



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

VLIV INERTNÍCH PLYNŮ NA CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY SPALOVÁNÍ

INFLUENCE OF INERT GASES ON CHARACTERISTIC PARAMETERS OF COMBUSTION
PROCESS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Igor Hudák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

BRNO 2017

Abstrakt

Dizertační práce se zabývá výzkumem vlivu inertních plynů obsažených v alternativních plynných palivech na parametry spalovacího procesu. Mezi tato paliva patří například generátorový plyn, koksárenský plyn anebo bioplyn. Jejich energetický potenciál zůstával dlouhou dobu nevyužit, protože se z části jednalo o odpadní plyny. V porovnání s ušlechtilým palivem jako je zemní plyn se tyto plyny vyznačují rozdílnými fyzikálně-chemickými vlastnostmi, zejména nižší výhřevností. Na základě podmínek, které panovaly při jejich vzniku, se jejich složení může v průběhu produkce měnit. Nižší výhřevnost je dána především přítomností inertních plynů, které se přímo nezúčastňují spalování, a teplo spíše odebírají. Za určitých podmínek je tento typ paliva možné spalovat na standardních typech hořáků, ale i tak jejich provoz nemusí být zdaleka bezproblémový. Pro dosažení požadovaného výkonu jako s ušlechtilými palivy je nutné hořákem protlačit mnohem větší množství nízko-výhřevného paliva, což geometrie hořáku nemusí umožnit.

Po nezbytném teoretickém úvodu, kde je zhodnocena současná situace v oblasti výzkumu plynných nízko-výhřevných paliv a přidávání inertních plynů do ušlechtilého paliva se práce věnuje problematice tvorby emisí oxidu dusíku (NO_x) a shrnuje technologické postupy aplikovatelné na procesních hořácích pro potlačení jejich tvorby. Dále jsou kategorizována paliva z různých alternativních zdrojů, včetně popisu jejich složení a jejich vlastností. V souvislosti s těmito palivy byla vytvořena simulace spalování v bilančním software a byl proveden výpočet fyzikálně-chemických vlastností. Součástí práce je návrh a konstrukce dvou zařízení. Jedním z nich je experimentální směšovací stanice pro přípravu nízko-výhřevných paliv umožňující připravit palivo ze 4 různých plynů. Druhým produktem je hořák na nízko-výhřevná paliva.

Nedílnou součástí práce je popis přípravy a vyhodnocení experimentálního měření. V průběhu experimentu byly do zemního plynu postupně přimíchány oxid uhličitý a dusík. Tyto plyny dokázaly snížit výhřevnost paliva až na hodnotu $10,7 \text{ MJ/m}_N^3$. Postupně byl vyhodnocen vliv inertních plynů na emise NO_x , stabilitu a charakteristické vlastnosti plamene, teplotu spalin, teploty v plamenu v horizontální rovině spalovací komory a v neposlední řadě také na tepelné toky do stěny spalovací komory a termickou účinnost. Všechny zmíněné parametry byly postupně vyhodnoceny na třech typech hořáků: hořák se stupňovitým přívodem paliva, hořák se stupňovitým přívodem spalovacího vzduchu a speciálně navržený hořák na nízko-výhřevná paliva. Obecný trend byl takový, že po přidání inertního plynu do paliva dochází ke snížení teplot v plamenu a v důsledku toho i ke snížení koncentrace emisí NO_x ve spalinách. Největšího snížení NO_x bylo dosaženo po přidání oxidu uhličitého, přidávání dusíku mělo efekt méně výrazný. Ve velké míře však také záleží na konstrukci hořáku. Ve většině případů došlo po přidání inertního plynu do paliva ke zkrácení plamene, s čímž korespondovaly také zjištěné hodnoty tepelných toků, kdy více tepla z horkých spalin bylo do stěn komory přeneseno blíže k hořáku.

Klíčová slova:

spalování, nízko-výhřevná paliva, chudá paliva, alternativní paliva, inertní plyny, vlastnosti plamene

Abstract

The dissertation thesis is focused on the investigation of the influence of inert gases on characteristic parameters of the combustion process. Inert gases are usually standard components of alternative gaseous fuels such as the producer gas, coal gas or biogas. For a long period some of the fuels were considered as waste gases and their potential was not sufficiently utilised. Compared with noble fuels such as natural gas, alternative fuels have different physical-chemical properties. For example, their lower heating value (LHV) can be lower even than 10 MJ/m_N^3 . The composition of the alternative gaseous fuels can be various during their production process. Lower LHV is a result of the occurrence of inert gases that does not take a part in the combustion reactions. Inert gases have the ability to accumulate the heat. Under certain conditions it is possible to combust alternative fuels on conventional burners, but due to their different properties, problems can occur during the combustion. E.g. to achieve the same heat output as with the noble fuel, it is necessary to burn bigger volume of the alternative fuel. However, the limiting factor could be the burner's head geometry.

Theoretical introduction of the thesis summarizes research results in the field of low calorific gaseous fuels combustion and the addition of inert gases into the noble fuels. The thesis also describes the mechanisms of the NO_x formation and summarizes techniques which can be used to reduce NO_x formation. Furthermore, fuels from alternative sources are categorized and described, including their composition and characteristics. Their physical-chemical properties were obtained by means of the combustion simulation carried out in the simulation software. Two devices had to be designed and manufactured to fulfil goals of the dissertation thesis. The first is a gas mixing station capable of mixing 4 different components. The second device is a burner utilized for the combustion of low calorific fuels.

The key section of this thesis is a chapter describing the experimental plan, the performance and the evaluation of the experiments. The goal of the experiments was to dilute the natural gas by two inert gases, namely carbon dioxide and nitrogen. The lowest LHV value achieved during the experiment was 10.7 MJ/m_N^3 . The influence of the inert gases on the NO_x emissions, the flame stability and characteristics, the flue gas temperature, the in-flame temperatures, the heat flux and the thermal efficiency was investigated and evaluated. Each parameter was measured and evaluated for three different burners: the burner with the staged gas, the burner with the staged air and the burner for low calorific fuels. Generally, after the addition of the inert gas into the noble fuel, the in-flame temperatures decreased. As a consequence, the NO_x emissions decreased as well. The effects of carbon dioxide on the investigated combustion parameters were more substantial than the effects of nitrogen. Each measured parameter is strongly dependent on the burner geometry. The experiments revealed that in most cases the addition of the inert gas into the fuel influenced the flame length (flame shortened) and also more heat was transferred into the chamber's walls closer to the burner tile.

Key words:

combustion, low-calorific fuels, lean fuels, alternative fuels, inert gases, flame characteristics

Bibliografická citace

HUDÁK, I. *Vliv inertních plynů na charakteristické parametry spalování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 134 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi ochotně pomáhali a svými radami a zkušenostmi mi umožnili práci dokončit. Mé díky patří zejména mému školiteli doc. Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D. a odbornému školiteli Ing. Petru Bělohradskému, Ph.D. a kolegům z Ústavu procesního inženýrství.

V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům, sourozencům a manželce za trpělivost a neutuchající podporu, bez jejichž náklonosti by tato práce nevznikla.

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Hájka, Ph.D., na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně 24. 04. 2017

.....

Ing. Igor Hudák

Obsah

1.	Úvod.....	11
1.1	Náplň a cíle práce.....	12
1.2	Současný stav poznání	13
2	Tvorba a metody snižování oxidů dusíku.....	17
2.1	Mechanismy tvorby NO.....	18
2.1.1	Termické NO	19
2.1.2	Promptní NO.....	21
2.1.3	Palivové NO.....	21
2.1.4	Přepočet ppm na mg/m_N^3	22
2.1.5	Vliv složení paliva na NO_x	22
2.2	Emisní limity	23
3	Přenos tepla	25
3.1	Kondukce	25
3.2	Konvekce.....	25
3.3	Radiace	26
4	Princip měření teploty pomocí termočlánků	27
4.1	Referenční palivo – zemní plyn	30
4.2	Výrobní proces zemního plynu	30
4.3	Extrakce.....	30
4.4	Zpracování.....	30
4.5	Přeprava.....	31
5	Nízko-výhřevné plyny	33
5.1	Bioplyn	34
5.1.1	Výroba bioplynu	35
5.1.2	Úprava bioplynu	36
5.1.3	Odstranění vody a vodních par	36
5.1.4	Odsíření.....	36
5.1.5	Skladování	36
5.2	Koksárenský plyn.....	37
5.2.1	Produkce koksárenského plynu	37
5.3	Vodní plyn.....	38
5.4	Vysokopecní plyn.....	38
5.5	Generátorový plyn.....	39

5.6	Konvertorový plyn	40
5.7	Feroslitinový plyn	41
6	Simulace	42
6.1	Vybraná paliva	43
6.2	Vyhodnocení simulace	44
7	Vlastnosti technických plynů	47
7.1	Oxid uhličitý.....	47
7.1.1	Fyzikální a chemické vlastnosti	48
7.1.2	Bezpečnost a přeprava	49
7.2	Dusík	49
7.2.1	Fyzikální a chemické vlastnosti	50
7.2.2	Bezpečnost a přeprava	50
7.3	Vodík.....	51
7.3.1	Fyzikální a chemické vlastnosti	52
7.3.2	Bezpečnost a přeprava	53
8	Konstrukce směšovací stanice	54
8.1	Prvotní návrh.....	54
8.2	Finální řešení směšovací stanice	55
8.3	Výpočet tloušťky stěny potrubí.....	56
8.4	Pilotní zkoušky	58
9	Rovnice pro výpočet hořáku.....	59
9.1	Globální reakce spalování	59
9.2	Stechiometrický (směšovací) poměr	60
9.3	Vstupní data.....	60
9.4	Výhřevnost paliva	60
9.5	Spalné teplo paliva	61
9.6	Celkový spalovací výkon	61
9.7	Hustota paliva.....	61
9.8	Meze zápalnosti.....	61
9.8.1	Dolní mez zápalnosti	62
9.8.2	Horní mez zápalnosti	62
9.9	Wobbeho index	62
9.10	Adiabatická konstanta.....	63
9.11	Kritický poměr tlaků plynu	63

9.12	Ekvivalentní průměr trysky	63
9.12.1	Přetlak do 10 kPa.....	64
9.12.2	Přetlak vyšší než 10 kPa.....	64
9.13	Průměr jednoho otvoru v primární hlavě.....	65
10	Návrh hořáku	66
10.1	Zadávací parametry	66
10.2	Návrh hořáku a výpočet.....	68
11	Experimentální část.....	71
11.1	Zkušebna hořáků	71
11.2	Hořáky	73
11.2.1	Hořák ZPH	73
11.2.2	Hořák APH.....	74
11.2.3	Hořák LPH	75
11.3	Plán měření	75
11.3.1	Měření složení a teploty spalin.....	75
11.3.2	Měření teplot v plamenu	76
11.3.3	Měření tepelných toků.....	77
11.4	Výsledky měření – hořák ZPH	80
11.4.1	Emise a stabilita plamene	80
11.4.2	Teploty v plamenu.....	83
11.4.3	Tepelné toky a termická účinnost.....	86
11.4.4	Test stability	87
11.5	Výsledky měření hořák – hořák APH	87
11.5.1	Emise a stabilita plamene	88
11.5.2	Teploty v plamenu.....	90
11.5.3	Tepelné toky a termická účinnost.....	93
11.5.4	Test stability	97
11.6	Výsledky měření hořák – hořák LPH.....	97
11.6.1	Emise a stabilita plamene	97
11.6.2	Teploty v plamenu.....	99
11.6.3	Tepelné toky a termická účinnost.....	102
11.6.4	Test stability	104
11.7	Porovnání jednotlivých typů hořáků	104
11.7.1	Emise a stabilita plamene	104

11.7.2	Teploty v plamenu.....	106
11.7.3	Tepelné toky a termická účinnost.....	108
11.8	Vlastnosti a skutečné složení paliv.....	108
12	Závěr	112
	Seznam obrázků.....	114
	Seznam tabulek	116
	Obsah DVD.....	117
	Seznam použitých zdrojů.....	118
	Seznam symbolů	127
	Seznam zkratk	129
	Chemické sloučeniny	130
	Publikace autora.....	131
	Patenty	132
	Přílohy – Technická dokumentace.....	133

1. Úvod

Množství skleníkových plynů a jiných škodlivých látek v atmosféře dlouhodobě roste a tento trend bude podle všech indicií pokračovat i nadále. Mnoho neziskových organizací se spolu s vědeckými pracovníky touto problematikou zabývá, ve snaze alespoň snížit narůstající množství emisí a spotřebu fosilních paliv, které si vědecko-průmyslová evoluce žádá. Existuje řada postupů a principů, jak lze produkci emisí z velkých stacionárních zdrojů, jako jsou spalovny, teplárny nebo další odvětví těžkého průmyslu, potlačit. Velmi často se používá čištění spalin pomocí různých filtrů, které mohou účinně zachytit většinu škodlivých látek, jako jsou oxidy síry, dusíku nebo dioxiny. Tato metoda není však jediným možným řešením. Spalování plyných nebo kapalných paliv lze modifikovat tak, aby byly hořáky provozovány v režimech, které zaručí vysokou efektivitu spalování a které jsou příznivé pro redukci emisí, zejména oxidů dusíku (NO_x). Vznik oxidů dusíku je komplexní proces, který závisí na více proměnných. Nejúčinnější metodou jak snížit jejich produkci je optimalizovat rozložení teplotního pole ve spalovací komoře. Toho může být docíleno například stupňovitým přívodem vzduchu nebo paliva, recirkulací spalin nebo bezplamenným spalováním. Další využití energie, získané spalováním, je možné pomocí recirkulace tepla, rekuperátoru nebo regenerační jednotky. Zlepšení lze také dosáhnout za předpokladu, že jsou použita nízko-výhřevná paliva, jež vznikla jako vedlejší produkty v petrochemickém průmyslu, na skládkách nebo při pyrolýze.

Mezi nízko-výhřevná plyná paliva lze zařadit bioplyny, koksárenské plyny, generátorové plyny, vysokopecní plyny nebo konvertorové plyny. Pro nízko-výhřevná paliva je typické, že mají proměnlivé složení podle toho, z jakého zdroje pocházejí. Velký obsah inertních plynů obsažených v těchto palivech může z pohledu provozu hořáku vyvolat nestabilní podmínky. Běžně používané hořáky jsou většinou navrženy pro jeden typ paliva s určitými vlastnostmi a není pravidlem, že hořák navrženy pro spalování středně či vysoce výhřevných paliv, dokáže spalovat paliva nízko-výhřevná. Na druhé straně, je to právě zvýšený podíl inertních složek (dusík, oxid uhličitý nebo pára), jenž má pozitivní vliv na redukci oxidů dusíku (NO_x). Proměnlivá je u těchto typů paliva, kromě složení, také výhřevnost, která se může pohybovat v rozmezí 4 – 20 MJ/m³ (zdroje se v klasifikaci nízko-výhřevných paliv rozcházejí). Nízko-výhřevné plyny jsou často vedlejším produktem určitého procesu a v porovnání se zemním plynem může jejich použití přinést úsporu nákladů. Mezi hořlavé složky nízko-výhřevných paliv se nejčastěji řadí vodík, oxid uhelnatý anebo metan. Aby bylo dosaženo stejného výkonu v porovnání se zemním plynem, je zapotřebí stávajícím potrubím a tryskami hořáku dodat větší množství plynu. Nevýhodou těchto plynů tedy může být jejich nižší tlak, který nemusí být dostatečný pro okamžité použití v hořáku.

Do kategorie nízko-výhřevných paliv jsou zařazovány také paliva z alternativních (obnovitelných) zdrojů. Zejména v České republice se díky různým dotačním pobídkám vybuďovala síť bioplynových stanic zpracovávající biomasu za vzniku bioplynu, který se svou výhřevností řadí do kategorie zkoumaných paliv. Dalšími z paliv z obnovitelných zdrojů jsou plyny vzniklé zplyňováním biomasy. Při jejich spalování dochází, podobně jako u fosilních paliv, ke konverzi uhlíku na oxid uhličitý. Nicméně výsledná bilance je v tomto

případě příznivější, protože se jedná o uhlík, který rostliny během svého vegetačního období dokázaly absorbovat.

1.1 Náplň a cíle práce

Dizertační práce částečně navazuje na autorovu diplomovou práci [1], ve které se zabýval experimentálním spalováním plyných paliv se zvýšeným podílem kyslíku ve vzduchu. Z měření vyplynulo, že v závislosti na použité metodě je možné pomocí kyslíkem obohaceného spalování docílit nižší produkce oxidů dusíku, zejména při vstřikování kyslíku do plamene nebo při úplném nahrazení spalovacího vzduchu kyslíkem. Také paliva obsahující inertní plyny mohou mít za určitých podmínek pozitivní vliv na emise oxidů dusíku. Výsledky získané v rámci této práce byly následně prezentovány v impaktovaném časopise Energy [2]. V návaznosti na toto úspěšné měření byla zaměřena pozornost na výzkum v oblasti nízko-výhřevných paliv.

Hlavním cílem dizertační práce bylo jednotlivé typy paliva porovnat a vyhodnotit vliv inertních plynů na stanovené parametry. Zejména na problematiku vlivu inertních plynů (oxid uhličitý a dusík) v palivu na tvorbu emisí oxidů dusíku a oxidu uhličitého, distribuci teplot v plamenu, teplotu spalin, tepelné toky do stěn komory, efektivitu spalování, stabilitu plamene a také na změnu jeho tvaru a rozměrů. Experimentální část měla být původně soustředěna výhradně na zkoušky na konvenčních typech hořáků, avšak po první sekvenci spalovacích zkoušek bylo nutné tento cíl upravit.

Pro zpracování práce bylo nutné rozčlenit zkoumanou oblast na dílčí celky, aby bylo možné vyřešit jednotlivé průběžné úkoly. Těchto kroků bylo dosaženo pomocí analytického rozboru, což pomohlo oddělit podstatné informace od informací méně důležitých. Po rozpracování jednotlivých bodů a zjištění podstaty zkoumané oblasti bylo přistoupeno k vybudování experimentálního zařízení pro přípravu nízko-výhřevných paliv. Funkčnost navrženého zařízení ověřila série empirických experimentálních zkoušek, během nichž se projeví omezené možnosti využití konvenčních hořáků pro spalování alternativních paliv s nízkou výhřevností. Získaná data se ukázala jako nedostatečná, proto bylo nutné provést analýzu v oblasti konstrukce a návrhu hořáků a získat další poznatky, které mohly být využity pro návrh hořákové vestavby speciálně navržené pro spalování nízko-výhřevných paliv. Po získání dostatečného množství dat bylo přistoupeno k syntéze získaných poznatků a experimentální data byla následně vyhodnocena.

Pro splnění hlavních cílů práce byly stanoveny dílčí úkoly:

- Analýza současného stavu poznání v oblasti spalování nízko-výhřevných paliv a paliv s příměsí inertních plynů (Kapitoly 2, 3, 4, 5 a 7).
 - Rešerše současného stavu poznání.
 - Rešerše v oblasti vlivu provozních a konstrukčních parametrů na tvorbu oxidů dusíku.
 - Rešerše v oblasti využívaných nízko-výhřevných plynů v procesním průmyslu a jejich původu.
 - Analýza metod přenosu tepla ve spalovací komoře.
 - Analýza možností měření teplot v plamenu.
 - Rešerše v oblasti manipulace a nakládání s technickými plyny.
- Vytvoření simulačního modelu v programu CHEMCAD pro vybraná nízko-výhřevná paliva (Kapitola 6).
 - Vytvoření výpočtového modelu.
 - Vytvoření souhrnného souboru dat vypočítaných pomocí simulačního software.
 - Vyhodnocení vypočtených dat a porovnání vlastností nízko-výhřevných plynů s referenčním palivem.
- Návrh a konstrukce směšovací stanice pro přípravu nízko-výhřevných paliv (Kapitola 8).
 - Vytvoření modelu a výkresové dokumentace směšovací stanice.
 - Konstrukce směšovací stanice.
 - Provedení pilotních testů a ověření funkčnosti směšovací stanice.
- Návrh, výpočet a konstrukce hořáku na nízko-výhřevná paliva. (Kapitoly 9 a 10)
 - Vytvoření výkresové dokumentace.
 - Ověření funkčnosti zařízení a následné provedení série empirických experimentálních měření.
- Provedení a vyhodnocení experimentálních testů a měření (Kapitola 11).
 - Experimentální spalování vybraných nízko-výhřevných paliv.
 - Proměření a vyhodnocení možné závislosti mezi postupným přidáváním inertního plynu do ušlechtilého paliva a emisemi NO_x , teplotami v plamenu a tepelnými toky.
 - Vytvoření souhrnného souboru dat z naměřených hodnot.
 - Vyhodnocení vlivu změny jednotlivých provozních parametrů a porovnání všech nízko-výhřevných paliv – syntéza.

