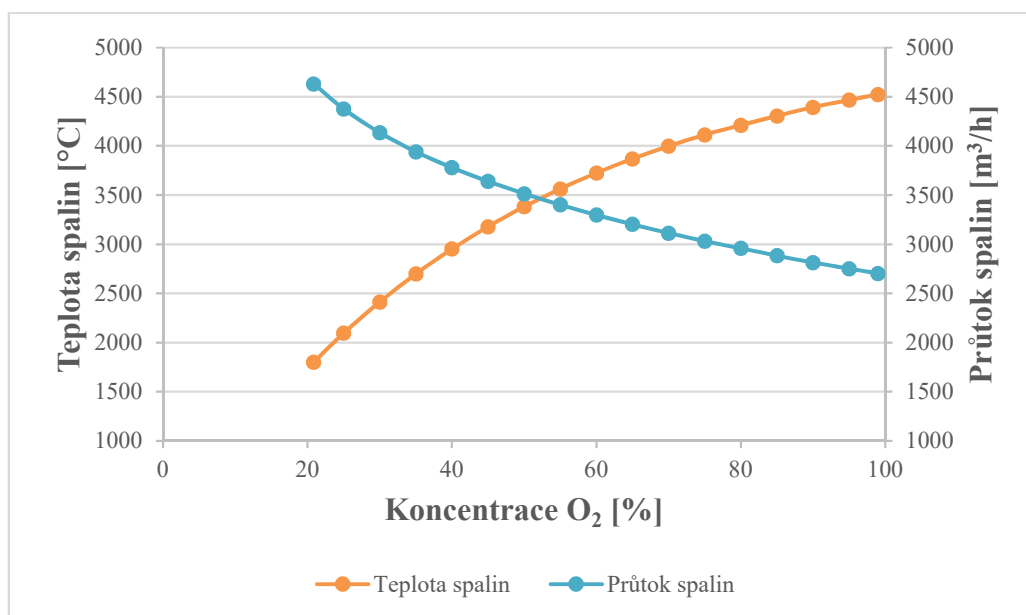
Z hodnot v tabulce 4 a z grafu na obr. 16 je vidět, že se zvyšující se koncentrací kyslíku v oxidačním čínidle roste koncentrace  $H_2O$  i  $CO_2$  ve spalinách, což je v souladu s charakteristikou OEC. Koncentrace  $CO_2$  i  $H_2O$  ve spalinách jsou při spalování s čistým kyslíkem až téměř čtyřnásobné oproti spalování s atmosférickém vzduchem. Je to způsobeno tím, že se zvyšující se koncentrací  $O_2$  se snižuje koncentrace dusíku ve spalinách. Zvýšení

koncentrace  $\text{CO}_2$  může být výhodné a může vést k snazšímu zachytávání  $\text{CO}_2$  po spalování, tzv. „carbon capture storage (CSS)“ technologie [27].



Obr. 16 Graf závislosti koncentrace  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  ve spalinách na koncentraci  $\text{O}_2$  v oxidačním činidle

Z tabulky 5 a obrázku 17 je patrné, že se skutečný průtok spalin i průtok spalin vztažený na normální podmínky snižují s rostoucí koncentrací kyslíku v oxidačním činidle. Je to dáno snižující se koncentrací dusíku s rostoucí koncentrací  $\text{O}_2$ , který ve spalinách působí jako balast. Naproti tomu adiabatická teplota spalin roste se zvětšující se koncentrací kyslíku v oxidačním činidle. To je dáno tím, že při kyslíkem obohaceném spalování je dosahování vyšších teplot plamene. V reálném provozu by však teplota spalin byla nižší, jelikož by část produkovaného tepla byla odváděna do ohřívání materiálu.