1.2 Současný stav poznání

Výzkumu nízko-výhřevných paliv byla v průběhu uplynulých dvaceti let věnována značná pozornost. Výzkumná činnost byla zejména zaměřena na porovnání plynů s různým složením. Většina těchto studií však byla pouze numerická nebo byla provedena pouze na laboratorním zařízení. I přesto, že se řada studií zabývala tvorbou NO_x , vliv inertních plynů na tepelnou účinnost spalování a stabilitu plamene nebyl analyzován.

Závislostí mezi množstvím inertních plynů v palivu a provozními parametry se zabývalo několik vědeckých týmů, například Li a kol. [3] provedli srovnání měření a výpočtového modelu pro protiproudý hořák na zemní plyn s ohledem na tvorbu NO_x . Pro zředění ušlechtilého paliva použili dusík, oxid uhličitý, argon a také vodní páru, kterou přidávali do proudu spalovacího vzduchu. Z jejich výzkumu vyplývá, že nejúčinnějším prvkem se ukázala být vodní pára, protože disponuje velkou tepelnou kapacitou a mohla tak absorbovat značné množství tepla vzniklého spalováním, což vedlo ke snížení teploty plamene. Snížením teploty v plamenu byl potlačen mechanismus termických oxidů dusíku. Efekt ostatních plynů byl podobný, nicméně pokles nebyl tak razantní: $\text{H}_2\text{O} > \text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{Ar}$. S využitím modelu protiproudého hořáku numericky simuloval reakci metanu a vzduchu s vodní parou i vědecký tým shromážděný kolem Zhaa [4]. Při aplikaci páry během spalování metanu došlo ke změně chování OH radikálů. S přidáním páry dochází k poklesu jejich koncentrace, což spolu s poklesem koncentrace CH radikálů vedlo k potlačení reakce, která se podílí na vzniku promptních NO_x . V důsledku snížení teplot v plamenu došlo i k následnému snížení tvorby termických NO_x , což potvrzuje předešlé výsledky, kterých dosáhli Li a kol. Vodní pára, vodní mlha, dusík, tetrafluormetan (CF_4) a bromotriflorometan (CF_3Br) byly vybrány pro posouzení vlivu těchto sloučenin na rychlost hoření a zhasnutí plamene reakční směsi metan/vzduch [5]. Zkoušky odhalily, že pro potlačení rychlosti hoření je vodní mlha asi 3,5x efektivnější než N_2 nebo CF_4 . Vodní mlha je také asi 2x účinnější než vodní pára. Současně ze simulace vyplynulo, že menší kapky vody mají na redukci rychlosti hoření výrazně vyšší vliv než kapky velké. Mezi výpočtovým modelem a experimentem nebyly zjištěny žádné velké rozdíly. Rychlostí hoření předmíchaných směsí $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ a $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ se také numericky zabývala vědeckovýzkumná skupina pod vedením Liu [6]. Vědci ověřili předpoklady chování CO_2 , který sice v systému vystupuje jako inert, nicméně se může zapojit do reakce s vodíkem a tím tak ovlivnit chemickou rovnováhu hoření.

Metan byl vybrán jako palivo také pro experimenty s předmísenou hořlavou směsí [7]. Série testů proběhla při vysokých tlacích a teplotách paliva, na zařízení označovaném jako HiTAC. Palivo zde bylo zředěno přehřátou vodní parou. Získaná data byla pak následně porovnána s předchozím výzkumem, který se zabýval přidáváním CO_2 do plamene [8]. Opět bylo potvrzeno, že přidání vody/vodní páry do plamene je mnohem účinnější, než pouhé přidání inertního plynu. Přidávání CO_2 při vysokém tlaku bylo vypracováno Cohem a kol. [9]. Výzkum byl zaměřen na poznání problematiky z hlediska rychlosti šíření hoření a hustoty povrchu plamene. Pomocí tomografie rozptylu bylo zjištěno, že s přidáním CO_2 dochází u turbulentního plamene ke změně jeho délky. Samotné přidání CO_2 však nemá vliv na povrchovou hustotu plamene. Výzkum zahrnoval také pozorování vlivu změny vstupního tlaku paliva, přičemž bylo zjištěno, že vyšší tlak znamená vyšší rychlosti v plamenu a zároveň vyšší fluktuace hodnot hustoty. Mitu a kol. [10] zkoumali vliv inertních plynů na deflagraci směsi metanu a vzduchu. Z jejich výzkumu vyplývá, že přítomnost inertních plynů ve směsi má značný vliv na rychlost šíření. Deflagraci nejvíce potlačil CO_2 , následovaný N_2 , Ar a He.

Zemní plyn posloužil jako palivo při výzkumu Salvadora a kol. [11]. Tým se zaměřil na přidání dusíku a vzduchu přímo do paliva a vyhodnocoval změnu z hlediska chování NO_x .

Pro praktickou část výzkumu použili spalovací komoru umožňující použití hořáku o výkonu 75 kW. Ukázalo se, že po přidání vzduchu do paliva klesly NO_x o 30 %, u inertního dusíku byl pokles ještě větší a to o 60 %.

Syntetickým plynem (směs $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CH}_4$) se numericky zabývala skupina pod vedením Gilese [12]. Do plamene byly postupně přimíchány N_2 , H_2O a CO_2 . Cílem bylo numericky ověřit vliv inertních plynů na emise a zmapovat přesnou distribuci NO_x v plamenu. Do kategorie numerických experimentů patří také práce dalších vědeckých týmů [13–15], kteří spalovali syntetický plyn nebo metan a dosáhli velmi podobných výsledků jako Giles a kol. Většina vědeckých prací, zabývajících se laminární rychlostí spalování a využívajících numerické modelování, je řešena pomocí mechanismu GRI-MECH 3.0 [16], naproti tomu často byla simulace často provedena také v programu Chemkin. Například Boushaki a kol. [17] posuzovali laminární proudění plamene metanu, do kterého byl přimíchán vodík a pára. Výsledky byly porovnány s experimentálními daty získanými na malém hořáku. Se zvyšující se koncentrací H_2 v palivu došlo k nárůstu laminární rychlosti hoření a také adiabatické teploty plamene, přidání páry mělo přesně opačný efekt. Experimentálně byla laminární rychlost hoření proměřena Hintonem a kol. [18].

Rasmusen a kol. [19] použili směs paliva $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{NO}_x$, kde zkoumali vliv NO_x na oxidaci CH_4 . Měření byla provedena v laboratoři za použití laminárního vysokotlakého reaktoru. Data získaná pomocí experimentu pak byla porovnána s numerickým modelem, obzvláště emise CO , NO_x , teploty spalin a teploty plamene.

Skupina vědců pod vedením Songa [20] se věnovala spalování nízko-výhřevných plynů měnícího se složení na porézním hořáku provozovaném v režimu, kdy plyn může vstupovat jak axiálně, tak radiálně. Byly měřeny teplotní profily, stabilita plamene a emise CO . Výsledkem experimentu je, že stabilitu plamene a průtokovou charakteristiku paliva skrz hořák je možné vylepšit přidáním recirkulace paliva a použitím paliva s výhřevností pouze $1,4 \text{ MJ/m}^3$.

Jeden z dalších experimentů [21] byl zaměřen i na přidávání N_2 do LPG. Předmětem zkoumání byly hlavně délka plamene, tvorba sazí a také emise NO_x , CO a CO_2 . Se zvyšujícím se podílem N_2 ve spalovací komoře dochází k protažení plamene za současného poklesu NO_x . Na druhou stranu s přidáním N_2 došlo ke zvýšení koncentrace CO ve spalinách, při současném snížení koncentrace CO_2 . Zvýšený podíl CO značil nedokonalé spalování.

Vyhodnocení přidávání vodní páry do plamene bylo cílem výzkumu Le Conga a Dagauta [22]. Výzkum se zabýval zejména kinetikou reakcí s důrazem na tvorbu oxidů dusíku. Pro získání relevantních výsledků byla provedena jak numerická simulace, tak i experiment kde byl spalován zemní plyn a samotný vodík. Přidání vody mělo vliv na redukci NO_x zejména kvůli naředění plamene a tedy jeho ochlazení. Pára byla použita i ve výzkumu, ve kterém byl vyhodnocen její vliv na laminární rychlost spalování při podstechiometrických, stechiometrických a nadstechiometrických podmínkách [23].

V dalším výzkumu byl použit hořák typu „*rich-quench-lean*“ o maximálním výkonu 200 kW. Göke a kol. [24] experimentálně spalovali zemní plyn a vodík za současného

přidávání páry, ta se ukázala být efektivním nástrojem pro redukci NO_x (potlačení reakce) – při značném přidání páry klesla emise NO_x na pouhých 10 ppm. Zároveň bylo také vyzorováno, že i relativně malé množství páry může předcházet efektu „*flashback*“. Na velmi vlhké podmínky při spalování zemního plynu se také zaměřili Albin a kol. [25]. Řada dalších výzkumů se také věnovala přidávání inertních plynů jako Ar, N_2 , He and CO_2 , nicméně opět v laboratorních podmínkách [26–28].

Pozornosti vědců neunikla ani plynná paliva získávána z přírodních zdrojů, tzv. bioplyny. V laboratorních podmínkách byly zkoumány bioplyny různého složení při rozdílných podmínkách [29–31]. Jednotlivé typy bioplynů byly posuzovány z hlediska stability plamene, teploty plamene, předaného tepla a emisí při přidání vodíku.

Hosseini a kol. [32] spalovali bioplyn v laboratorním zařízení, které mělo simulovat bezplamenné spalování. Zaměřili se hlavně na teplotu plamene a na koncentraci jednotlivých chemických sloučenin napříč plamenem. Výsledky byly rovněž porovnány s numerickým výpočtem [33]. Bezplamenné spalování se stalo předmětem výzkumu i pro Colorado a kol. [34]. Tato skupina vědců se zabývala teplotními poli, emisemi a distribucí volných radikálů.

Dai a kol. [35] provedli zkoušky na referenčním typu hořáku, celkem testovali 6 různých bioplynů. Výzkum byl zaměřen zejména na stabilitu plamene. Stabilita plamene se pak stala předmětem výzkumu i pro Saediamirihho a kol. [36], kteří posuzovali vliv víříče a průměru trysky na chování plamene.

Přimíchávání inertních plynů a páry je již dlouho zkoumáno v různém rozsahu a s různým zaměřením. Až na některé výjimky, byly všechny experimenty a simulace prováděny v malém laboratorním prostředí. Zároveň výzkumné zprávy neobsahují dostatečná data, zejména co se týká teplotních profilů „nařaděných“ plamenů. Dále pak také chybí data o tepelných tocích a emisích NO_x . Tím, že byla všechna měření prováděna na malých zařízeních, nejsou zahrnuty faktory, které připadají v úvahu u velkých zařízeních. Značný vliv může mít konstrukce hořáku, společně s jeho geometrií a způsobem aplikace/přidávání inertních plynů do plamene/paliva.

I přesto, že v minulosti byla provedena řada experimentů, jak v různých podmínkách, tak i pro různá paliva, stále nejsou dostupná data v řadě oblastí. Jedná se například o:

- Tepelné toky a teplotní mapy v závislosti na délce plamene.
- Soubor experimentálních dat koncentrace NO_x ve spalínách při použití stupňovitého spalování.
- Data pro spalování bioplynu při pod/přetlaku (experimentální i numerické).
- CFD analýza konvenčního hořáku zabývající se distribucí teplotních toků a rozložením teplot při spalování nízko-výhřevných paliv.

2 Tvorba a metody snižování oxidů dusíku

Při spalování fosilních paliv vznikají zejména oxid uhličitý a vodní pára. I přesto, že je velká snaha o vytvoření stabilních podmínek a dosáhnout ideálního spalování, obsahují spaliny i další látky. Ty mohou být obsažené ve vstupních prouděch (palivo, oxidační činidlo), anebo mohou být výsledkem nedokonalého spalování. Sloučeniny vstupující do hořáku spolu mohou reagovat a vytvářet nové sloučeniny jako jsou oxidy dusíků, souhrnně označované jako NO_x , oxidy síry (SO_x), popeloviny a pevné částice – všechny dohromady se nazývají emise. Složení spalin je přísně kontrolováno a veškeré emisní limity jsou sledovány, zejména emise NO_x a SO_x , protože mohou vytvářet kyselé deště, způsobovat smog a poškozovat ozonovou vrstvu [37].

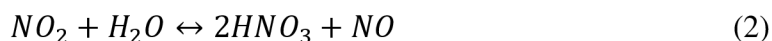
Jako oxidy dusíku je často označována skupina molekul, do které spadají: oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2), oxid dusný (N_2O – známý jako rajský plyn), oxid dusičitý (N_2O_4) nebo oxid dusičný (N_2O_5). V souvislosti s oxidy dusíku je nejčastěji použito označení NO_x , které zahrnuje dvě nejčetnější skupiny vznikající při spalování – oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO_2 [37]. NO je bezbarvý plyn, který velmi ochotně reaguje s kyslíkem (ozonem) a vytváří NO_2 . NO se ve velkých koncentracích projevuje jako jedovatý plyn, který může způsobit podráždění očí a krku, nevolnost, či bolest hlavy. Na druhou stranu NO je jedním z nejdůležitějších prvků, které lidský organismus obsahuje, protože funguje jako „*messenger*“ a podílí se na základních procesech v lidském organismu [38].

Oxid dusičitý je druhá nejčetnější sloučenina dusíku ve spalinách, kterou zastupuje výraz NO_x . NO_2 vzniká po reakci NO s volnými radikály kyslíku nebo s volnými radikály peroxidu (HO_2). Podle předchozích výzkumů je známé, že přibližně 90 % všech NO_x je tvořeno výhradně NO a zbývající jedna desetina připadá na NO_2 . K další oxidaci dochází až poté, co spaliny opustí kouřovod. Ve vyšších vrstvách atmosféry pak dochází k reakci s ozonem [37, 39].

NO_2 je nahnědlý plyn, který je silným oxidačním prvkem. NO_2 je také vysoce toxický a životu nebezpečný, může totiž způsobit chemicky vyvolanou pneumonii anebo otok plic (edemu). Řadí se také mezi jeden z nejdůležitějších plynů, které se podílí na vzniku skleníkového efektu a postupně způsobuje odbourávání vrstvy ozonu ve stratosféře [40]. Molekuly NO_2 pohlcují viditelné světlo a zhoršují tak viditelnost, zároveň v určitých koncentracích dokáží negativně ovlivnit růst rostlin [41].

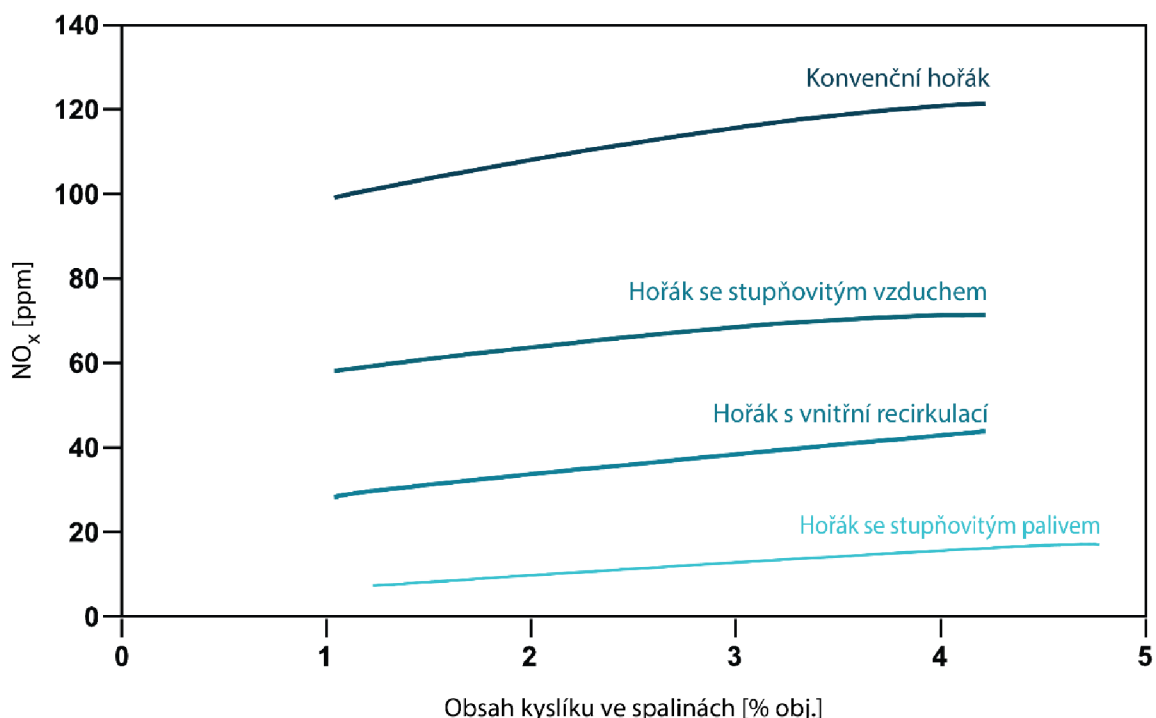
Oxid dusný N_2O – rajský plyn, se podílí na redukci ozonové vrstvy ve stratosféře a je jeden z plynů, které tvoří skleníkové plyny [40]. Tento oxid vzniká zejména za nízkých teplot (705 – 950 °C), v podmínkách kdy je pec podchlazená anebo probíhá spouštění, tedy ještě předtím než je pec vyhřátá na provozní teplotu. Mechanismus pro vznik oxidu dusného se objevuje zejména při spalování tuhých paliv. [37]

Velice účinným prostředkem pro odstraňování NO_x se ukázala být voda, která se při čištění spalin využívá. V atmosféře však oxidy dusíku reagují s vodou za vzniku kyseliny dusité (HNO_2) a kyseliny dusičné (HNO_3). Tyto kyseliny vznikají ve dvou krocích (1,2) a vytváří tzv. kyselé deště [37].



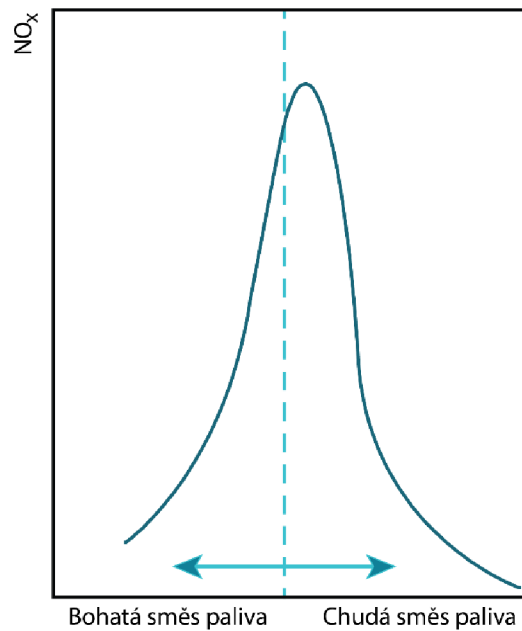
2.1 Mechanismy tvorby NO

Tvorbu oxidů dusíku je možné definovat třemi různými mechanismy, na jejichž základě jsou potom pojmenovány. Jedná se o termické, promptní a palivové NO. Jednotlivé mechanismy jsou podrobně vysvětleny v následujících podkapitolách. I přesto, že mechanismy tvorby jsou jasně dané, je mnoho proměnných, které mohou tvorbu ovlivnit. Na Obr. 2.1 je možné vidět, jaký vliv může mít na tvorbu NO typ spalování v závislosti na přebytku kyslíku ve spalinách [42]. Porovnány jsou klasická metoda spalování (konvenční), se stupňovitým přívodem spalovacího vzduchu, se stupňovitým přívodem paliva a s vnitřní recirkulací spalin.