Obr. 17 Graf závislosti teploty a hmotnostního průtoku spalin na koncentraci  $\text{O}_2$  v oxidačním činidle

Z tabulky 4 je možné také pozorovat, že se zvyšující se koncentrací O<sub>2</sub> roste viskozita spalin, naopak hustota spalin se však snižuje (tab. 5), což je zapříčiněno rostoucí teplotou spalin. U plynů totiž platí, že s rostoucí teplotou plynu roste jejich viskozita a klesá jejich hustota. Pokud by však v reálném provozu byla teplota spalin konstantní, s rostoucí koncentrací O<sub>2</sub> by se hustota ani viskozita téměř neměnila. Například při teplotě spalin 1800 °C a koncentraci O<sub>2</sub> v okysličovadle 95 % by byla hustota spalin 0,16 kg/m<sup>3</sup> a viskozita 7,1·10<sup>-5</sup> N·s·m<sup>-2</sup>.

Tab. 5 Výsledky simulace

Koncentrace O <sub>2</sub> [%]	Průtok spalin [m <sup>3</sup> /h]	Průtok spalin [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h]	Teplota spalin [°C]	Hustota spalin [kg/m <sup>3</sup> ]
20,842	4630,8	614,4	1799,4	0,16
25	4376,5	508,0	2095,7	0,14
30	4134,6	423,2	2413,3	0,13
35	3940,4	364,5	2699,2	0,12
40	3779,7	322,3	2951,6	0,11
45	3639,5	289,9	3178,9	0,10
50	3514,6	264,4	3382,1	0,09
55	3401,7	243,8	3563,3	0,09
60	3298,2	226,9	3724,9	0,08
65	3202,6	212,6	3869,0	0,08
70	3113,9	200,5	3997,7	0,08
75	3031,4	190,1	4112,7	0,08
80	2958,6	181,5	4210,1	0,07
85	2884,3	173,2	4305,6	0,07
90	2814,3	165,9	4392,6	0,07
95	2752,2	159,7	4466,8	0,07
99	2703,1	155,0	4523,6	0,07

## ZÁVĚR

Průmyslové spalování fosilních paliv je významným zdrojem energie. V dnešní době je však kladem důraz na zvýšení efektivity těchto procesů a zároveň snížení produkovaných škodlivých emisních látek. Jedním z možných řešení, jak toho dosáhnout, je využití kyslíkem obohacovaného spalování, v anglické terminologii nazývaného „*oxygen enhanced combustion (OEC)*“. Při tomto druhu spalování je vstupní spalovací vzduch obohacován kyslíkem nad úroveň, která je běžná v atmosférickém vzduchu, přičemž existují čtyři hlavní metody obohacování. Při první metodě je kyslík přimícháván do vstupního proudu spalovacího vzduchu ještě před jeho vstupem do hořáku. Výhodou této metody je, že na ni může být upraveno velké množství stávajících konvenčních hořáků. Druhou OEC metodou je vstřikování kyslíku přímo do plamene nebo do jiného místa ve spalovací komoře. Třetí metodou je tzv. „*oxy-fuel*“ spalování, kdy je spalovací vzduch úplně nahrazen kyslíkem. Poslední metoda je založena na odděleném přívodu kyslíku a spalovacího vzduchu do hořáku. Při této metodě se obvykle využívá vyšších koncentrací kyslíku oproti prvním dvěma metodám, což přináší větší výhody, navíc provozní náklady jsou výrazně sníženy oproti metodě nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem, při které je spotřebováno velké množství kyslíku.

Využití kyslíkem obohaceného spalování přináší výhody i nevýhody, zejména díky snížení množství dusíku (obsaženém ve spalovacím vzduchu), který vstupuje do spalovacího procesu. Dusík se na spalovací reakci přímo nepodílí a působí pouze jako balast, který přechází do spalin. Mezi hlavní benefity patří zvýšení produktivity díky tomu, že je dosahováno vyšších teplot plamene a je tak zvýšen přenos tepla radiací do ohřívajícího materiálu. Další výhodou je zvýšení tepelné účinnosti díky nižšímu obsahu dusíku ve spalovacím vzduchu, a tedy snížení celkového objemu spalin a snížení tepelných ztrát spalinami. OEC také pozitivně ovlivňuje charakteristiky plamene, tedy zvětšení rozptylu podmínek, za kterých je možné udržet plamen a také zvýšení rychlosti šíření plamene. Za určitých okolností je také možné při OEC snížit množství produkovaných  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}$  emisí. Naopak produkce emisí  $\text{CO}_2$  při OEC roste, což může vést k jejich snazšímu zachytávání po spalování. Mezi nevýhody použití OEC patří zvýšená možnost poškození vyzdívkou spalovací komory díky dosahování vyšších teplot, nerovnoměrná distribuce tepla, zvýšené riziko zpětného šlehnutí plamene či zvýšení produkce emisí znečišťujících látek za určitých okolností.

Technologie OEC je již stabilně využívána v některých průmyslových odvětvích, nejčastější využití nachází při ohřevu a tavení materiálu. Hlavními zástupci těchto odvětví jsou průmysl sklářský, kovozpracující, energetický, petrochemický a chemický průmysl. Obohacování kyslíkem je také využíváno při řezání a sváření.

Ačkoliv je kyslík sám o sobě chemicky stabilní a nehořlavý, při manipulaci a využívání kyslíku je třeba dbát na určité bezpečnostní zásady, které jsou shrnuty v samostatné kapitole.

Byl proveden bilanční simulační výpočet pomocí softwaru ChemCAD, při němž byl sledován vliv rostoucí koncentrace kyslíku v oxidačním činidle při spalování zemního plynu. Bylo zjištěno, že s rostoucí koncentrací kyslíku v oxidačním činidle také roste koncentrace  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  ve spalinách. Rostla také adiabatická teplota spalin a viskozita spalin, naopak hustota spalin klesala a rovněž klesal i celkový průtok spalin.





## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BAUKAL, Charles E., Jr. *Industrial combustion pollution and control*. New York: M. Dekker, c2004. ISBN 0-8247-4694-5
- [2] Zpráva o vývoji energetiky v oblasti tepla za rok 2016. In: Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2018/5/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2016.pdf>
- [3] Vývoj hrubé výroby elektřiny podle paliv a technologií. In: Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2017/10/Hruba-vyroba-elektriny-2010-2016.pdf>
- [4] BAUKAL, Charles E., Jr. *Oxygen-enhanced combustion*. Boca Raton: CRC Press, 1998. ISBN 0-8493-1695-2.
- [5] Zemní plyn – těžba, vlastnosti a rozdělení. Oenergetice.cz [online]. 12. dubna 2015 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/plyn/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni/>
- [6] Zemní plyn jeho druhy. Innogy [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://www.innogy.cz/o-innogy/zemni-plyn/>
- [7] Zdraví & Ekologie. Zemní plyn [online]. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.zemniplyn.cz/chci-topit.zdravi-ekologie/>
- [8] FÍK, Josef. *Zemní plyn: tabulky, diagramy, rovnice, výpočty, výpočtové pravítko*. Praha: Agentura ČSTZ, 2006, 355 s. ISBN 80-86028-22-4.
- [9] Výhřevnosti paliv. TZB-info [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv?r=26&p=2>
- [10] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [11] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
- [12] LUTTRELL, William E. Nitrogen dioxide. *Journal of Chemical Health and Safety*. 2014, 21(2), 28-30. ISSN 1871-5532.
- [13] HILL, S.C. a Douglas L. SMOOT. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000, 26(4-6), 417-485. ISSN 0360-1285.
- [14] ZELDOVICH, Yakov B. *Acta Physicochem.* SSSR, 1946, 21, 557.
- [15] FENIMORE, C. P. Reactions of fuel-nitrogen in rich flame gases. *Combustion and Flame*. 1976, 26, 249-256. ISSN 0010-2180.