Obr. 2.1 – Vliv konstrukce hořáku na tvorbu NO_x

Vliv má také složení paliva, kde hraje roli, jestli směs paliva se vzduchem bohatá nebo chudá, závislost zobrazuje Obr. 2.2 [43].



Obr. 2.2 – Závislost relativního poměru paliva a oxidantu na tvorbu NO_x

2.1.1 Termické NO

Termické (vysokoteplotní) oxidy dusíku se začínají formovat až při vyšších teplotách (nad $1100\text{ }^\circ\text{C}$), kde je nižší koncentrace paliva a jsou přímo závislé na teplotě. Termické NO vznikají reakcí kyslíku a dusíku ze spalovacího vzduchu [37]. Tento proces tvorby NO byl poprvé popsán Zeldovichem [44]:



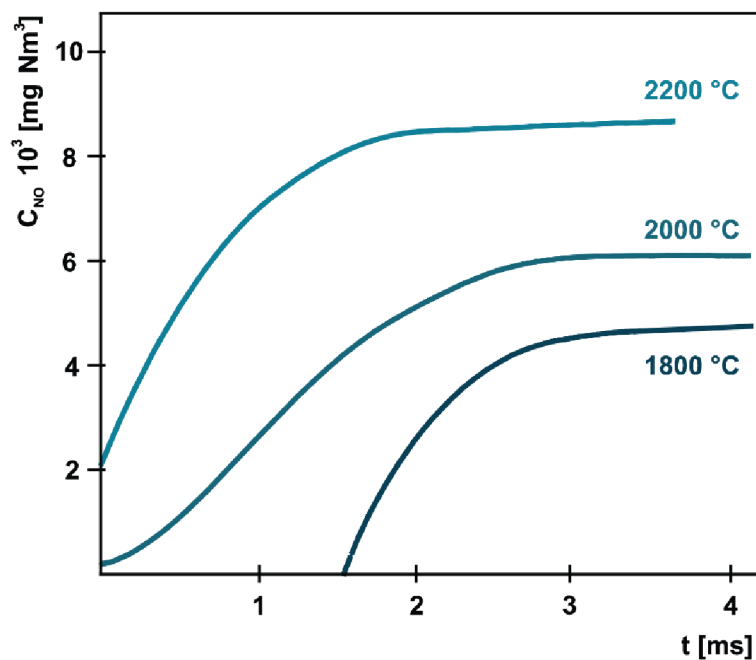
Mechanismus se projevuje především při vysokých teplotách. Například u zařízení vybavených předehřevem vzduchu, nebo při aplikaci některé z metod kyslíkového spalování (OEC), vzniká tímto mechanismem většina NO. V případě přimíchání kyslíku do spalovacího vzduchu dochází k prudkému nárůstu teploty a bezprostřednímu kontaktu molekul dusíku s molekulami kyslíku. Vysoké teploty, které se při spalování s kyslíkem vyskytují, tento jev ještě umocňují. Na druhou stranu při aplikaci kyslíku do středu plamene dochází k izolaci čistého kyslíku od dusíku ve spalovacím vzduchu a naopak dochází k redukci emisí NO. Nejvýraznější je potom tato změna při spalování s čistým kyslíkem. Což je dáno tím, že jako oxidační činidlo není použit atmosférický vzduch a v oxidantu se nevyskytuje dusík, který by mohl s kyslíkem reagovat [37, 45].



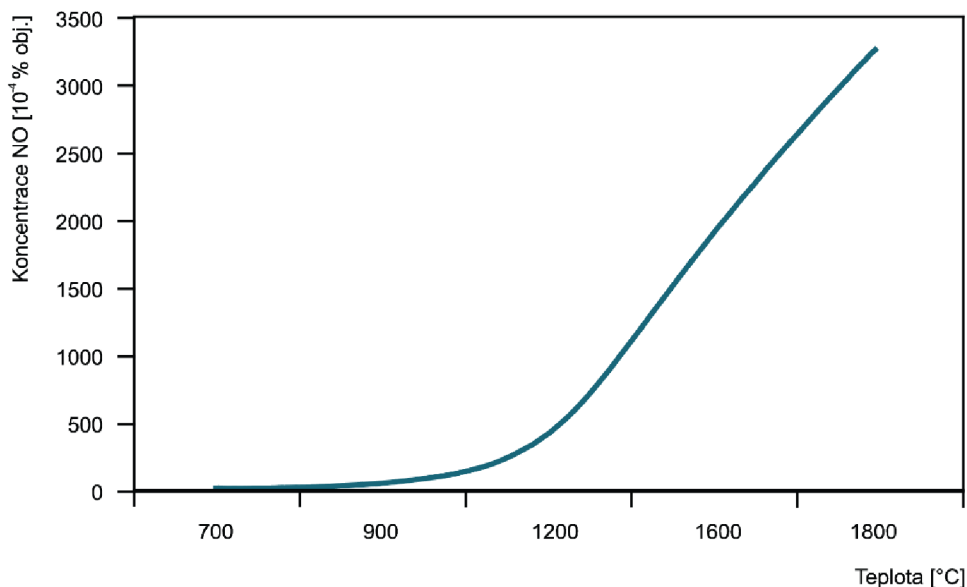
Při teplotách přesahujících 1300°C je možné Zeldovichův mechanismus rozšířit o další rovnici, která zahrnuje vliv hydroxylových radikálů ve směsích bohatých na palivo:



Existuje řada technologií, které se snaží vznik termických oxidů dusíku potlačit, tím že snižují lokální koncentrace kyslíku a dusíku v bezprostřední blízkosti vysokých teplot v plamenu nebo že se snaží upravit čas zdržení (Obr. 2.3), po který jsou tyto částice vysokým teplotám vystaveny. Poslední z možností jak omezit emise NO je snížit maximální teploty v plamenu tak, aby nedocházelo k umocnění reakcí [37]. Graf tvorby termických NO v závislosti na teplotě zobrazuje Obr. 2.4 [46].



Obr. 2.3 – Závislost tvorby NO v závislosti na době zdržení v teplotních pásmech



Obr. 2.4 – Graf tvorby termických NO v závislosti na teplotě

Na produkci NO mají vliv nejenom teploty, ale také další proměnné, které shrnuje následující Tab. 2.1 [37]. V tabulce jsou jednotlivé parametry rozděleny do třech skupin parametrů:

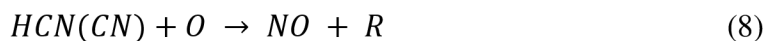
- Primární parametry se týkají zařízení a vlastností paliva.
- Sekundární parametry jsou ryze spalovací vlastnosti.
- Základní vlastnosti – jedná se primárně o provozní podmínky.

Tab. 2.1 – Parametry ovlivňující tvorbu NO

Primární	Sekundární	Základní vlastnosti
Vstupní teplota a rychlost	Spalovací intenzita	Koncentrace kyslíku
Návrh spalovacího zařízení	Rychlost odebrání tepla	Maximální teploty
Složení paliva	Přimíchávání spalovacích produktů do plamene	Čas zdržení částic v oblasti maximálních teplot
Distribuce paliva a vzduchu	Místní poměr mezi palivem a vzduchem	
Velikost kapek a částic	Turbulence v plamenu	
Poutač plamene		

2.1.2 Promptní NO

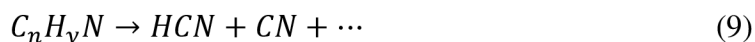
Promptní NO vznikají rychlou reakcí dusíku přivedeného ve spalovacím vzduchu s volnými radikály z paliva. Promptní NO se podílejí na celkové koncentraci zejména při nižších teplotách. Při vyšších teplotách se tento mechanismus stává méně důležitým v porovnání s termickými NO. Při spalování se vytváří tzv. fronta plamene, kdy částečně spálené molekuly paliva čekají na úplnou reakci s kyslíkem. Tyto molekuly by se měly přeměnit na CO₂ a vodní páru, nicméně místo této reakce dojde k reakci s dusíkem. Když palivo reaguje s dusíkem, vzniknou jako meziproducty kyanidy a vytvoří se malé molekuly uhlovodíků. Prvním kdo tento jev popsal, byl Feminare, který se zabýval spalováním plynného pyridinu s amoniakem (čpavkem). Feminare vyzoroval, že oblasti bohaté na palivo přispívají k tvorbě NO. Pozorovaný jev nebyl schopný popsat pomocí žádných existujících teorií, proto přišel se sérií rovnic (7), (8), které tuto závislost popisují [37, 45, 47]:



2.1.3 Palivové NO

Na vzniku palivových NO se podílí dusík, který je pevně vázaný v palivu. Při spalování za vysokých teplot je tento mechanismus vzniku NO zanedbatelný. Objevují se však případy, kdy tento mechanismus může být dominantním. To se děje například při spalování tuhých paliv s velkou koncentrací dusíku, jako jsou uhlí a směsný komunální odpad. K vytvoření palivových NO nedochází přímou cestou, ale je k tomu zapotřebí několik reakcí, protože dusík bývá často složitě navázán na molekuly paliva. Meziproducty, které se podílí na tvorbě, jsou podobné jako u promptních NO. Jedná se hlavně o kyanid (HCN) a čpavek (NH₃). Při spalování zemního plynu nebo propanu záleží na složení paliva, tak jako ukazuje Tab. 4.2 [48]. Na základě složení je možné předpokládat, že při spalování tranzitního

zemního plynu, budou promptní NO zastoupeny v celkové koncentraci pokaždé, nicméně pouze v malém množství [37, 47].



Rovnice (9) popisuje rozpad uhlovodíkového řetězce na dočasně vytvořené radikály, které reagují s kyslíkem a vytvářejí oxidy dusíku (10).



2.1.4 Přepočítání ppm na mg/m³

Koncentrace NO a NO₂ se nejčastěji vyjadřují v různých jednotkách. Jednak v jednotkách ppm, které jsou měřené analyzátozem, a v mg/m³, které jsou dopočítané z naměřených hodnot a ve kterých jsou uváděny specifické emisní limity. Někdy se uvádí koncentrace mg/MW, tj. na jednotku výkonu. Rovnice pro přepočítání mezi ppm a mg/m³ vypadá následovně [49]:

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

kde

<i>Y</i>	je přepočtená koncentrace NO nebo NO ₂ [mg/m ³],
<i>X</i>	je naměřená koncentrace NO nebo NO ₂ [ppm],
<i>x_i</i>	je hmotnostní podíl <i>i</i> -té složky [kg/kg],
<i>MW_i</i>	je molekulární hmotnost <i>i</i> -té složky [kg/kmol].

Například přepočty 1 ppm NO a 1 ppm NO₂ na [mg/m³] vypadají následovně:

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

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

Často se také používá souhrnný název NO_x, který zastupuje součet NO a NO₂ vyjádřený v mg/m³. Pro tuto potřebu je NO nutné vyjádřit jako ekvivalentní hodnotu NO₂, což popisuje následující rovnice (14) [49]:

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

2.1.5 Vliv složení paliva na NO_x

Palivo může z velké části vznik NO_x ovlivnit, zejména některé jeho složky, které mohou mít vliv jak na snížení, tak na zvýšení NO_x. Předchozí výzkumy ukazují, že přidání vodíku nebo oxidu uhelnatého vede ke zvýšení NO_x a naopak přidávání CO₂, N₂ a vody má zcela opačný efekt. V případě spalování s atmosférickým vzduchem molekuly dusíku v palivu zásadně vznik NO_x neovlivňují, naopak s přibývajícím N₂ v palivu dochází ke snižování emisí NO_x. Jiná situace může nastat při spalování s čistým kyslíkem. Reakce paliva s čistým kyslíkem nebo s kyslíkem obohaceným spalovacím vzduchem má za následek mnohem vyšší teploty v plamenu a může tak snáze docházet ke vzniku termických NO_x [37].

V procesním průmyslu se často používají paliva, která jsou směsí různých plynů a často bývají vedlejšími produkty některých procesů. Velmi často jsou tyto plyny složené z jednoduchých uhlovodíků C_1 až C_4 a obsahují také značné množství interních plynů, jako jsou N_2 a CO_2 . Vzhledem k tomu, že tyto odpadní plyny bývají často spalovány v hořácích na běžně dostupná paliva (zemní plyn, LTO, TTO), musí být hořáky schopné spalovat v různou dobu různá paliva. Tento požadavek klade velký důraz na správný design hořáku a zvyšují se tak i finanční náklady. Nehledě na to, že musí být splněny emisní normy [37].

Hořáky pro spalování více druhů paliv mohou být navrženy tak, že každé z paliv má vlastní přívod do ústí hořáku nebo se může jednat o předmíchaná paliva (v případě stejného skupenství paliv), která jsou přivedena přes jeden vstup. Hořák tedy musí být schopný provozu při různých podmínkách (během zapálení, běžné provozní podmínky a nestandardní podmínky). Po najetí technologie do ustáleného režimu je nutné splnit emisní limity nejen pro NO_x , ale i další polutanty jako jsou SO_x a CO [37].

Důležitým parametrem je také poměr paliva a spalovacího vzduchu/kyslíku. V případě spalování směsi bohaté na palivo dochází k redukci tvorby oxidů dusíků, naopak u směsí, kde je poměr mezi palivem a vzduchem příznivější pro vzduch, dochází k jejich zvýšené tvorbě. Jedním z důvodů, proč se tak děje, je silná závislost tvorby NO_x na teplotě. U směsí bohatých na palivo není teplota tak vysoká, což vede k potlačení tvorby termických NO . Druhým z důvodů jsou chemické reakce. Dochází k vytvoření redukční atmosféry, kdy vzniká hodně oxidu uhelnatého (CO) a také NO_x , které mohou být díky redukční atmosféře zredukovány zpět na N_2 [37].

2.2 Emisní limity

V České republice je od 1. 9. 2012 platný zákon č. 201/2012 Sb. [50], který nahradil zákon č. 86/2002 Sb. Tímto nařízením došlo ke zrušení prakticky všech prováděcích předpisů, které předchází zákon definoval. Prioritou zákona o ochraně ovzduší je zejména zlepšení kvality ovzduší a s ním spojená důkladnější prevence obyvatelstva před imisní zátěží. Aktuální zákon zahrnuje nařízení vydané Evropskou unií, přičemž upravuje následující body:

- přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší,
- způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení,
- nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší,
- práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší,
- práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě.

Na základě směrnice, vydané Evropským parlamentem a jeho radou, upravující emisní limity došlo k vydání Vyhlášky 415/2012 Sb. [51]. Tato vyhláška reaguje na požadavky sjednocení podmínek pro měření a produkci emisí v rámci EU [52]. V současnosti platí poněkud benevolentní emisní limity (Tab. 2.2), jejichž platnost vyprší k 31. prosinci 2017. S platností od 1. ledna 2018 dochází ke zpřísnění emisních limitou jak u velkých zdrojů nad

50 MW, tak i pro zdroje s menším výkonem než 50 MW, tak jako ukazuje Tab. 2.3. Emisní limit je definovaný jako nejvyšší přípustné množství znečišťující látky nebo skupiny znečišťujících látek, které jsou volně vypouštěny ze stacionárního zdroje. Hodnota emisí je pak vyjádřena jako hmotnostní koncentrace měřené látky v odpadních plynech nebo jako hmotnostní tok nežádoucí látky za jednotku času. Hodnoty uvedené v tabulce jsou vztažené k normálním podmínkám a zároveň jsou pro každý druh paliva přepočteny na referenční hodnotu kyslíku ve spalinách.

Tab. 2.2 – *Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné do 31. prosince 2017*

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]											
	> 0,3-1 MW				> 1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo	–	650 1100 ⁽²⁾	250	650	–	650 1100 ⁽²⁾	250	650	2500 ⁽¹⁾ 1500 ⁽²⁾	650 500 1100	150 100 250	400 300 ⁽¹⁾ 650 ⁽⁵⁾
Kapalné palivo	–	500	–	175	–	500	100	175	1700	450	100	175
Plynné palivo a zkapalněný plyn	–	200 300 ⁽³⁾	–	100	–	200 300 ⁽³⁾	–	100	–	200 300 ⁽³⁾	50 ⁽⁴⁾	100

Vysvětlivky: (1) Vztahuje se na spalovací stacionární zdroje s fluidním ložem. (2) Vztahuje se na spalování pevných paliv ve výtavném topeništi. (3) Vztahuje se na spalování propan butanu. (4) Vztahuje se na spalování paliv mimo veřejné distribuční sítě. (5) Vztahuje se na spalování biomasy pro spalování ve stacionárních zdrojích [51].

Tab. 2.3 – *Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné od 1. ledna 2018*

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]											
	> 0,3-1 MW				> 1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo	–	600	100	400	–	500	50	500	1500 ⁽¹⁾	500	30	300 500 ⁽³⁾
Kapalné palivo	–	130	–	80	–	130 450 ⁽⁴⁾	50	80	1500 ⁽⁴⁾	130 450 ⁽⁴⁾	30	80
Plynné palivo a zkapalněný plyn	–	100 ⁽²⁾	–	50	–	100 ⁽²⁾	–	50	–	100 ⁽²⁾	–	50

Vysvětlivky: (1) Na spalovací stacionární zdroje spalující hnědé uhlí, provozované nejvýše 3200 provozních hodin ročně, se vztahuje specifický emisní limit 2000 mg/m³. (2) Pokud nelze této hodnoty z technických důvodů dosáhnout použitím nízko-emisních hořáků, platí specifický emisní limit 200 mg/m³. (3) Platí v případě spalování biomasy s výjimkou spalování výlisků z biomasy. (4) Vztahuje se na spalování těžkého topného oleje a jemu podobných kapalných paliv [51].

3 Přenos tepla

Během spalování se do okolí uvolňuje značné množství energie, které se přenáší několika různými způsoby. Ve spalovací komoře vzniká rozdíl mezi teplotou plamene a teplotou komory, tento rozdíl se nazývá teplotní gradient a je klíčový proto, aby přenos tepla fungoval. Jedná se tedy o přenos tepla z plamene/horkých spalin do ohřívajícího materiálu nebo stěn trubek/komory. Přenos tepla je možné popsat třemi různými mechanismy [45]:

- tepelná výměna vedením (kondukcí),
- tepelná výměna prouděním (konvekci),
- tepelná výměna sáláním (zářením, radiací).

3.1 Konduktce

Přenos tepla mezi jednotlivými molekulami nacházejícími se v těsné blízkosti se nazývá konduktce (vedení tepla). Rychlost přenosu tepla závisí na vlastnostech látky, kde přenos tepla probíhá. Interakce mezi jednotlivými částicemi a pohyb mezi nimi jsou pro přenos tepla klíčové. Může se jednat o drobné vibrace v krystalové mřížce anebo neuspořádaný pohyb molekul v plynech. Jako první tento jev popsal Fourier, podle kterého je tento fenomén pojmenován. Podle Fourierova zákona, který popisuje tento typ přenosu tepla je rovnicí pro měrný tepelný tok možné zapsat takto [45]:

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

kde q_x je měrný tepelný tok [W/m^2],
 k je tepelná vodivost [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],
 dT je rozdíl teplot mezi dvěma místy [K],
 dx je vzdálenost mezi dvěma místy [m].

3.2 Konvekce

Konvekci (proudění) je tvořena dvěma mechanismy, které je možné popsat pomocí zákonů hydrodynamiky. První mechanismus tvoří náhodný pohyb molekul (difúze) stejně jako je tomu u konduktce. Druhý mechanismus je pak založen na promíchání objemového toku. Konvekce může probíhat nuceně nebo přirozeně. U přirozené konvekce hraje roli gravitační síla, kdy těžší molekuly klesají, zatímco lehčí molekuly mají tendenci stoupat vzhůru. Nucená konvekce je potom důsledkem vnější síly, jako je kompresor nebo čerpadlo.

Nejčastěji konvekce probíhá mezi proudící tekutinou a povrchem, který vymezuje směr jejího proudění. V těsné blízkosti povrchu dojde k vytvoření malé vrstvy tekutiny s proměnnou rychlostí proudění. Tato rychlost může nabývat hodnot od 0 až po tzv. rychlost volného proudu. Právě v těsné blízkosti povrchu, kde je nízká rychlost proudění, se tento mechanismus projevuje.