- [16] DE SOETE, G. G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen. In: *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1975, s. 1093-1102. ISSN 0082-0784.
- [17] LONGE, Jacqueline L. *How Products Are Made, Vol. 4*. Gale Research Incorporated, 1999. ISBN 0-7876-2443-8.
- [18] WU, Kuo-Kuang et al. High-efficiency combustion of natural gas with 21–30% oxygen-enriched air. *Fuel*. 2010, 89(9), 2455-2462. ISSN 0016-2361.
- [19] MERLO, Nazim et al. Combustion characteristics of methane–oxygen enhanced air turbulent non-premixed swirling flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014, 56, 53-60. ISSN 0894-1777.
- [20] HAGIHARA, Yoshiyuki et al. Ultra-Low NO<sub>x</sub> Oxygen-enriched Combustion System using Oscillation Combustion Method. *Energy Procedia*. 2017, 120, 189-196. ISSN 1876-196.
- [21] CHO, E.-S. et al. Configuration effects of natural gas fired multi-pair regenerative burners in a flameless oxidation furnace on efficiency and emissions. *Applied Energy*. 2013, 107, 25-32. ISSN 0306-2619.
- [22] BĚLOHRADSKÝ, Petr, Pavel SKRYJA a Igor HUDÁK. Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics. *Energy*. 2014, 75, 116-126. ISSN 0360-5442.
- [23] HARRIS, Margaret E. et al. Burning velocities, quenching, and stability data on nonturbulent flames of methane and propane with oxygen and nitrogen: Application of theory of ignition, quenching, and stabilization to flames of propane and air. *Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena*. 1948, 3(1), 80-89. ISSN 2869.
- [24] R., Abernathy, McElroy J. a Yap L. T. The performance of current oxy-fuel combustion technology for secondary aluminum melting. In: *Annual meeting and exhibition of the Minerals, Metals and Materials Society (TMS)*. USA, 1996. ISBN 0-87339-312-0.
- [25] JAMES H., Gill a Quiel JOHN M. *Incineration of Hazardous, Toxic, and Mixed Wastes*. Cleveland: North American Manufacturing Company, 1993. ISBN 0-9601596-4-9.
- [26] First smart burner for the glass industry. *Air Products* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.airproducts.com/~media/downloads/article/F/en-first-smart-burner-for-the-glass-industry.pdf?productType=Equipment&productLevel1=Gas-Handling-Equipment&productLevel2=Burners&productLevel3=Cleanfire-HRe-Burners>

- [27] GARDARSDÓTTIR, Stefanía Ósk, Fredrik NORMANN, Klas ANDERSSON a Filip JOHNSON. Postcombustion CO<sub>2</sub> capture using monoethanolamine and ammonia solvents: The influence of CO<sub>2</sub> concentration on technical performance. *Industrial and Engineering Chemistry Research* [online]. American Chemical Society, 2015, 54(2), 681-690. DOI: 10.1021/ie503852m. ISSN 08885885.
- [28] Spalování s obohacením kyslíkem. *Air Products* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/Industries/GlassMinerals/Non-metallic-Mineral-Product-Manufacturing/product-list/oxygen-enhanced-combustion-non-metallic-mineral-product-manufacturing.aspx?itemId=9F9E84FC53A54E1C8CD3B2FD92F3BEC2>
- [29] Kyslíko-palivové technologie. *Air Products* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/industries/GlassMinerals/Oxy-Fuel-Techniques.aspx>
- [30] Hot oxycombustion furnace design. *AGC Glass Europe* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.agc-glass.eu/en/sustainability/production-process-and-technologies/hot-oxycombustion-furnace-design>
- [31] Linde launches innovative glass melting technology to reduce NO<sub>x</sub> emissions. *Linde Engineering* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [https://www.linde-engineering.com/de/news\\_and\\_media/press\\_releases/news\\_121022.html](https://www.linde-engineering.com/de/news_and_media/press_releases/news_121022.html)
- [32] Air Products Implements First-Ever Integrated Oxy-fuel Combustion System for Water Glass Producer in Asia. *Glasstec* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [https://www.glasstec-online.com/cgi-bin/md\\_glasstec/lib/pub/tt.cgi/Air\\_Products\\_Implements\\_First-Ever\\_Integrated\\_Oxy-fuel\\_Combustion\\_System\\_for\\_Water\\_Glass\\_Producer\\_in\\_Asia.html?oid=12498&lang=2&ticket=g\\_u\\_e\\_s\\_t](https://www.glasstec-online.com/cgi-bin/md_glasstec/lib/pub/tt.cgi/Air_Products_Implements_First-Ever_Integrated_Oxy-fuel_Combustion_System_for_Water_Glass_Producer_in_Asia.html?oid=12498&lang=2&ticket=g_u_e_s_t)
- [33] JEPSON, Stewart a Peter VAN KAMPEN. Oxygen-Enhanced Combustion Provides Advantages in Al-Melting Furnaces. *Industrial Heating* [online]. 2005, 72(6), 29-35. ISSN 0019-8374.
- [34] WANG, Chuan et al. Application of oxygen enrichment in hot stoves and its potential influences on the energy system at an integrated steel plant. In: *World Renewable Energy Congress 2011*. Linköping, Sweden, 2011.
- [35] Oxygen-enhanced combustion for metal production. *Praxair* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.praxair.com/industries/metal-production/oxygen-enhanced-combustion>
- [36] Oxygen-Enhanced Combustion for Chemicals. *Praxair* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.praxair.com/industries/chemicals/oxygen-enhanced-combustion>
- [37] MARIN, Ovidiu et al. Low-oxygen enrichment in coal-fired utility boilers. In: *The 28th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*. Clearwater, FL, 2003.
- [38] Oxygen-Enhanced Combustion for Energy. *Praxair* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.praxair.com/industries/energy/oxygen-enhanced-combustion>