Zjednodušená rovnice, nazývána též Newtonova, pro přenos tepla konvekcí je zapsána v tomto tvaru [45]:

$$Q_H = A \cdot \alpha_t \cdot (T - T_w) \quad (16)$$

kde	Q_H	je předané teplo [W·s],
	A	je plocha přestupu tepla [m ²],
	α_t	je součinitel přestupu tepla [W/(m ² ·K)],
	T	je teplota tekutiny [K],
	T_w	je teplota povrchu tělesa [K].

3.3 Radiace

Radiace (záření) je patrně nejdůležitějším mechanismem, který popisuje přenos tepla. Každý povrch tělesa má určitou teplotu a dokáže vyzařovat energii. Radiace není závislá na existenci hmotného prostředí, proto tento mechanismus může probíhat i v absolutním vakuu, kde nejsou přítomny žádné částice [39]. Radiací je možné přenést značné množství energie, zejména proto, že vzorec pro výpočet tepelného toku obsahuje čtvrtou mocninou teploty černého tělesa a je pojmenován jako Stefan-Boltzmannův zákon [45]:

$$Q_H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (17)$$

kde	Q_H	je předané teplo [W·s],
	A	je plocha přestupu tepla [m ²],
	ε	je emisivita (poměrná zářivost) [-],
	σ	je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8}$ [W/(m ² ·K ⁴)]),
	T	je teplota [K].

Se vzrůstající teplotou dochází k dominanci radiace nad kondukcí a konvekcí. Radiaci ovlivňuje i emisivita (poměrná zářivost), která nabývá hodnot v rozmezí $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Tento parametr vypovídá o tom, zda je těleso ideálním zářičem nebo jestli se chová jako absolutně černé těleso. Radiace funguje díky tomu, že v okamžiku, kdy atomy/molekuly získají přebytečnou energii, stávají se nestabilními. Částice mají tendenci vrátit se do své stabilní polohy a dochází k vyzaření fotonu, který se volně pohybuje prostorem až do chvíle, dokud nenarazí na další částici, která ho pohltí [45].

4 Princip měření teploty pomocí termočlánků

Termočlánky se používají pro měření teplot v řadě průmyslových odvětví. Jsou založeny na principu generování napětí na dvou rozdílných vodičích. Jedná se o tzv. termoelektrické napětí, vygenerované vodičem vloženým do tepelného pole. Podle toho, jaký vodič je použit, mají termočlánky různé vlastnosti, které se liší zejména rozsahem použití. Ve vodiči dochází ke vzniku elektrického potenciálu, který je způsoben rozdílnou hustotou volných elektronů na jednotlivých koncích vodiče. Elektrony vystavené vyšším teplotám nabývají vyšší kinetickou energii než elektrony v chladném prostředí. Tento rozdíl vede ke vzniku elektrického potenciálu napříč vodičem vystaveným teplotnímu diferenciálu. V případě použití dvou různých vodičů, kdy každý z nich disponuje jinou hustotou elektronů, dochází k vytvoření rozdílných elektrických potenciálů. Na základě znalosti dvou potenciálů je možné změřit rozdíl, který odpovídá měřené teplotě [53].

Napětí vygenerované vodičem je možné vyjádřit následující rovnicí [53]:

$$U = S(T_1 - T_0) \quad (18)$$

kde	U	napětí [mV],
	S	je Seebeckův koeficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$),
	T_1	je teplota na teplé straně vodiče,
	T_0	je teplota na studené straně vodiče.

Seebeckův koeficient (často také nazývaný termoelektrické napětí) je podobně jako hustota, tepelná vodivost nebo odpor vlastnost různých kovových materiálů. Nezávisí na průměru ani tvaru vodiče, ale mění se na základě teploty. Pro získání rovnice pro výpočet vygenerovaného napětí je možné vyjít z předpokladu, že každý z vodičů použitých v termočlánku má jiný Seebeckův koeficient a což lze zapsat rovnicí [53]:

$$U = S_A(T_1 - T_0) + S_B(T_0 - T_1) \quad (19)$$

$$U = (S_A - S_B)(T_1 - T_0) \quad (20)$$

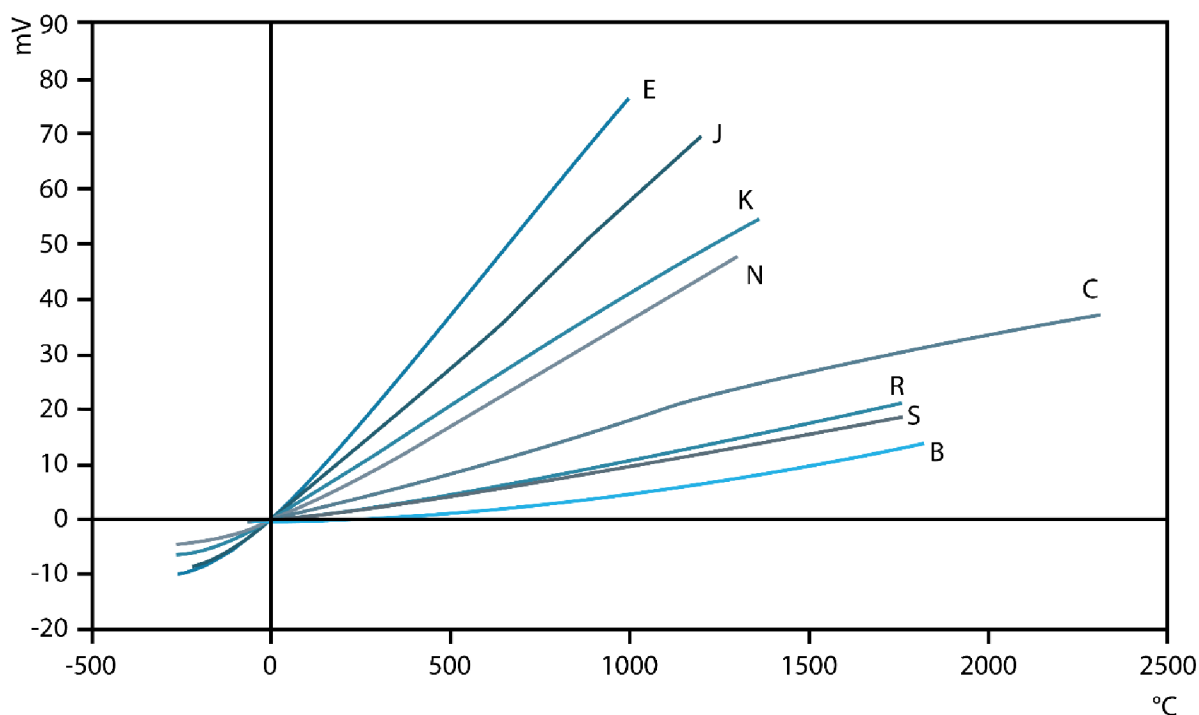
kde	S_A	je Seebeckův koeficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) prvního vodiče,
	S_B	je Seebeckův koeficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) druhého vodiče.

I přesto, že pro vodiče lze použít prakticky jakýkoliv vodič, v praxi se používají pouze některé kovy (jako je platina, měď, nikl, rhodium atd.). V závislosti na Seebeckově koeficientu, chemické a metalurgické stabilitě, kujnosti a ceně je možné určit správné vodiče pro konkrétní aplikace. Základní rozdělení nejběžněji používaných termočlánků bylo učiněno na základě složení jednotlivých vodičů, jak je uvedeno v Tab. 4.1 [53].

Tab. 4.1 – Rozdělení jednotlivých typů termočlánků

Typ termočlánku	Složení vodičů a jejich kombinace
J	železo vs. slitina měď-nikl (konstantan)
T	měď vs. slitina měď-nikl (konstantan)
K	slitina chrom-nikl vs. slitina nikl-mangan-křemík-hliník
E	slitina chrom-nikl vs. slitina nikl-měď
N	slitina chrom-nikl-křemík vs. slitina nikl-křemík-hořčík
C	slitina wolfram-rhenium vs. slitina wolfram-rhenium
S	slitina platina-rhodium vs. platina
R	slitina platina-rhodium vs. platina
B	slitina platina-rhodium vs. slitina platina-rhodium

Pro použití jednotlivých termočlánků je nutné mít informace jednak o tom, jakou teplotu lze očekávat v místě měření, a také v jakém prostředí bude měření probíhat. Rozsah jednotlivých termočlánků vyplývá z Obr. 4.1 [53], kde je zobrazena závislost mezi teplotou a generovaným napětím na jednotlivých typech termočlánků.



Obr. 4.1 – Napětí generované jednotlivými typy termočlánků v závislosti na teplotě

Protože v praxi běžně dochází k tomu, že měření probíhá ve značné vzdálenosti od zobrazovacího zařízení a bylo by neekonomické pro celou trasu použít vodiče termočlánku, používá se tzv. kompenzační vedení. Většinou případů se jedná o měděný drát odpovídajícího průřezu, aby došlo k minimalizaci ztrát. V ideálním případě by vodiče měly být pokryty izolací tak, aby výsledná hodnota nemohla být ovlivněna okolní tepelnou radiací.

Každý termočlánek je vhodný pro použití v jiném prostředí, což závisí zejména na složení vodičů [53]:

Typ J – termočlánek nachází uplatnění v prostředích s teplotou od 0 °C do 760 °C, kde může být jak inertní prostředí, tak oxidační nebo redukční atmosféra. Při použití v oxidačním prostředí dochází při teplotách nad 540 °C k postupné degradaci termočlánku. Termočlánek

se také nehodí pro použití ve vlhkém prostředí a také v případech, kdy teplota klesne pod 0 °C, protože dochází ke korozi železného vodiče.

Typ T – termočlánek může být použit jak v inertním prostředí, tak v prostředí, kde se vyskytuje oxidační nebo redukční atmosféra. Umožňuje měřit teploty v rozsahu -200 °C až 370 °C, proto bývá použit zejména pro měření nízkých teplot (využití u kryogenních aplikací). Naopak, při vysokých teplotách dochází k rychlé oxidaci mědi a proto tento termočlánek není vhodný pro vysokoteplotní aplikace.

Typ K – umožňuje měřit teploty v rozsahu -200 °C až 1260 °C v inertních prostředích nebo tam, kde je oxidační atmosféra. Použití v redukčních atmosférách nebo v aplikacích s proměnlivým prostředím se nedoporučuje. Termočlánek také není možné použít v prostředí, kde se vyskytuje síra anebo vakuum. Termočlánek typu K je náchylný k tzv. metalurgické transformaci, kdy při vyšší teplotách dochází ke změnám v krystalové mřížce. Změny v krystalové mřížce následně ovlivňují Seebeckův koeficient, což má negativní vliv na přesnost měření.

Typ E – stejně jako termočlánky typu T a K není tento typ vhodný pro měření v redukčním prostředí, vakuu a prostředí s nízkou koncentrací kyslíku. Termočlánek lze použít pro měření teplot v rozsahu -200 °C až 900 °C.

Typ N – je vhodný pro měření v oxidačních a inertních prostředích. Termočlánek typu N byl vyvinut jako náhrada termočlánku K, protože tolik nepodléhá tzv. zelené korozi a neprochází metalurgickou transformací. Teplotní rozsah je stejný jako u termočlánku typu K, a to -200 °C až 1260 °C.

Typ C – termočlánek je určený pro měření velmi vysokých teplot, vydrží teploty až 2315 °C. Je vhodný pro redukční a inertní prostředí.

Typy R a S – termočlánky je možné použít pro měření teplot 0 °C až 1480 °C v inertním a oxidačním prostředí. Pro redukční prostředí jsou naprosto nevhodné. Materiál vodičů mohou degradovat metalické, ale i nemetalické páry. Pokud je to možné, vodiče by neměly být vystaveny kontaktu s železem (například při umístění v ochranných trubkách), protože by mohlo dojít k difuzi a narušení krystalové mřížky. Místo toho se doporučuje dráty uložit do hliníku. Ve vysokých teplotách u obou termočlánků dochází k zvětšení zrna v krystalové mřížce a vodiče jsou náchylnější k chemické degradaci.

Typ B – termočlánek je určen pro měření vyšších teplot (až do 1700 °C), spodní hranicí je potom 870 °C. Použití pro měření nižších teplot není možné, protože vodiče mají velmi nízký Seebeckův koeficient a není tak možné naměřit potřebné napětí. Termočlánek lze použít v inertním anebo v oxidačním prostředí.

4.1 Referenční palivo – zemní plyn

Zemní plyn dokázali využívat už Číňané v roce 900 před Kristem. Bohužel dlouho dobu neměl patřičné využití a to zejména kvůli chybějícím znalostem o spalování a distribuci plynu. Revoluční změny přišly v devatenáctém století, kdy byl poprvé navržen potrubní systém a také v okamžiku, kdy Bunsen navrhl prototyp hořáku, který dodnes nese jeho jméno. Ještě však dlouhou dobu po těchto objevech bylo běžnou praxí plyn unikající z nalezišť, pálit v hořácích zvaných fléry, bez toho aniž by byla energie získaná spálením nějak ekonomicky/energeticky využita. Dnes v 21. století je zemní plyn nedílnou součástí života obyvatel vyspělého západního světa a kromě standardních hlubinných vrtů se v posledních letech rozmohly i tzv. břidlicové plyny, které pocházejí z podpovrchových nalezišť [54].

Zemní plyn je charakterizován jako směs plynných uhlovodíků s různými příměsemi. Složení zemního plynu se tedy různí v závislosti na tom, z jakého naleziště pochází. Nejčastěji jsou v zemním plynu zastoupeny metan, který je hlavní složkou paliva, dále pak etan, propan, butan a řada dalších vyšších uhlovodíků. Surový zemní plyn také může obsahovat nespalitelné příměsi, jako jsou vodní pára, hydrogen sulfid, oxid uhličitý, dusík anebo helium. Během dalšího zpracování mohou být ze zemního plynu, buď zcela anebo alespoň částečně, separovány složky jako etan, propan a butan, které se používají pro výrobu jiných typů paliv, jako je například LPG. Za účelem zkvalitnění plynu a zlepšením jeho transportovatelnosti dálkovým potrubím pak bývají odstraněny i nehořlavé složky [54].

Do zemního plynu jsou také přidány složky, které mu dodávají jeho speciální vlastnosti, jako je merkaptan způsobující jeho typický zápach.

4.2 Výrobní proces zemního plynu

Procesy při zpracování zemního plynu se liší v závislosti na lokalitě, kde se zemní plyn těží. Běžné zpracování zahrnuje postupy jako extrakce, zpracování, transport, uskladnění a distribuce [54].

4.3 Extrakce

Pro některá naleziště je typické, že je v nich zemní plyn stlačen na určitý tlak a může tak samovolně proudit z ložiska na zemský povrch bez jakékoliv cizí pomoci. Tato situace však nastává velmi zřídka, proto se přistupuje k průmyslové těžbě, kdy je pro těžbu použit tzv. těžařský kozlík, který se pohybuje neustále na horu a dolu a funguje na principu pístového čerpadla. Když se plyn dostane na zemský povrch, bývá od něj oddělena surová ropa, která se často v nalezištích také nachází [54].

4.4 Zpracování

V roce 2000 obsahovalo ca. 75 % vytěženého zemního plynu ve Spojených státech malé nebo vůbec žádné množství ropy. Takový plyn je pak velmi jednoduché zpracovat, na rozdíl od plynu, který pochází z hlubkových vrtů. Ten mimo jiné obsahuje také prach, písek a vodní páru, které je zapotřebí od plynu oddělit, tak aby se zabránilo korozi a porušení zařízení nebo potrubí. Pevné částice bývají odděleny přímo u vrtu, kde plyn prochází přes řadu filtrů. Vodní pára je zachycována pomocí filtrů obsahující granule schopné vázat na sebe vodu, např. silica gel. Alternativně lze použít mokrou metodu, kdy se používá

etylenglykol. Po vysoušení a odstranění nečistot je možné plyn stlačit a zajistit jeho distribuci [54].

Zemní plyn obsahující těžké uhlovodíky prochází následně další úpravou tak, aby plyny jako jsou propan a butan, mohly být prodány zvlášť. Nejběžnější metodou je studená absorpce v oleji, který má podobné vlastnosti jako kerosin. Zemní plyn se nechává probublávat, lehké uhlovodíky jako jsou metan a etan tato filtrace nijak nepoznamená, zatím co těžké uhlovodíky se navážou na kapalinu a zkondenzují. Takto je možné zachytit téměř 85 % propanu a prakticky veškerý butan. Kapalina, která posloužila pro zachycení těžkých frakcí, se následně destiluje a jsou tak získány jednotlivé složky [54].

Po dokončení studené absorpce obsahuje zemní plyn metan, etan, malé množství propanu, které se nepodařilo zachytit, a nespalitelné složky jako je oxid uhličitý, hydrogen sulfid, dusík atd. V této fázi bývá někdy odstraněn etan, jenž bývá použit v některých chemických procesech. Zároveň se v této fázi odstraní velká část vodních par, protože pro extrakci etanu je plyn stlačován a následně ochlazen, tak aby byl etan zachycen jako kapalina [54].

Pro některá naleziště je typické, že plyn obsahuje velké množství oxidu uhličitého (např. Norsko) nebo hydrogen sulfid. Tyto plyny mohou reagovat se zbývajícími vodními parami a vytvořit kyseliny, které mohou způsobit poškození zařízení nebo transportní sítě. Pro odstranění těchto komponent se využívají kolony, kam je přivedeno do horní části rozpouštědlo na bázi monoethanolaminu. Rozpouštědlo reaguje s nežádoucími plyny a naváže je tak na sebe, vzniklá kapalina je zachycena a následně opět zpracována [54, 55].

Pokud zemní plyn obsahuje i dusík, je provedena jeho separace v dalším kroku. Plyn prochází nízkoteplotní destilací sloužící ke zkapalnění a oddělení dusíku. Společně s předchozím krokem se někdy mluví jako o vylepšování zemního plynu, protože plyn nyní dosahuje vyšší výhřevnosti. Posledním krokem při úpravě zemního plynu může být oddělení helia složitým procesem destilací a vyčistění [54, 55].

4.5 Přeprava

Před zahájením přepravy je do plynu přidán merkaptan, aby měl plyn typický zápach a případný únik byl lehce rozpoznatelný. Doprava je realizována pomocí potrubí různého průměru. Na dlouhých trasách je nutné nainstalovat přečerpávací stanice osazené kompresory, aby byly vykompenzovány ztráty místních odporů a ztráty způsobené třením mezi stěnami a molekulami plynu. Plyn může být dodáván přímo spotřebiteli anebo může být uskladněn v podzemním zásobníku, který slouží jako zdroj zejména v zimním období [54].

Rozdělení zemních plynů podle chemického složení [56]:

- Zemní plyny suché (chudé) – největší zastoupení ve složení má metan, vyšší uhlovodíky jsou zastoupeny pouze málo anebo vůbec
- Zemní plyny vlhké (bohaté) – kromě metanu obsahují značný podíl vyšších uhlovodíků
- Zemní plyny kyselé – obsahují zejména sulfan (H_2S)
- Zemní plyny s vyšším obsahem nehořlavých plynů – obsahují dusík a oxid uhličitý

Mezi nejčastěji dostupné plyny ve střední Evropě a tedy i České republice se řadí plyn tranzitní, norský, alžírský, holandský a jihomoravský. Průměrné složení plynů udává Tab. 4.2 [57].