- [39] Welding & cutting gases. Messer Gases for Life [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.messergroup.com/welding-gases>
- [40] WEMAN, Klas. Welding Processes Handbook. Second edition. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 9780857095107.
- [41] Cutting Processes. Praxair [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.praxair.com/industries/welding-and-metal-fabrication/cutting-processes>
- [42] BEESON, Harold D., Sarah R. SMITH a Walter F. STEWARD. *Safe Use of Oxygen and Oxygen Systems: Handbook for Design, Operation, and Maintenance*. 2nd Edition. West Conshohocken, PA: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007. ISBN 978-0-8031-4470-5.
- [43] SVOBODA, Alexandr. Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě. Praha: GAS, 1997. ISBN 80-902339-6-1.
- [44] Meteorologická mapa - meteostanice Brno. Meteo počasí a vlastní meteostanice [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.meteo-pocasi.cz/maps/cz/jihomoravsky/995-meteostanice-brno/>
- [45] Konstanty Antoineovy rovnice. Ústav fyzikální chemie VŠCHT Praha [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/tab/antoine.html>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$A$	[-]	konstanta Antoineovy rovnice
$A_s$	[m <sup>2</sup> ]	plocha přestupu tepla
$B$	[-]	konstanta Antoineovy rovnice
$C$	[-]	konstanta Antoineovy rovnice
$C_i$	[obj. %]	koncentrace hořlavé složky $i$
$dT$	[K]	rozdíl teplot mezi dvěma místy
$dx$	[m]	vzdálenost mezi dvěma místy
$g$	[s <sup>-1</sup> ]	rychlostní gradient
$k$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	tepelná vodivost
$L_D$	[obj. %]	je dolní mez zápalnosti plynu
$L_H$	[obj. %]	je horní mez zápalnosti plynu
$L_{iD}$	[obj. %]	hodnota dolní meze zápalnosti pro složku $i$
$L_{iH}$	[obj. %]	hodnota horní meze zápalnosti pro složku $i$
$LHV_{ZP}$	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	výhřevnost zemního plynu
$n$	[obj. %]	součet koncentrací nehořlavých složek plynu
$p$	[kPa]	tlak
$p_{atm}$	[kPa]	atmosférický tlak vzduchu
$p^0$	[kPa]	parciální tlak sytých par
$p_{H_2O}^0$	[kPa]	parciální tlak syté vodní páry
$P_{O_2}$	[kPa]	tlak kyslíku
$P_{hoř}$	[kW]	výkon hořáku
$p_{H_2O}$	[kPa]	parciální tlak vodní páry
$\dot{Q}$	[W]	tepelný tok
$\dot{q}$	[W·m <sup>-2</sup> ]	hustota tepelného toku
$R$	[m]	poloměr potrubí
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha povrchu
$t$	[°C]	teplota
$T$	[K]	teplota povrchu
$t_{atm}$	[°C]	teplota vzduchu
$t_{O_2}$	[°C]	teplota kyslíku
$T_w$	[K]	teplota povrchu tělesa
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok směsi paliva a oxidačního činidla