Tab. 4.2 – Průměrné složení zemních plynů dostupných v Evropě

Složky zemního plynu	Tranzitní zemní plyn [%]	Norský zemní plyn [%]	Alžírský zemní plyn [%]	Jihomoravský zemní plyn [%]	Holandský zemní plyn [%]
Metan	98,39	85,8	86,9	97,7	81,31
Etan	0,44	8,49	9	1,2	2,85
Propan	0,16	2,3	2,6	0,5	0,37
Butan	0,07	0,7	1,2	-	0,14
Pentan	0,03	0,25	-	-	0,09
Dusík	0,84	0,96	0,3	0,6	14,35
Oxid uhličitý	0,07	1,5	-	-	0,89
LHV [MJ/m _N ³]	33,93	37,38	38,53	34,32	29,93

5 Nízko-výhřevné plyny

Pro nízko-výhřevné plyny je typické jejich měnící se složení. V závislosti na původu se může lišit obsah spalitelných složek, ale i ostatních plynů, které se přímo neúčastní spalovací reakce. V následující sekci je popsána produkce, zpracování a uskladňování jednotlivých plynů zejména pro bioplyn, koksárenský plyn, vodní plyn, vysokopecní plyn, generátorový plyn a feroslitinový plyn. Každý plyn má unikátní složení a proto jsou zavedeny kategorie, do kterých se plyny dělí. Literatura se však v definici co je a co už není nízko-výhřevný plyn různí, například Černý a kol. uvádí následující rozdělení [56]:

- Málo výhřevné – výhřevnost do $8,37 \text{ MJ/m}_N^3$ – sem se řadí vysokopecní plyn, generátorový plyn anebo zemní plyn reformovaný vzduchem,
- středně výhřevné – výhřevnost od $8,37$ do $12,56 \text{ MJ/m}_N^3$ – do této skupiny patří vodní plyn, zemní plyn reformovaný párou, směsný plyn nebo plyn z nízkoteplotní karbonizace uhlí,
- velmi výhřevné – výhřevnost od $12,56$ do $20,93 \text{ MJ/m}_N^3$ – do této skupiny patří koksárenský svítiplyn nebo plyn z tlakového zplynování hnědého uhlí,
- velmi vysoce výhřevné – výhřevnost nad $20,93 \text{ MJ/m}_N^3$ – do této skupiny patří zemní plyn naftový a karbonský, olejový plyn nebo směs propanu a butanu (LPG).

Naproti tomu plynárenská příručka [58] používá rozdělení, které bylo definováno v normě ČSN 38 5502 (norma byla zrušena bez náhrady) na základě spalného tepla:

- Plyny nízko výhřevné – spalné teplo do $16,8 \text{ MJ/m}_N^3$ – vysokopecní plyn, nízkotlaké generátorové plyny, tlakový energetický plyn a vodík,
- plyny středně výhřevné – spalné teplo od $16,8$ do 20 MJ/m_N^3 – svítiplyn, směsný plyn a čistý koksárenský plyn,
- plyny velmi výhřevné – spalné teplo od 20 do 50 MJ/m_N^3 – zemní plyn, karbonský plyn, bioplyn,
- plyny vysoce výhřevné – spalné teplo na 80 MJ/m_N^3 – propan, propan-butan, butan.

Tab. 5.1 – Vlastnosti spalitelných plynů vyskytujících se v palivech

Plyn	Sumární vzorec	HHV [MJ/m_N^3]	LHV [MJ/m_N^3]	$W_{b,vyšší}$ [MJ/m_N^3]	Dolní mez zápalnosti [%]	Horní mez zápalnosti [%]	Rychlost spalování [cm/s]
Vodík	H_2	12,74	10,78	48,34	4	77	346
Oxid uhelnatý	CO	12,63	12,63	12,85	10,9	76	20
Metan	CH_4	39,83	35,89	53,47	4,4	16,5	43
Acetylen	C_2H_2	58,57	56,59	61,51	2,3	78	168
Ethylen	C_2H_4	63,43	59,48	64,23	2,3	32,5	78
Etan	C_2H_6	70,33	64,38	68,7	2,7	14,7	49
Propylen	C_3H_6	93,6	87,59	76,93	2	11,1	55
Propan	C_3H_8	101,14	93,12	81,12	1,7	10,9	47
n-Butan	C_4H_{10}	134,11	123,86	92,65	1,4	9,3	45

Nejen u nízko-výhřevných plynů, ale u plyných paliv obecně, se určují dolní a horní hranice zápalnosti. Tyto hranice jsou důležité pro nalezení optimálního poměru paliva se vzduchem jak pro zapálení, tak pro dlouhodobý provoz. Při vybočení z daných mezí může docházet ke zhasínání plamene anebo k zapálení vůbec nedojde. Meze zápalnosti spalných složek jsou spolu s jejich dalšími vlastnostmi uvedeny v Tab. 5.1 [58, 59].

5.1 Bioplyn

V České republice se v posledních letech do výstavby bioplynových stanic investovaly nemalé prostředky. Rozmach zapříčinily zejména výhodné dotační programy a také výhodné výkupní ceny elektřiny. Bioplyn jako takový však není ve světě žádnou novinkou. Anaerobní rozklad rostlinných a také živočišných látek je znám již dlouhou dobu.

První zmínky o průmyslovém využití bioplynu se objevují na přelomu 19. a 20. století. Jako první je dochovaná zmínka o čištění vody v uzavřených nádobách v anglickém městě Exeter. Až později se rozšiřuje tento způsob čištění kalů i do USA. Začátek dvacátého století byl ve znamení různých návrhů nádrží a usazováků, nicméně první ekonomicky rentabilní zařízení bylo vybudováno v roce 1924 v čistírně vod v německém Essenu. Bioplyn vznikající při čištění sloužil jako palivo ohřevu otopného systému, díky čemuž se podařilo zintenzivnit proces fermentace, což vedlo k dalšímu rozšíření technologie. Třicátá léta byla ve znamení vývoje fermentačních zařízení. Výzkum byl však na nějakou dobu utlumen z důvodu druhé světové války. Výraznější oživení myšlenky pro využití bioplynu přišlo až v šedesátých letech dvacátého století, což podpořil nárůst počtu obyvatelstva v Evropě a jejich zvýšená produkce odpadů. V 70 letech se tato technologie začala cíleně používat pro zplynování biomasy [60].

Jako bioplyn je nejčastěji označována směs různých plynů vzniklých rozkladem organické hmoty bez přítomnosti kyslíku. Podle vstupního materiálu dosahují bioplyny různého složení. Podle vstupního materiálu a také zvolené technologie výroby se různí i složení bioplynů jak je uvedeno v Tab. 5.2 [61–63]. Typické plodiny používané pro výrobu bioplynu jsou uvedeny v Tab. 5.3 včetně toho, co daná rostlina obsahuje [64].

Tab. 5.2 – Složení různých druhů bioplynu

	Skládkový plyn	Bioplyn (ČOV)	Bioplyn z prasečí kejdy	Bioplyn z palmového oleje	Bioplyn 2 (ČOV)	Skládkový plyn	Bioplyny
H ₂ [%obj.]	1	1	–	–	–	–	0–3
CH ₄ [%obj.]	49	61	69	60–70	55–65	45–55	45–75
CO [%obj.]	1	–	–	–	–	–	–
O ₂ [%obj.]	3	–	–	–	–	–	–
N ₂ [%obj.]	–	–	–	–	–	5–15	1–3
CO ₂ [%obj.]	46	48	31	30–40	35–45	30–40	25–48
H ₂ S [mg/m ³]	350	1000	2300	–	–	–	0,1–1 [%]
NH ₃ [%obj.]	–	–	stopové množství	–	–	–	stopové množství
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	16,9	21,1	24	20,4–23,8	18,7–22,1	15,3–18,7	15,8–25,5

Tab. 5.3 – Suroviny běžně používané pro výrobu bioplynu

Zdroj suroviny	Organické složení	Poměr C:N	Organická sušina (OS) [%]	Těkavé látky v OS [%]	Nežádoucí fyzické nečistoty	Další nežádoucí látky
Prasečí kejda	Uhlovodíky, bílkoviny, tuky	3–10	3–8	70–80	Hoblíny, prasečí štětiny, voda, písek, provazy	Antibiotika, desinfekce
Kravská kejda	Uhlovodíky, bílkoviny, tuky	6–20	5–12	80	Štětiny, hlína, voda, dřevo, sláma	Antibiotika, desinfekce, NH ₄ ⁺
Slepičí kejda	Uhlovodíky, bílkoviny, tuky	3–10	10–30	80	Štěrk, písek, peří	Antibiotika, desinfekce, NH ₄ ⁺
Syrovátka	75–80% laktóza, 20–25% bílkoviny	–	8–12	90	Nečistoty z dopravy	–
Zahuštěná syrovátka	75–80% laktóza, 20–25% bílkoviny	–	20–25	90	Nečistoty z dopravy	–
Odpadní voda	Uhlovodíky	4–10	1–5	80–95		
Sláma	Uhlovodíky, tuky	80–100	70–90	80–90	Písek, štěrk	
Odpad ze zahrady	–	100–150	60–70	90	Hlína, celulóza	Pesticidy
Tráva	–	12–25	20–25	90	Štěrk	Pesticidy
Odpad z ovoce	–	35	15–20	75		
Rybí tuk	30–50% tuky	–	–	–		
Sójový olej	90% rostlinný tuk	–	–	–		
Alkohol	40% alkohol	–	–	–		
Zbytky jídel	–	–	10	80	Kosti, plasty	Desinfekce

5.1.1 Výroba bioplynu

Samotný proces produkce bioplynu může probíhat samovolně anebo za použití anaerobních bakterií, které rozkladný proces urychlí. Pokud se jedná o čistírenské kaly, ze kterých vzniká bioplyn, může být fermentace označována pojmy, jako jsou anaerobní digesce, biometanizace, biogasifikace anebo vyhnívání. Výroba bioplynu zahrnuje čtyři fáze, jedná se o hydrolyzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi [60, 64]:

- Hydrolyza – během první fáze dochází pomocí anaerobních bakterií k rozpadu lipidů (tuků), proteinů (bílkovin) a polysacharidů na jednoduché cukry a mastné kyseliny.
- Acidogeneze – následuje další rozklad. Tentokrát se rozkládají produkty první fáze na jednodušší sloučeniny, konkrétně na kyseliny s kratšími řetězci (kyselina máselná, propionová) a dále se uvolňuje oxid uhličitý a vodík. Stejně jako v první fázi mohou bakterie pracovat za přítomnosti kyslíku, což vede k vytvoření ideálních podmínek pro tvorbu metanu. Během této fáze se uvolňuje také vodík a oxid uhličitý.
- Acetogeneze – kyseliny a alkoholy se rozkládají a vzniká kyselina octová.
- Metanogeneze – tato fáze se ještě dále rozděluje na část acetotrofní a hydrogení. V acetotrofní fázi je vytvořeno asi 60 % z celkového množství metanu. Metan je

zde přetvářen z kyseliny octové, za předpokladu, že jsou udrženy konstantní podmínky pH v rozmezí 6,5 - 7,5. V hydrogení fázi je pak vodík přetvořen na metan a oxid uhličitý.

Aby mohla správně probíhat produkce bioplynu, je zapotřebí vytvořit ideální podmínky, zejména zabránit přístupu kyslíku, zalít substrát vodou, udržovat správnou hodnotu pH, zajistit promíchávání vsázky a udržovat optimální teplotu.

5.1.2 Úprava bioplynu

Když je dokončen proces tvorby bioplynu, dochází v dalším kroku k odstranění nežádoucích příměsí a látek, které se do bioplynu dostaly společně se vsádkou. Nejčastěji se jedná o síru a vodu [65, 66].

5.1.3 Odstranění vody a vodních par

První odstranění proběhne již v zásobníku vyprodukovaného plynu. Plyn se zde ochlazuje na teplotu okolního prostředí, čímž dochází ke snížení rosného bodu a voda, která je v plynu navázána začne kondenzovat. Proto je na začátku potrubí umístěn odlučovač kondenzátu. Zde je nutné zachovat správný sklon potrubí tak, aby mohl kondenzát samovolně stékat k odlučovači. Během této fáze dochází i k redukci obsahu arsenu a křemíku.

5.1.4 Odsíření

Aby mohl být používán bioplyn jako alternativní palivo, je zapotřebí odstranit i co největší množství síry, aby nedocházelo k reakci síry s vodními parami a vzniku kyseliny sírové, která by mohla porušit zařízení. Množství síry, které se vyskytuje v bioplynu je určováno na základě složení vstupních surovin [67]. Jsou známé tři metody odsíření, a to metoda suchá, mokrá a bioodsíření [65, 66].

Suchá metoda spočívá v použití aktivního uhlí jako adsorbentu. Používají se různé typy uhlí ošetřené impregnací, které umožní rozklad sirných látek na elementární síru bez nutnosti přítomnosti kyslíku. Síra je zachycována pomocí katalytické reakce [65, 66].

Mokrá metoda využívá absorpčních vlastností kapalin a reakce mezi rozpustným plynem a rozpouštědlem. Oproti suchému praní je tato metoda finančně náročnější, ale rozpouštědlo je možné recyklovat a používat znovu. Pro mokré metody se mohou používat alkalické roztoky, suspenze sloučenin těžkých kovů, organická rozpouštědla (metanol) anebo organické systémy na bázi fenolů [65, 66].

Biologické odsíření zahrnuje biologickou oxidaci v pracím roztoku, kde se sulfan zachycuje, dále také využití kolon a vypírání sulfanu ve zkrápěné koloně, biologickou oxidaci sulfanu a také biochemickou oxidaci. Poslední dvě metody probíhají přímo v reaktoru [65, 66].

5.1.5 Skladování

Bioplyn je skladován v tlakových zásobnících, které se dělí podle provozního tlaku: nízký, střední, vysoký. Bioplyny potom mohou být používány stejným způsobem jako zemní plyn a buďto jsou dopravovány v zásobnících nebo potrubím přímo na místo spotřeby. Zde se bioplyn spaluje a uvolněná tepelná energie je využita buď pro ohřev procesní látky anebo v případě použití kogenerační jednotky pro výrobu elektrické energie [65].

5.2 Koksárenský plyn

Koksárenský plyn je vedlejší produkt koksárenského procesu. Z 1000 kg uhlí je možné získat ca. 325 m³ koksárenského plynu v závislosti na složení uhlí a době koksování. Díky obsahu vodíku, metanu a oxidu uhelnatého se koksárenský plyn řadí mezi středně výhřevné plyny. Mimo tyto plyny, však může koksárenský plyn obsahovat i dehet, lehký olej, síru a také čpavek. Výslednou kvalitu plynu ovlivňuje zejména složení zemního uhlí, přičemž výtěžnost se pohybuje mezi 12 - 25 m³/hod/t uhlí [68].

5.2.1 Produkce koksárenského plynu

Koksárenský plyn se z uhlí uvolňuje v rámci procesu koksování, který probíhá při teplotách 1000 – 1100 °C (vztaženo ke středu uhelné vsázky). Uhlí je těmito teplotám vystaveno po dobu 14 – 24 hodin v závislosti na rozměrech pece. Surové uhlí obsahuje celou řadu látek, které mohou nepříznivě ovlivnit transport koksárenského plynu, jedná se zejména o dehet a naftalen. Tyto látky mohou způsobit zanášení potrubí a zařízení. Dále se zde nachází velké množství síry a čpavku, které je také potřeba odstranit, aby nedocházelo ke korozi způsobené kyselým prostředím [68].

Plyn má při výstupu z pece teplotu ca. 800 °C, pro další zpracování je ochlazován čpavkovou vodou tak, aby bylo dosaženo teploty 80 °C. Vzniklá kapalná fáze je odvedena do zařízení separující dehet, který se dále používá jako surovina pro výrobu asfaltu nebo různých olejů. Aby došlo ke zkondenzování nežádoucích sloučenin, jako jsou voda a zbylé těžké uhlovodíky, ochlazuje se plyn zbavený dehtu v tzv. koncových chladičích [68].

Takto očištěný plyn je nutné dále zbavit organických příměsí na bázi síry (sirouhlík, merkaptany, atd.) některou z metod pro odsíření. K dispozici jsou stejné metody jako v případě odsířování bioplynu – suchá a mokrá metoda. Nevýhodou suché metody jsou vyšší pořizovací náklady, ale na druhou stranu odpadá problém s kontaminovanou vodou, která vzniká u mokré metody. Některé podniky využívají tuto separaci síry k výrobě čisté elementární síry [68].

Stejně jako síru, je nutné odstranit čpavek, který pochází jednak ze surového uhlí, ale také z kondenzátu. Čpavek je možné odstraňovat několika postupy, a to pomocí vypíracího okruhu anebo přímou rekuperací. Vyčištěný koksárenský plyn se používá jako palivo buď přímo v koksovacích pecích, anebo v přidruženém procesu. Složení uvádí Tab. 5.4 [68, 69].

Tab. 5.4 – Složení různých druhů koksárenských plynů

	Koksárenský plyn 1	Koksárenský plyn 2
H ₂ [%obj.]	57,5	39–65
CH ₄ [%obj.]	22,5	32–42
C _x H _y [%obj.]	–	3–8,5
CO [%obj.]	6,8	4–6,5
O ₂ [%obj.]	0,8	–
N ₂ [%obj.]	7,8	–
CO ₂ [%obj.]	2,3	2–3
NH ₃ [%obj.]	–	stopové množství
Další (H ₂ S, atd.) [%]	2,3	3–4
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	16,3	18–24

5.3 Vodní plyn

Vodní plyn vzniká podobným způsobem jako koksárenský plyn. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma plyny je použitý vstupní materiál. Zatímco u koksárenského plynu se používá surové uhlí, pro vodní plyn je použit produkt koksárenského procesu, a to čistý koks. Při vzniku vodního plynu je využíváno faktu, který lidstvo získalo díky rozvoji hutnictví železa, a to reakce uhlíku s vodou. Při teplotách 400 – 500 °C (při použití katalyzátoru) nebo 1000 – 1100 °C (bez použití katalyzátoru) se koks zplyňuje vodní párou za vzniku vodíku a oxidu uhličitého podle následujících rovnic [70, 71]:



Zpracování vodního plynu je velmi totožné s plynem koksárenským, protože stejně jako koksárenský plyn může obsahovat síru, čpavek nebo dehtové frakce. Po vyčištění je vodní plyn spalován v procesních pecích anebo je použit jako surovina pro výrobu vodíku [71]. Složení vodního plynu je uvedeno v Tab. 5.5 [56, 69].

Tab. 5.5 – Složení a výhřevnosti různých druhů vodních plynů

	Vodní plyn 1	Vodní plyn 2
H ₂ [%obj.]	49,5	51
CH ₄ [%obj.]	1	0,5
C _x H _y [%obj.]	–	–
CO [%obj.]	41	38
O ₂ [%obj.]	–	0,2
N ₂ [%obj.]	4	4
CO ₂ [%obj.]	4,5	6,3
NH ₃ [%obj.]	–	–
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	10,9	10,5

5.4 Vysokopecní plyn

Stejně jako v případě vodního a koksárenského plynu je vysokopecní plyn (označován také jako kychtový plyn) vedlejší produkt vznikající při výrobě surového železa. Do vysoké pece jsou dodávány suroviny, které obsahují železo ve formě železné rudy, aglomerátů a pelet, dále jsou také přidávána aditiva (vápenec) pro vytvoření strusky a redukční činidla (koks). Veškeré vstupní materiály a přísady jsou do vysoké pece distribuovány pomocí zavážecího systému, aby vysokopecní plyn nemohl unikat. Do prostoru pece je vháněn horký vzduch obohacený o redukční činidla. Tato směs vytváří CO, která redukuje oxidy železa na kovové železo. Při této výrobě je hlavním produktem tekuté železo a jako vedlejší produkt vzniká vysokopecní plyn bohatý na CO a inertní plyny (dusík, oxid uhličitý) [68, 72]. Typická složení jsou uvedena v Tab. 5.6 [56, 69, 72–74].

Plyn je zapotřebí před použitím jako paliva pro výrobu elektrické energie či tepla upravit, zejména očistit od prachových částic. První krok, ve kterém jsou odstraněny největší nečistoty, se nazývá hrubé čištění. Toto čištění probíhá za sucha, buď v prašnicích, nebo cyklonech. Dalším krokem je tzv. polojemné čištění, které se již řadí mezi mokré metody čištění. Plyn může být skrápěný v kolonách anebo ve Venturiho pračkách, kde kapalina

vytvoří hustou mlhu, přes kterou je plyn prohnán. Těžké částice jsou obaleny vodou a odloučeny. Posledním krokem je ionizace plynu, kde je plyn přiveden mezi dvě elektrody s velkým rozdílem stejnosměrného napětí. Plyn na výstupu obsahuje minimální množství prachu [68]. Takto vyčištěný plyn se již energeticky využívá opětovně v provozu vysokých pecí, v koksovárnách, válcovnách, podružné hutní výrobě či teplárnách a elektrárnách [75].

Vysokopecní plyn obsahuje značné množství oxidu uhelnatého (CO) a lze jej spalovat. Svým složením a způsobem vzniku se vysokopecní plyn přibližuje chudému generátorovému plynu, liší se však vyšším obsahem CO [68].

Tab. 5.6 – Složení a výhřevnosti různých druhů vysokopecních plynů

	Vysokopecní plyn 1	Vysokopecní plyn 2	Vysokopecní plyn 3	Vysokopecní plyn 4	Vysokopecní plyn 5
H ₂ [%]	1	2,5	1,5–3	2	2,7
CH ₄ [%]	–	0,5	0,2–0,5	0,4	0,3
C _x H _y [%]	–	–	–	–	–
CO [%]	28	28	25–30	26	28
O ₂ [%]	–	–	0,2–0,4	–	–
N ₂ [%]	59	59	55–60	59,6	58,5
CO ₂ [%]	12	10	9–12	12	10,5
NH ₃ [%]	–	–	–	–	–
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	3,45	3,8	3,3–4,2	3,66	3,9

5.5 Generátorový plyn

Z důvodů lepší využitelnosti energie ukryté v biomase se přistupuje k její parciální oxidaci neboli zplynování. Výsledným produktem zplynování je generátorový plyn, který našel své využití při výrobě elektrické energie (palivové články, plynová turbína, atd.) nebo slouží také jako alternativní palivo v řadě průmyslových aplikací např. rozklad pevných paliv a odpadů na jednodušší látky nebo jako palivo pro Stirlingův motor [76].

Zplynováním je myšlen rozklad (termochemická konverze) tuhé nebo kapalné látky na uhlíkové bázi. Ke zplynování se nejčastěji používá vzduch, čistý kyslík nebo vodní pára. Takto získaný plyn může nabývat různých složení v závislosti na zplynované surovině a použitém typu zařízení. Výsledný plyn může zahrnovat výhřevné složky (H₂, CO, CH₄, atd.), inertní složky (CO₂, H₂O, N₂) a také složky nežádoucí (dehet, prach, síra, chlór). Složení některých generátorových plynů je shrnuto v Tab. 5.7 [56, 76, 77].

Aby bylo možné získat generátorový plyn, musí vstupní materiál projít několika různými kroky, a to sušením, pyrolýzou, redukcí a oxidací. Tyto procesy mohou probíhat buď postupně, tj. každý v jiném zařízení, nebo současně v jednom zařízení, např. ve fluidních a hořákových generátorech. Do zařízení je nutné dodávat teplo buď přímo částečným spalováním biomasy nebo nepřímo např. přes teplosměnnou plochu, fluidní vrstvou nebo přehřátým zplynovacím médiem. Po dodání tepla dochází k sérii chemických reakcí. Při reakci probíhá oxidace uhlíku, jenž probíhá velmi rychle a dodává energii celému procesu. Následujícím krokem je redukce, kterému dominují reakce vodního plynu a Boudouardova reakce. Při pyrolýze pak dochází k separování prchavé hořlaviny paliva a také k rozložení vstupní organické hmoty. V posledním kroku je oddělena voda od zbytku plynu, proto je

tato fáze nazývána sušení. Stejně jako u všech předchozích plynů je nutné i tento plyn vyčistit. Mezi generátorové plyny často bývá řazen i vodní plyn, který vzniká zplyňováním koksu [76].

Tab. 5.7 – Složení a výhřevnosti různých druhů generátorových plynů

	Generátorový plyn z uhlí 1	Generátorový plyn z uhlí 2	Generátorový plyn zplyňovaný vzduchem	Generátorový plyn zplyňovaný párou	Generátorový plyn zplyňovaný paro-kyslíkovou směsí
H ₂ [%obj.]	2	1,2	11–16	35–40	25–30
CH ₄ [%obj.]	3,9	1,3	3–6	9–11	8–10
C _x H _y [%obj.]	0,2	–	–	–	–
CO [%obj.]	23,4	25	13–18	25–30	30–35
O ₂ [%obj.]	–	–	–	–	–
N ₂ [%obj.]	59,6	55,5	45–60	<1	<1
CO ₂ [%obj.]	12	17	12–16	20–25	23–28
NH ₃ [%obj.]	–	–	–	–	–
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	5,93	3,56	4–6	12–14	12–15

5.6 Konvertorový plyn

Do konvertoru se přivádí plynný kyslík, kterým se dmýchá lázeň surového železa. Přivedený kyslík reaguje s prvky obsaženými v železné rudě (C, Mn, Si a P), čímž se spustí celá série reakcí. Tyto reakce způsobují navýšení teploty v konvertoru na požadovanou teplotu a zároveň dochází k uvolňování množství plynných složek (CO, H₂, CO₂ a N₂). Složení plynu se pak může lišit v závislosti na tom, v jaké fázi procesu je plyn odebrán. Například plyn, který je označován jako primární konvertorový plyn, může obsahovat až 90 % CO a 10 % CO₂. Z počátku převládá CO₂, nicméně v průběhu dmýchání klesá jeho objem až na 8 %. Po výstupu z konvertoru je plyn smíchán se vzduchem, díky čemuž dochází ke spálení plynu. Tento proces je v průmyslu různě upraven tak, aby docházelo k co nejnižší oxidaci oxidu uhelnatého na oxid uhličitý. Průměrné složení konvertorového plynu je uvedeno v Tab. 5.8 [75].

Tab. 5.8 – Složení konvertorového plynu

	Konvertorový plyn
H ₂ [%obj.]	0–3
CH ₄ [%obj.]	–
C _x H _y [%obj.]	–
CO [%obj.]	65–90
O ₂ [%obj.]	0–3
N ₂ [%obj.]	2–20
CO ₂ [%obj.]	10–20
NH ₃ [%obj.]	–
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	8,2–11,6

Konvertorový plyn obsahuje po výstupu z konvertoru různé množství nečistot, zejména prachových částic. Množství prachu může tvořit 1 – 2 % hmotnosti vsázky a jeho granulometrické složení je závislé na způsobu dmýchání kyslíku a zavádění přísad do konvertoru. Prach mohou tvořit částice Fe, FeO a také Fe₂O₃. Po odstranění všech nepatřičných, zejména prachových částic, je možné plyn použít pro teplotářské nebo elektrářské účely [75].

5.7 Feroslitinový plyn

Při výrobě feritických slitin ve vysokých a obloukových pecích se uvolňuje feroslitinový plyn, který je zde odpadní látkou. Velmi často se v poslední době využívají tzv. elektrické obloukové pece, kde tento plyn nemá využití, proto je odváděn do jiných procesů. Vstupní surovinou pro výrobu plynu jsou rudy kovů redukované uhlíkem, křemíkem a hliníkem. Výrobní proces a následné čištění je velmi podobné jako u předchozích plynů, stejně tak i jeho využití. Složení tohoto plynu je uvedeno v Tab. 5.9 [75]

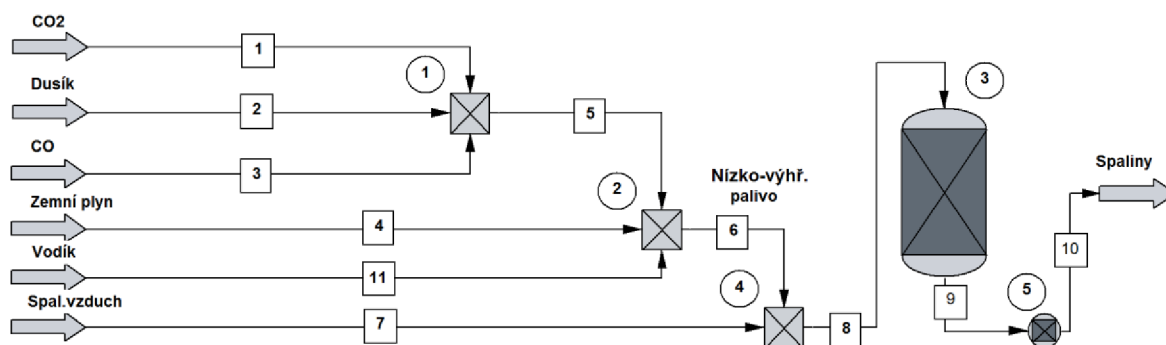
Tab. 5.9 – Složení feroslitinového plynu

S	Feroslitinový plyn
H ₂ [%obj.]	2–12
CH ₄ [%obj.]	1–2
C _x H _y [%obj.]	–
CO [%obj.]	60–88
O ₂ [%obj.]	–
N ₂ [%obj.]	1–3
CO ₂ [%obj.]	5–20
NH ₃ [%obj.]	–
Výhřevnost [MJ/m _N ³]	8,5–12

6 Simulace

Simulace měla primárně posloužit jako nástroj k pochopení paliv z hlediska jejich fyzicko-chemických vlastností a správně dimenzovat směšovací stanici (Kapitola 8) pro případné další využití. Měníci se složení paliva se odráží na jejich výhřevnosti, zápalných mezích, hustotě, objemu atd., proto bylo zapotřebí o nich získat detailnější znalosti. S ohledem na vývoj a výzkum v oblasti nízko-výhřevných paliv byla simulace v druhé fázi využita při návrhu hořákové vestavby (Kapitola 10) a následně pro analýzu vlastností skutečně spalovaných paliv (Kapitola 11.8). V neposlední řadě může výpočtový model na základě znalosti adiabatické spalovací teploty poskytnout i informace cenné pro odhad tvorby oxidů dusíku.

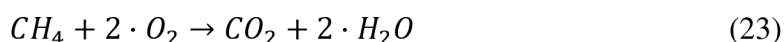
Pro výpočty byl použit bilanční software CHEMCAD, ve kterém byla všechna paliva nasimulována a vypočítána pro ověření jejich fyzicko-chemických vlastností. Schéma modelu je zobrazeno na Obr. 6.1. Proudů označené čísly 1, 2, 3, 4 a 5 odpovídají složkám paliva použitých pro výpočty. Plyny jsou postupně smíchány v mixérech (zařízení označená čísly 1 a 2) a postupně vytváří nízko-výhřevné palivo ve schématu označeném jako proud 6. Posléze v zařízení označeném jako číslo 4 dochází ke smíchání se spalovacím vzduchem (proud č. 7). Takto připravená směs vstupuje do spalovací komory (zařízení č. 3). Spalovací komora je zde navržena jako rovnovážný reaktor, který dokáže simulovat chemické reakce mezi vstupními složkami. Produktem vycházejícím z reaktoru jsou spaliny (proud č. 10), jejichž složkami jsou vodní pára, oxid uhličitý a inertní plyny, které se nezúčastnily procesu spalování. Zařízení označené číslem 5 je jednotka „Controller“, která umožňuje zpětně regulovat objemový průtok proudu spalovacího vzduchu, tak aby byla zajištěna konstantní výstupní koncentrace kyslíku ve spalinách, a to 3 %obj., což odpovídá přebytku vzduchu $\alpha = 1,15$.



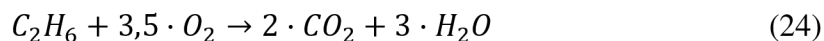
Obr. 6.1 – Schéma procesu v software CHEMCAD

V reaktoru (zařízení č. 3) byly jednotlivé reakční rovnice definovány pomocí stechiometrických koeficientů a stupně konverze. V simulaci byla předpokládána úplná konverze vstupujících látek (složky paliva a kyslíku) na produkty, kterými jsou v případě spalování oxid uhličitý a vodní pára. Další ze zadávacích podmínek bylo, že definované reakce probíhají paralelně, protože program neumožňuje vzít v potaz kinetiku reakcí, vznik radikálů a postupný rozpad. Spalování se zadaným přebytkem vzduchu je pak řešeno pomocí jednotky „Controller“.

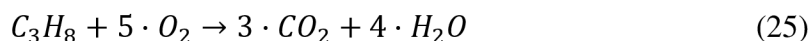
Spalovací rovnice metanu:



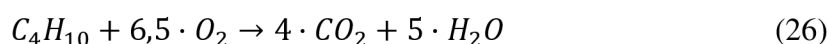
Spalovací rovnice etanu:



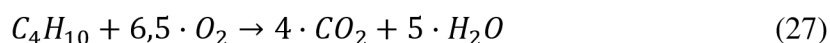
Spalovací rovnice propanu:



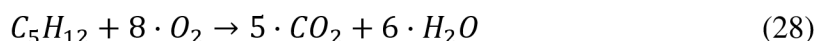
Spalovací rovnice n–butanu:



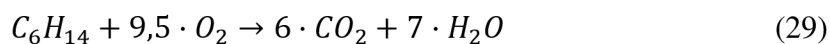
Spalovací rovnice iso–butanu:



Spalovací rovnice pentanu:



Spalovací rovnice hexanu:



Spalovací rovnice oxidu uhelnatého:



Spalovací rovnice vodíku:



6.1 Vybraná paliva

Aby směšovací stanice byla co nejuniverzálnější a umožnila namíchat různá paliva, byly pro tuto studii byly vybrány plyny, reprezentující tři skupiny nízko-výhřevných plynů: bioplyn, generátorové plyny a uhelný plyn. Každý z plynů je charakteristický svým složením, což se pak následně odráží na rozdílných spalovacích vlastnostech. Těmi jsou stabilita plamene, emise anebo schopnost přenášet teplo. Vybrané plyny jsou složeny ze spalných složek (jako jsou CH_4 , H_2 a CO) a také inertních plynů (jako jsou N_2 a CO_2). Plyny, které nejsou v místě primárního využití směšovací stanice běžně k dispozici (H_2 , CO_2 , N_2), budou dodány ve svazcích lahví, zatímco CH_4 bude z ekonomických důvodů nahrazen

tranzitním zemním plynem, který je již přivedený. V České republice je zemní plyn složen z 97 % obj. metanem. Výpočet vyššího Wobbého čísla pro metan přinesl výsledek ca. 50,7 MJ/m³, zatímco pro dostupný zemní plyn vyšla hodnota 50,5 MJ/m³. Vypočtené hodnoty jsou velmi blízké, což znamená, že je možné je zaměnit. Wobbého číslo bylo vypočítáno na základě normy vydané Českým normalizačním institutem [78]:

$$W^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{HHV_s^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{SG^0}} \quad (32)$$

kde W je Wobbého číslo [MJ/m³],
 HHV je spalné teplo ideálního plynu na objemovém základě [MJ/m_N³],
 SG je relativní hustota [-].

Wobbého číslo je důležité pro posouzení záměnnosti jednotlivých typů paliv. V Tab. 6.1 [59] jsou definovány třídy na základě vypočteného Wobbého čísla. Platí pravidlo, že paliva je možné v rámci tříd zaměňovat, bez toho aniž by byl ovlivněn provoz hořáku. Složení a parametry jednotlivých plynů, tak jak byly vypočítány v CHEMCADu jsou přehledně seřazeny v Tab. 6.2. Jak již bylo zmíněno, tato práce má za cíl porovnat spalování zemního plynu a jiných alternativních nízko-výhřevných paliv, proto palivo označené (1) je zemní plyn, který je zároveň referenčním palivem.

Tab. 6.1 – Rozdělení do tříd podle Wobbého čísel

Třídy paliv	Vyšší Wobbého číslo při 15 °C a 101,325 kPa [MJ/m ³]	
	nejmenší	největší
I. Třída	22,4	24,8
II. Třída	39,1	54,7
III. Třída	72,9	87,3

6.2 Vyhodnocení simulace

Plyny označené (2) – (6) spadají do skupiny bioplynů. Vzájemně se od sebe odlišují zejména složením. Hlavním rozdílem mezi bioplyny (2) – (5) je množství CO₂, které se mění v rozpětí 30 – 60 % obj. Se zvyšující se koncentrací dochází ke snižování výhřevnosti (LHV) a také Wobbého čísla. Z předchozích výzkumů vyplývá, že směsi obsahující vysoký obsah CO₂ je obtížné zapálit. To je způsobeno pozměněnými mezemi zápalnosti konkrétního typu paliva. V porovnání se zemním plynem obě meze zápalnosti narostly, avšak současně nedošlo ke zvětšení jejich rozpětí. To znamená, že pokud by mělo být toto palivo použito pro zapálení, je potřeba upravit i zápalný bod na hořáku. Zvýšený obsah oxidu uhličitého také způsobil změnu adiabatické teploty plamene (ATP)*, která se snížila téměř o 200 °C, pokud jsou porovnány bioplyny se obsahem CO₂ 30 – 60 % obj. Největší rozdíl v ATP (273 °C) je možné pozorovat mezi zemním plynem a bioplynem (4).

Poslední bioplyn (6) má složení 50 % obj. CH₄, 40 % obj. CO₂ a 10 % obj. N₂. Celkový obsah inertních plynů je shodný s bioplynem (4), stejně tak jsou velmi podobné LHV a meze

* Adiabatická neboli teoretická teplota plamene je nejvyšší možná teplota spalin dosažená při dokonalém spálení směsi uhlodíků a vzduchu (kyslíku) v adiabatických podmínkách (v dokonale izolovaném prostoru) [79]

zápalnosti, Wobbeho číslo se však mírně odlišuje. I přesto, že tyto plyny jsou z hlediska chemického složení velmi podobné, tak v parametrech jako jsou vlastnosti plamene, výsledné emise a tepelné toky, se mohou značně lišit.

Generátorové plyny se od bioplynu odlišují množstvím a složením spalitelných složek. Generátorový plyn, označený jako (7), obsahuje vysoký podíl nehořlavých složek (60 % obj. N_2), zatímco zbývajících 40 % obj. je tvořeno 23 % obj. CO, 13 % obj. H_2 a 4 % obj. CH_4 . Kvůli vysokému podílu inertního plynu dosahuje výhřevnost velmi nízké hodnoty $5,8 \text{ MJ/m}_N^3$, Wobbeho číslo u tohoto plynu je $6,8 \text{ MJ/m}_N^3$. Vysoký podíl dusíku měl i vliv na adiabatickou teplotu plamene, která je ze všech nízko-výhřevných plynů absolutně nejnižší ($1503 \text{ }^\circ\text{C}$). Na druhou stranu tato směs disponuje širokým rozsahem zápalnosti.

Celkový obsah inertních plynů ve druhém z generátorových plynů (8) je 24 % obj., což znamená, že má naprosto rozdílné vlastnosti oproti předchozímu plynu. I přesto, že podíl hořlavých složek je 76 % obj. nedosahuje tento plyn vysoké výhřevnosti. Oproti zemnímu plynu je tato výhřevnost třetinová, ale na druhou stranu v porovnání s prvním generátorovým plynem je dvojnásobná. Podobnou statistiku pak získáme i při porovnání Wobbeho čísel. Největší rozdíl je pak patrný při porovnání adiabatických teplot, kde je možné pozorovat rozdíl ca. $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Poslední zástupce generátorových plynů obsahuje největší podíl vodíku (60 % obj.) z porovnávaných generátorových plynů. Další plyny jsou pak zastoupeny v tomto poměru: 22 % obj. CH_4 , 6 % obj. CO a 14 % obj. CO_2 . Pokud je plyn porovnán se zemním plynem, zjistíme, že jeho výhřevnost je zhruba 2,5x nižší, spodní mez zápalnosti je podobná, ale vzhledem k vysoké koncentraci vodíku došlo k nárůstu vyššího zápalného limitu na 40,51 % obj. Na druhou stranu adiabatická teplota plamene je zde vyšší než adiabatická teplota plamene zemního plynu.

Poslední kategorií jsou tzv. koksárenské plyny, které zahrnují dva plyny získané degasifikací uhlí. První z nich neobsahuje téměř žádné inertní plyny, pouze nízkou koncentraci N_2 , který je součástí tranzitního zemního plynu. Na jednu stranu má tento plyn, při porovnání s ostatními zkoumanými plyny, Wobbeho číslo relativně vysoké – $41,6 \text{ MJ/m}_N^3$, zejména kvůli vysokému obsahu vodíku. Na druhou stranu má ale nižší výhřevnost – $19,8 \text{ MJ/m}_N^3$. Ze všech porovnávaných plynů tento plyn dosahuje, kromě vysoké výhřevnosti, také nejvyšší adiabatické teploty spalin ($1847 \text{ }^\circ\text{C}$).