---

$\dot{V}_{ZP}$	$[\text{m}_N^3/\text{h}]$	objemový průtok zemního plynu
$x_{H_2O}$	$[\%]$	objemová koncentrace vody ve vzduchu
$x_i$	$[\%]$	objemový zlomek složky $i$
$\alpha_t$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
$\varepsilon$	$[-]$	emisivita (poměrná zářivost)
$\lambda$	$[-]$	součinitel přebytku vzduchu
$\varphi$	$[\%]$	relativní vlhkost vzduchu
$\Omega$	$[-]$	podíl kyslíku v oxidačním činidle

**SEZNAM POUŽITÝCH CHEMICKÝCH VZORCŮ**

Ar	argon
CN	kyanidový aniont
CO	oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
CH <sub>4</sub>	metan
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	etan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	propan
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	butan
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	pentan
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	uhlovodíky
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
H	radikál vodíku
H <sub>2</sub> O	voda
HCN	kyanovodík
N	radikál dusíku
N <sub>2</sub>	molekulární dusík
NH <sub>3</sub>	amoniak
NO	oxid dusnatý
NO <sub>2</sub>	oxid dusičitý
NO <sub>x</sub>	oxidy dusíku
O	radikál kyslíku
O <sub>2</sub>	molekulární kyslík
OH	hydroxylový radikál
SO <sub>x</sub>	oxidy síry





## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Poměrné zastoupení zdrojů pro výrobu tepla a elektřiny v České republice v roce 2016 [2, 3] .....	15
Obr. 2 Schéma hořáku s obohacováním spalovacího vzduchu kyslíkem [4] .....	24
Obr. 3 Množství emisí $\text{NO}_x$ a CO v závislosti na podílu $\text{O}_2$ ve spalovacím vzduchu [18] .....	25
Obr. 4 Množství emisí $\text{CO}_2$ a maximální teplota v závislosti na podílu $\text{O}_2$ ve spalovacím vzduchu [18] .....	25
Obr. 5 Závislost ztrát tepla spalinami, teploty plamene, $\text{NO}_x$ emisí na koncentraci kyslíku v oxidačním činidle [20] .....	26
Obr. 6 Závislost míry úspory paliva na koncentraci kyslíku v oxidačním činidle a teplotě spalin [20] .....	26
Obr. 7 Princip „Innova-Jet“ (závislost rovnovážné koncentrace NO na koncentraci kyslíku) [20] .....	27
Obr. 8 Porovnání konvenční metody a „Innova-Jet“ (závislost koncentrace $\text{O}_2$ , kyslíkového poměru a koncentrace NO na čase) [20] .....	27
Obr. 9 Emise $\text{NO}_x$ v závislosti na teplotě pece při stabilním spalování a při Innova-Jet metodě [20] .....	28
Obr. 10 Schéma hořáku se vstřikováním kyslíku do plamene [4] .....	29
Obr. 11 Schéma hořáku s nahrazením spalovacího vzduchu kyslíkem [4] .....	29
Obr. 12 Schéma hořáku s odděleným přívodem kyslíku a spalovacího vzduchu [4] .....	30
Obr. 13 Spalovací trojúhelník [4] .....	37
Obr. 14 Meze zápalnosti metanu ve vzduchu/kyslíku v závislosti na obohacení kyslíkem [4] .....	39
Obr. 15 Schéma spalovacího obvodu .....	45
Obr. 16 Graf závislosti koncentrace $\text{CO}_2$ a $\text{H}_2\text{O}$ ve spalinách na koncentraci $\text{O}_2$ v oxidačním činidle .....	47
Obr. 17 Graf závislosti teploty a hmotnostního průtoku spalin na koncentraci $\text{O}_2$ v oxidačním činidle .....	47



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Složení vybraných zemních plynů používaných v EU [8].....	18
Tab. 2 Hodnoty naměřené meteostanicí .....	43
Tab. 3 Složení suchého a vlhkého vzduchu [10].....	44
Tab. 4 Výsledky simulace .....	46
Tab. 5 Výsledky simulace .....	48