Poslední z vybraných plynů (11) obsahuje 60 % obj. H_2 , 24 % obj. zemního plynu a 16 % obj. inertních plynů. Právě kvůli vyšší koncentraci inertních plynů došlo oproti koksárenskému plynu (10) k poklesu adiabatické teploty plamene, výhřevnosti a také Wobbeho čísla.

Při porovnání vlastností jako ATP je možné očekávat, že u plynů (4–7), které mají ATP nižší, může v tomto důsledku dojít i ke snížení emisí NO_x .

Tab. 6.2 – Složení vybraných nízko-výhřevných plynů a jejich vlastnosti

Složka paliva	Koncentrace ve výsledném palivu [% obj.]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vodík	0	0	0	0	0	0	13,042	37,999	58,001	60,040	60,013
Metan	97,101	68,04	57,992	48,551	38,840	48,592	3,891	9,710	21,517	33,95	23,304
Etan	1,590	1,113	0,954	0,795	0,646	0,797	0,064	0,159	0,350	0,556	0,381
Propan	0,362	0,254	0,21	0,181	0,142	0,184	0,015	0,036	0,081	0,126	0,087
n-Butan	0,057	0,040	0,034	0,028	0,0220	0,029	0,003	0,006	0,013	0,02	0,014
Isobutan	0,061	0,043	0,367	0,031	0,024	0,031	0,003	0,006	0,013	0,021	0,015
Pentan	0,010	0,007	0,006	0,005	0,004	0,005	0,001	0,001	0,002	0,004	0,002
Hexan	0,010	0,007	0,006	0,005	0,004	0,005	0,001	0,001	0,002	0,004	0,002
Oxid uhelnatý	0	0	0	0	0	0	23,044	28,107	5,999	5,001	0,024
Oxid uhličitý	0,100	30,001	40,005	50,051	60,03	40,052	0,004	23,911	14,022	0,032	8,002
Dusík	0,709	0,496	0,425	0,355	0,280	10,355	59,943	0,071	0,156	0,252	8,175
Vlastnosti paliva											
LHV [MJ/m _N ³]	36,3	28,2	21,78	18,15	14,52	18,15	5,76	11,27	15	19,79	16,19
HHV [MJ/m _N ³]	40,3	25,41	24,17	20,14	16,12	20,15	6,17	12,42	17,02	22,37	18,34
LFL [%]	4,95	6,92	7,98	9,43	11,51	9,43	15,39	7,14	5,11	4,45	4,86
HFL [%]	15,01	20,14	22,73	26,1	30,62	26,09	73,94	55,64	40,51	31,2	38,52
Wobbe [MJ/m _N ³]	53,3	30,49	24,79	19,7	15,09	20,25	6,76	14,66	25,76	41,56	31,74
Hustota [kg/m ³]	0,738	1,106	1,164	1,351	1,473	1,279	1,079	0,928	0,564	0,374	0,431
ATP [°C]	1787	1703	1660	1604	1514	1615	1503	1765	1794	1847	1841
Složení spalin											
Oxid uhličitý	8,138	12,652	14,718	18,049	13,264	11,180	16,466	8,338	6,181	6,017	12,652
Kyslík	2,999	3	3	2,999	3	3	2,997	3	3	3	3
Voda	16,957	15,978	15,529	14,806	15,53	9,382	16,232	20,938	20,672	20,887	15,978
Dusík	71,051	67,555	65,959	63,383	67,412	75,822	63,539	66,918	69,312	69,281	67,555
Argon	0,855	0,815	0,794	0,763	0,794	0,616	0,766	0,806	0,835	0,816	0,815

7 Vlastnosti technických plynů

Každý z plynů (oxid uhličitý, dusík a vodík) má odlišné vlastnosti, což je dáno různou strukturou plynů a zastoupením molekul. Souhrnné chemické a fyzikální vlastnosti plynů využitých pro měření jsou uvedeny v Tab. 7.1 [80–84]. Kromě toho je každému plynu věnována vlastní kapitola, kde je stručně rozebrán jejich vliv na životní prostředí, využitelnost a bezpečnosti zásady při jejich použití.

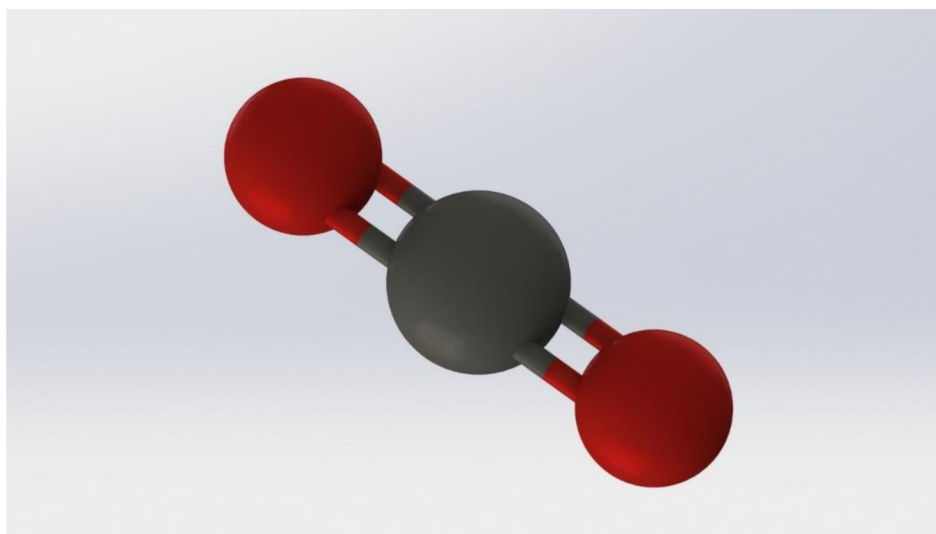
Tab. 7.1 – Vlastnosti inertních plynů a vodíku

Systematický název		Oxid uhličitý	Dusík	Vodík
Sumární vzorec		CO ₂	N ₂	H ₂
Registrační číslo CAS		124-38-9	7727-37-9	1333-74-0
Číslo EINECS		204-696-9	231-783-9	215-605-7
Molární hmotnost	[g/mol]	44,01	28,013	2,0159
Hustota plynu (1.013 barů při bodu varu)	[kg/m ³]	3,813	4,6096	1,3326
Hustota plynu (1.013 barů a 15 °C)	[kg/m ³]	1,8714	1,1848	0,0852
Kompresibilitní faktor – Z (101,3 kPa; 15°C)	[–]	0,99435	0,99391	1,0006
Rozpustnost ve vodě	[mg/l]	2000	20	1,6
Viskozita (při 101,3 kPa a 0°C)	[Pa•s]	1,3711E-06	1,6629E-06	8,3969E-06
Teplota tání	[°C]	–56,57	–11,2	–259,2
Bod varu	[°C]	–78,45	–195,8	–252,78
Výparné teplo (při 101,325 kPa)	[kJ/kg]		204,93	448,69
Kritická teplota	[°C]	30,98	–146,96	–259,2
Kritický tlak	[kPa]	7377	3396	1296
Kritická hustota	[kg/m ³]	467,6	313,3	31,263
Teplota trojného bodu	[°C]	–56,56	–210	–240,01
Tlak trojného bodu	[kPa]	518,7	12,52	0,077
Měrné teplo při konst. tlaku (101,3 kPa; 25 °C)	[J/K•g]	0,0374	0,0292	0,0288
Měrné teplo při konst. obj. (101,3 kPa; 25 °C)	[J/K•g]	0,0289	0,0208	0,0205
Standardní slučovací entalpie ΔH [°]	[kJ/mol]	–393,51		
Koncentrace ve vzduchu	[%]	0,04	78,08	0,00005
Teplota samovznícení	[°C]	–	–	590
Tepelná vodivost (101,3 kPa a 0°C)	[mW/(m•K)]	14,674	24,001	172,58
Mezní hodnoty hořlavosti ve vzduchu	[%]	Nehořlavý	Nehořlavý	475
Barva	[–]	Bezbarvý	Bezbarvý	Bezbarvý
Zápach	[–]	Bez zápachu	Bez zápachu	Bez zápachu
Výbušné vlastnosti	[–]	Neuvádí se	Neuvádí se	Výbušný

7.1 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý má v přírodě svoje nezastupitelné místo, účastní se řady přírodních (fotosyntéza) a biochemických procesů. V poslední době je oxid uhličitý v médiích skloňován zejména v souvislosti s globálním oteplováním. Není žádným tajemstvím, že oxid uhličitý se na globálním oteplení podílí díky vytváření skleníkového efektu. Nutno však podotknout, že na

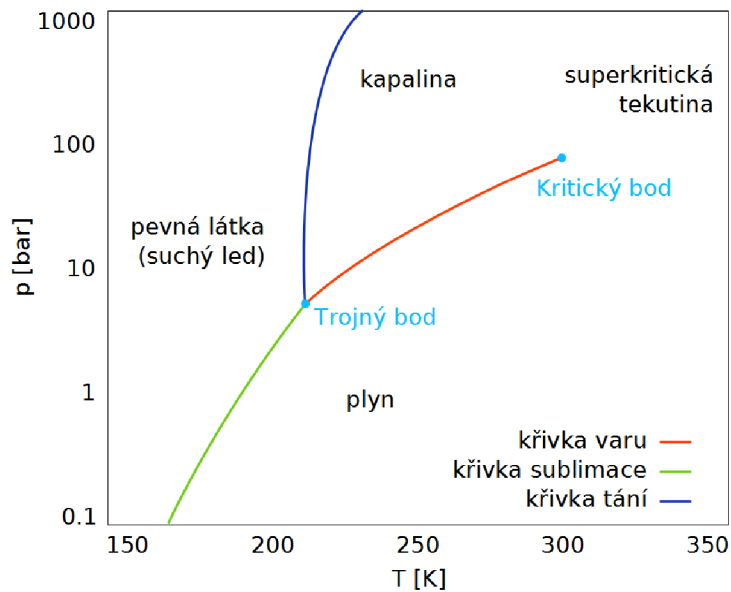
základě některých studií by neexistence skleníkového efektu způsobila pokles průměrné teploty na zemi o 33 °C [85]. Oxid uhličitý má původ v různých spalovacích procesech, může ale také vznikat jako odpad z průmyslové výroby (zpracování ropy, zemního plynu) nebo z fermentačních procesů (výroba bioplynu). [86] Koncentrace oxidu uhličitého podle posledních měření dosahuje 406,66 ppm (NOAA–ESRL) a předpokládá se, že bude dále narůstat (za loňský rok došlo k nárůstu koncentrace o 2 ppm, o rok dříve to byly dokonce 4 ppm) [87]. Proto nejen z tohoto důvodu vzniká řada nových návrhů, jak oxid uhličitý skladovat (ukládání do geologických formací) nebo jak ho dále využít [82]. Molekula oxidu uhličitého je stabilní a má rovinnou strukturu, kdy uhlík na sebe váže atomy kyslíku pomocí dvojných vazeb, jak je patrné z Obr. 7.1.



Obr. 7.1 – Molekula oxidu uhličitého

7.1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Oxid uhličitý je plyn bez barvy a zápachu. Za normálních podmínek (při atmosférickém tlaku) nemůže existovat v kapalném skupenství, vzhledem k vysokému tlaku trojného bodu se může vyskytovat pouze v plynném a pevném skupenství (suchý led), což je patrné z Obr. 7.2 [86]. Oxid uhličitý je za normálních podmínek stabilní, málo reaktivní a je označován jako inertní plyn. Při odebírání zkapalněného plynu ze zásobníku se projevuje Joule–Thomsonův efekt, kdy je inverzní teplota oxidu uhličitého mnohem vyšší než okolní teplota prostředí (a tedy i teplota plynu) a dochází k jeho prudkému ochlazení. Snížení teploty je možné pozorovat na potrubí a na jeho součástech. Čím větší je odběr plynu, tím je ochlazení výraznější a může dojít k úplnému zamrznutí některých částí (dojde k transformaci na suchý led, který naprosto zneprůchodní potrubní trasu) [82].



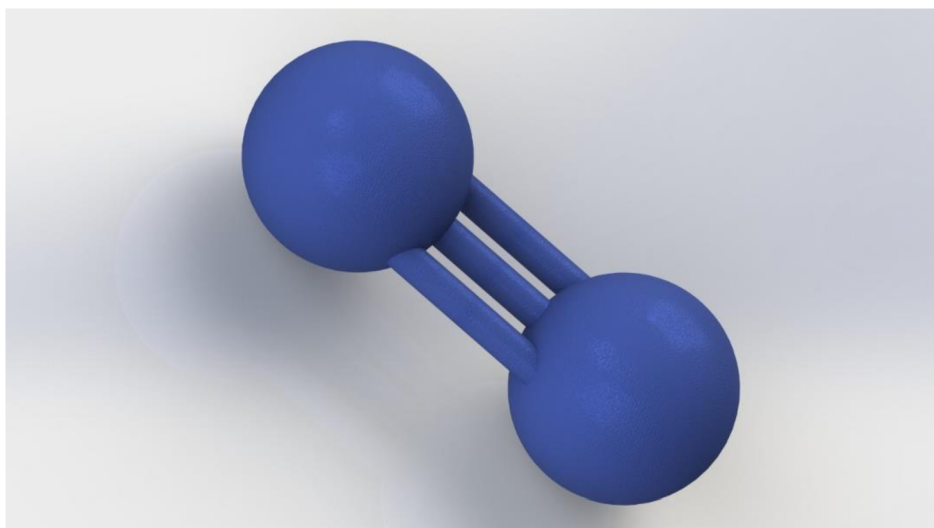
Obr. 7.2 – Fázový diagram oxidu uhličitého

7.1.2 Bezpečnost a přeprava

Oxid uhličitý je zpravidla dodáván jako zkapalněný plyn v bezezvých tlakových láhvích nebo jejich svazcích. Podle aktuální normy ČSN EN 1089–3 se láhve pro přepravu a skladování oxidu uhličitého označují šedou barvou RAL 7037 jak v horní, tak dolní části [88]. V případech, kdy je nutné zajistit kontinuální odběr nebo je požadavek na vysoký průtok, může být plyn dodán v kryogenní cisterně anebo může být vybudován lokální zásobník v místě spotřeby. Oxid uhličitý nevykazuje takové vlastnosti, které definuje legislativa, aby mohl být klasifikován jako nebezpečná látka. Nicméně i tak je nutné během manipulace s oxidem uhličitým dbát bezpečnostních opatření. Kvůli jeho schopnosti ochladit povrchy potrubních celků je zapotřebí použít při manipulaci s nimi ochranných pomůcek (rukavice). Nebezpečí může hrozit při úniku plynu v uzavřeném prostoru. Pokud by byla přítomna obsluha, může způsobit podráždění dýchacího ústrojí a vyvolat hyperventilaci. V nízkých koncentracích (3 – 5 % obj.) se nejedná o nebezpečný stav a nehrozí trvalé následky, může však vyvolat bolesti hlavy. Při koncentracích v rozmezí 8 – 15 % obj. problémy mohou eskalovat bolestmi hlavy, nevolností, zvracením, poruchou rovnováhy nebo až úplnou ztrátou vědomí. Oxid uhličitý je těžší než vzduch a může dojít jeho nahromadění v prohlubních či sklepech. Láhve naplněné oxidem uhličitým by neměly být dlouhodobě vystaveny teplotám nad 50 °C. Přeprava oxidu uhličitého po silnicích se řídí evropskou dohodou o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí – ADR [82].

7.2 Dusík

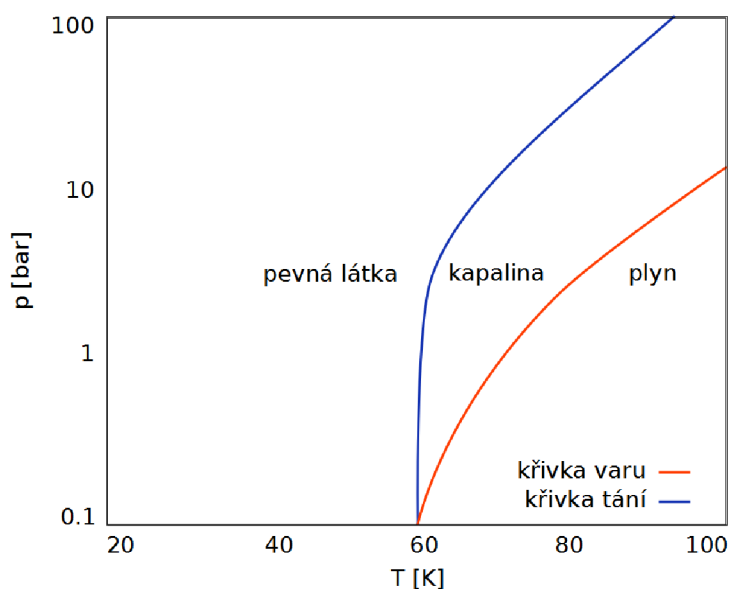
Dusík je jeden z elementárních prvků nacházející se na zemi, vyskytuje se v řadě sloučenin jak pro život prospěšných (tvoří jeden z biogenních prvků), tak i v těch lidstvu neprospěšných. Jeho koncentrace ve vzduchu se pohybuje okolo 78 % v závislosti na konkrétním místě a vlhkosti vzduchu a je nejčtenějším prvkem zemské atmosféry. Kromě toho, že se dusík vyskytuje v řadě přírodních procesů a vytváří množství sloučenin, může se jako inertní plyn vyskytovat v některých palivech. Zejména v těch, které vznikly zplynováním vzduchem. Molekula dusíku je pevně spojena pomocí trojné vazby (Obr. 7.3) a vytváří stabilní molekulu [83].



Obr. 7.3 – Molekula dusíku

7.2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Dusík se v nejčastěji vyskytuje v plynné podobě, což je dáno nízkou teplotou varu (při 1 atm je to $-195,8\text{ °C}$). Pro využití v jiných procesech jako kapalinu je nutné dusík dostatečně ochladit anebo zvýšit tlak tak, aby překonal křivku varu znázorněnou na Obr. 7.4 [89]. Dusík je nehořlavý, netoxický, nevybušný a není charakterizován žádnou specifickou chutí či zápachem. V případě dusíku se v pravém slova smyslu jedná o inertní plyn. S jinými prvky a sloučeninami reaguje, pouze pokud dojde ke zvýšení teploty anebo tlaku. Na druhou stranu atomy dusíku jsou silně reaktivní a je velmi obtížné je uchovat [83]. Podrobnější údaje o fyzikálních a chemických údajích obsahuje Tab. 7.1.



Obr. 7.4 – Fázový diagram dusíku

7.2.2 Bezpečnost a přeprava

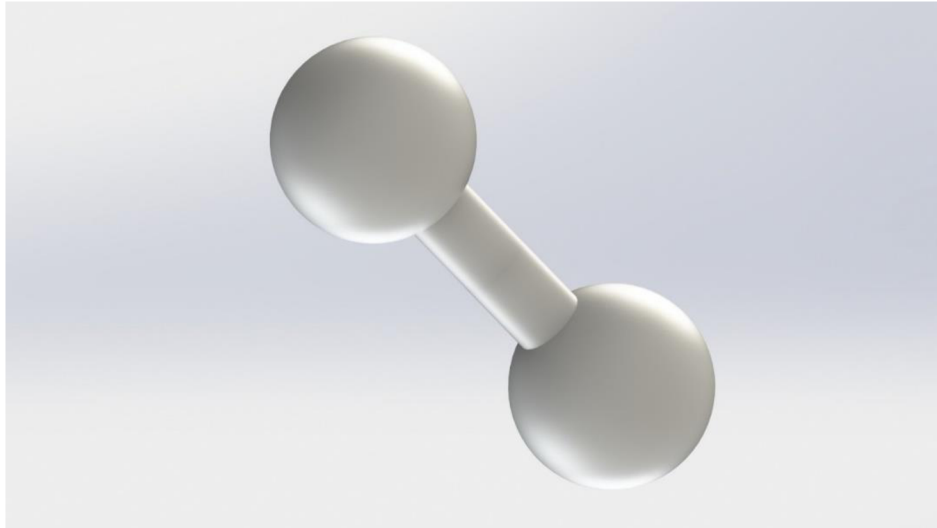
Podobně jako oxid uhličitý je dusík nejčastěji plněn do ocelových bezešvých láhví nebo jejich svazků. Láhve bývají tlakovány na 200 bar, některé novější typy dokonce až na 300 bar. Při těchto podmínkách je dusík v plynném stavu. Dle normy ČSN EN 1089–3 se láhve pro

přepravu a skladování dusíku označují černou barvou RAL 9005 v horní a zelenou RAL 6001 v části dolní [88]. Během odběru ze zásobníku dochází také k ochlazení plynu, který je škrcený redukčním ventilem, ochlazení však není tak výrazné jako u oxidu uhličitého. Pro přepravu kapalného dusíku jsou využívány kryogenní nádoby různých rozměrů, které jsou z pravidla dvouplášťové a jsou vybaveny soustavou plnicích, odběrných a pojistných armatur. Pro další odběr je zapotřebí redukční stanice nebo redukčního ventilu, který dokáže zredukovat tlak na požadovanou hodnotu. Při dodávkách kapalného dusíku bývá také instalován výparník.

Při manipulaci s plynným dusíkem není nutno činit žádná zásadní opatření. Pokud ale dojde k jeho úniku v uzavřeném prostoru, může snížit úroveň kyslíku pod dýchacelnou úroveň. Uzavřené prostory by tedy měly být vybaveny ventilací a čidlem, které zajistí, že nedojde k poklesu kyslíku pod 16 %. Příznaky nedostatku kyslíku se projevují snížením pozornosti, dýchavičností či snížením pozornosti/malátností. V těchto případech je nezbytné zajistit postiženému přívod čerstvého vzduchu. Pokud dojde k dlouhodobější expozici, může postižená osoba upadnout do bezvědomí. V takovém případě je nasnadě poskytnout postiženému umělé dýchání a masáž srdce až do příchodu lékaře. Kapalný dusík při úniku velmi rychle mění skupenství na plynné (kvůli jeho nízkému bodu varu). Mlha, která během vypařování vzniká, může způsobit omrzliny [83]. Stejně jako v případě oxidu uhličitého musí přeprava dusíku splňovat nároky ADR. Manipulaci s tlakovými láhvemi a svazky dusíku upravuje norma ČSN 07 8304 [90].

7.3 Vodík

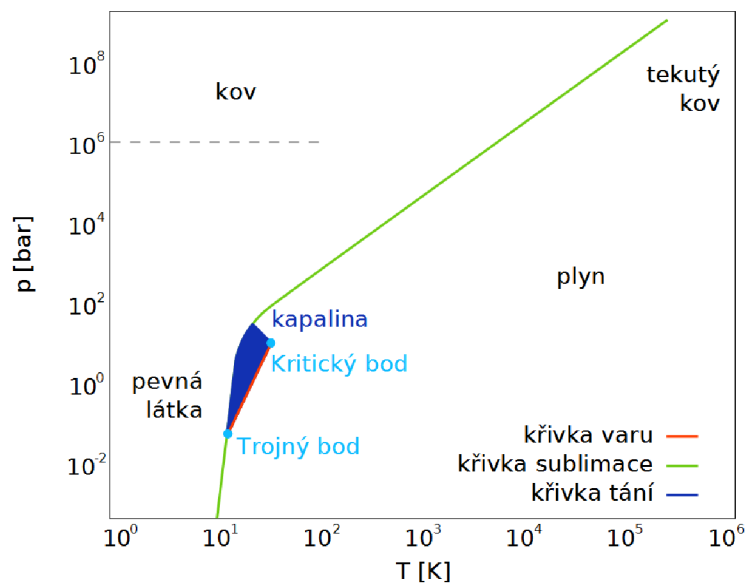
Vodík stejně jako dusík a oxid uhličitý zaujímá ve svém stabilním tvaru rovinnou strukturu (Obr. 7.5). Atomy tvořící molekulu vodíku jsou spojeny pomocí jedné vazby. Čistý vodík je možné v atmosféře najít ve stopovém množství, nicméně jeho atomy mají zastoupení v řadě sloučenin, mezi něž patří i molekula vody. Právě ve vodíku vidí řada odborníků potenciál pro využití (nejen) v automobilním průmyslu jako palivo. Čistý vodík se v přírodě vyskytuje sporadicky, ve spotřebním průmyslu se počítá s využitím tzv. palivových článků, které by měly být jeho zdrojem. V průmyslové praxi se vodík získává parním reformingem metanu (zemního plynu), elektrolýzou vody (tato metoda stále čeká na větší využití) anebo parciální oxidací uhlovodíků. V průmyslu vodík spaluje a slouží jako zdroj tepelné energie. Vodík se může běžně vyskytovat prakticky v každém nízko-výhřevném palivu [84, 91, 92].



Obr. 7.5 – Molekula vodíku

7.3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Vodík je z pohledu hořlavosti a výbušnosti nebezpečná látka. Se vzduchem tvoří výbušnou směs v koncentracích 4 – 77 %. Nejvhodnějším opatření proti vzniku výbušné směsi a následné detonaci je předejít (zabránit) vzniku směsi vodíku se vzduchem. Vodík je bezbarvý a bez zápachu. Pro získání kapalného vodíku je nutné rapidně snížit teplotu, proto se v tomto skupenství v technické praxi vodík prakticky nepoužívá. Z fázového diagramu na Obr. 7.6 vyplývá, že jakákoliv změna skupenství vyžaduje značné snížení teploty a v ideálním případě i zvýšení tlaku. Při odběru vodíku ze zásobníku dochází k jeho ohřevu, protože jeho Joule–Thompsonův koeficient je záporný [93].



Obr. 7.6 – Fázový diagram vodíku

7.3.2 Bezpečnost a přeprava

Vodík je většinou dodáván v tlakových lahvích nebo jejich svazcích plněných na 200 bar. Jako u všech hořlavých plynů je pro tyto láhve specifické, že mají levotočivý závit. Láhve s vodíkem jsou označeny červenou barvou RAL 3000 (ohnivá červeň). V místech kde dochází k manipulaci nebo transportování vodíku je nutné zajistit těsnost všech spojů, aby nemohlo dojít k vytvoření výbušné směsi. V případě lokalizace netěsnosti je nutné uzavřít výstup vodíku ze zásobníku. Pro vodík je typické, že se při expanzi zahřívá. Proto pokud dojde k náhlému poklesu tlaku vlivem expanze, může dojít k samovolnému vznícení. Vodík je lehčí než vzduch, proto je ve skladech a výrobních halách, kde se vodík používá velmi žádoucí použít stropní ventilaci. Ze zdravotního hlediska je vodík netečný plyn. Při vyšších koncentracích může způsobit pokles obsahu kyslíku ve vzduchu. Může tak způsobit zadušení. Doprava vodíku musí splňovat požadavky ADR [84].

8 Konstrukce směšovací stanice

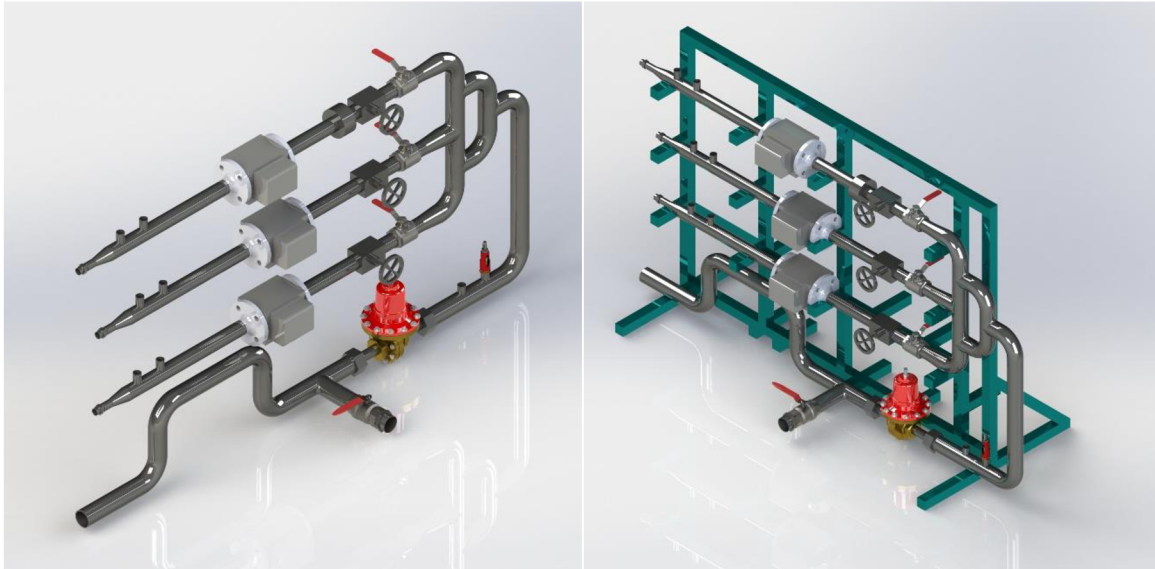
Návrh směšovací stanice a její konstrukce přinesly různá úskalí. Průběh návrhu a konečné řešení jsou popsány v následujících kapitolách. Z analýzy nízko-výhřevných paliv vyplynulo, že nejčastěji vyskytujícími se složkami v tomto typu paliv jsou metan (v pro návrh stanice byl použit zemní plyn, důvody jsou popsány v Kapitole 7), vodík, oxid uhličitý a dusík, proto byla směšovací stanice navržena pro smíchání těchto tří plynů. Zemní plyn je jediná složka, která je v místě využití zařízení k dispozici, dodávka ostatních plynů je zajišťována ve svazcích láhví.

8.1 Prvotní návrh

Směšovací stanice je navržena jako dvoustupňová, přičemž první stupeň regulace probíhá již za svazkem láhví, kde je tlak každého z plynů zredukován pomocí regulačních ventilů Harris z tlaku 200 bar na tlak 8 bar. Druhý stupeň regulace je zařazen na větví, ve které proudí plyn namíchaný z dodaných svazků. Zde je tlak regulován na konečnou hodnotu 0,3 – 0,95 bar. Limitním faktorem celé směšovací stanice je přívod zemního plynu, ten je přiváděn ze středotlakého řádu a dosahuje maximálního přetlaku 0,95 bar. Proto je nutné regulovat tlak nízko-výhřevné směsi na stejnou hodnotu, tak aby nedocházelo k protlačování směsi do potrubí se zemním plynem.

Směšovací stanice byla navržena, tak aby umožnila smíchat čtyři různé plyny (zemní plyn, oxid uhličitý, dusík a vodík), a skládá se tedy ze 4 větví. Větev pro zemní plyn, je připravena pro napojení se na středotlaké potrubí, které je k dispozici v místě spotřeby. Veškerá regulace a zaznamenávání průtoku zemního plynu probíhá za využití současného vybavení, proto není pro tuto větev na směšovací stanici počítáno s měřicími a regulačními prvky. Další plyny (vodík, dusík a oxid uhličitý) jsou dodávány v tlakových láhvích anebo jejich svazcích, proto jsou zbývající tři větve vybavené měřicím zařízením tak, aby bylo možné měřit teplotu, tlak a průtok protékajících plynů.

Pro regulaci a měření průtoku musely být větve pro vodík, dusík a oxid uhličitý vybaveny vlastními průtokoměry a regulačními prvky. Původní řešení směšovací stanice zahrnovalo průtokoměry Itron Delta Compact G40 s dálkovým odečtem průtočného množství Cyble, které byly zakoupeny již dříve. Konstrukce směšovací stanice byla tedy přizpůsobena přírubovému připojení a jednotlivé větve byly dimenzovány na maximální průtok 65 m³/hod a maximální přetlak 16 bar. Hlubší analýza vlastností průtokoměrů odhalila jejich slabé stránky. Průtokoměry jsou primárně určeny k měření dlouhodobého průtoku zemního plynu a nejsou příliš vhodné k pro zobrazování aktuálního průtočného množství plynu. Proto bylo nutné hledat přístroje, které by byly vhodnější. První verze směšovací stanice měla být bez elektronických regulačních prvků, průtok plynů měl být regulován jehlovými ventily ovládanými ručně. 3D model prvotního návrhu směšovací stanice je zobrazen na Obr. 8.1.



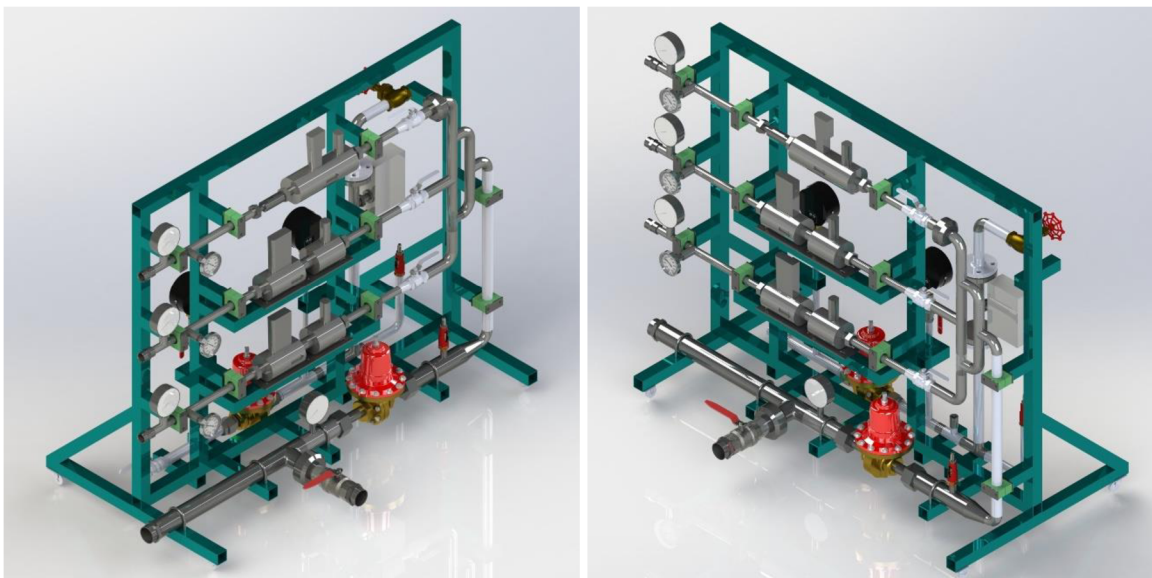
Obr. 8.1 a,b – 3D model směšovací stanice – původní návrh

8.2 Finální řešení směšovací stanice

Po důkladné analýze trhu a konzultaci s výrobcí průtokoměrů byly pro měření a regulaci zvoleny produkty od skupiny Bronkhorst, které jsou vzájemně kompatibilní a jejich řídicí software je připraven pro použití jak v průmyslových, tak vědeckých aplikacích.

Pro větev navrženou pro vodík byl dodán hmotnostní průtokoměr Bronkhorst F–206BI. Tento průtokoměr je zároveň vybaven regulačním pilotním ventilem F–003BI a lze tak velmi účinně a přesně regulovat průtok pomocí ovládacího software, který využívá rozhraní Flowbus. Odpadá tak nutnost zařadit na potrubí regulační ventil ovládaný ručně. Pro ochranu kapiláry průtokoměru před nečistotami, či zmrzlými částicemi je před průtokoměrem osazen filtr s maximální propustností 40 μm . Průtokoměr F–206BI umožňuje měřit velký průtok vodíku – až 500 mN^3/hod . Podobný požadavek na průtok byl i pro oxid uhličitý a dusík a to 300 mN^3/hod . Výrobce průtokoměrů přizpůsobuje kapiláru, kterou je odebrán vzorek plynu, průtoku a složení plynu, aby bylo dosaženo stabilní přesnosti. Pro potrubí s oxidem uhličitým a dusíkem nebyl tento typ průtokoměru vhodný, protože při takto velkých průtocích nebylo možné předřadit filtr, který by zajistil potřebnou čistotu, bez toho aniž by došlo k velké tlakové ztrátě. Proto jsou tyto větve vybavené termickými CTA průtokoměry M+W Instruments, taktéž osazenými regulačními pilotními ventily F–003BI. Tento typ průtokoměrů není tolik náchylný na poškození nečistotami a lze ho tedy pro tuto aplikaci bez problémů použít. U obou typů ventilů je možné měnit provozní koeficienty a za určitých podmínek je použit i pro jiné druhy plynů (např. oxid uhelnatý, argon). Všechny průtokoměry jsou kalibrovány na tlak 8 bar na vstupu, přičemž hodnota na výstupu se liší na základě požadovaného průtoku v rozmezí 0–6 bar. Plyny jsou po průchodu průtokoměry homogenizovány pomocí mísícího elementu. Po výstupu z mísícího elementu se potrubí rozšiřuje na průměr DN 50, který odpovídá rozměru potrubí zemního plynu. Toto potrubí je osazeno pojistným ventilem, nastaveným na hodnotu 12 bar (1,5 násobek tlaku na vstupu). Limitním prvkem celé směšovací stanice je potrubí zemního plynu, kde je možné dosáhnout maximální přetlak 0,95 bar. Proto musel být zařazen regulátor tlaku R120–B6AK03, aby po snížení tlaku chudého paliva mohl být přidán zemní plyn. Pro zajištění dokonalého promíchání byla v původním návrhu do potrubí zařazena 4 kolena,

nicméně po konzultaci s výrobcem statických směšovačů bylo od tohoto návrhu opuštěno. Namíchané palivo je přivedeno hadicí o rozměru DN 50 do hořáku. V případě použití hořáku s označením LPH se potrubí pro snížení tlakových ztrát rozšiřuje na DN 80. Větve zemního plynu a vodíku jsou vybaveny protizášlehovými zpětnými klapkami. Všechny tři průtokoměry jsou k potrubí připojeny kompresním šroubením Swagelok (Let-lok), čímž odpadla varianta připojení přes příruby. 3D model finálního provedení směšovací stanice je zobrazen na Obr. 8.2. PID diagram je potom k nahlédnutí na Obr. 8.3. Kalibrační protokoly ukazující skutečnou chybu měření jsou dostupné v přílohách P01 – P03. Výkresová dokumentace je obsažena v přílohách P04 – P12.



Obr. 8.2 a,b – 3D model směšovací stanice – finální řešení

8.3 Výpočet tloušťky stěny potrubí

Pro výpočet jednotlivých částí směšovací stanice bylo nutné vzít v potaz, že již některé díly byly nakoupeny ještě před tím, než byl hotový celý návrh směšovací stanice. Proto se ve výpočtu vyskytuje tloušťka tří různých typů potrubí. Aby byly splněny všechny legislativní a bezpečnostní požadavky, bylo nutné stanovit tlaky plynů a také zjistit jejich teploty. Pro výpočet tloušťky stěny potrubí byla použita norma ČSN EN 13480–3, která řeší problematiku pevnosti a bezpečnosti potrubních celků [94]:

$$e = \frac{p_c \cdot D_o}{2 \cdot f \cdot z + p_c} \quad (33)$$

kde	e	je vypočtená tloušťka stěny [mm]
	p_c	je výpočtový přetlak [MPa],
	D_o	je vnější průměr trubky [mm],
	f	je dovolené namáhání materiálu [MPa],
	z	je součinitel hodnoty podélného svarového spoje [-].

Dovolené namáhání bylo určeno pomocí vzorce, který se používá pro austenitické oceli s tažností větší jak 35 %:

$$f = \frac{R_{p1,0t}}{1,5} \quad (34)$$

kde $R_{p1,0t}$ je minimální smluvní mez kluzu 1% při výpočtové teplotě [MPa].

Hodnoty mezi pevnosti a mezi kluzu byly získány z materiálového listu [95]: $R_{p1,0t} = 225$ MPa, po dosazení do (34).

$$f = \frac{225}{1,5} \Rightarrow 150 \text{ MPa} \quad (35)$$

Maximální přetlak byl určen s ohledem na bezpečnost systému. Na směšovací stanici se vyskytují potrubí se třemi různými vnějšími průměry, jedná se o průměry 25 mm, 33,7 mm a 60,3 mm. Nejproblematictější je z hlediska bezpečnosti potrubí o největším průměru. Průtokoměry jsou nastaveny na vstupní tlak 8 bar, výstupní tlak se potom pohybuje v rozmezí 0 – 6 bar. V rámci výpočtu bylo uvažováno s přetlakem 12 bar, který odpovídá 1,5 násobku tlaku vstupního. Po dosazení do rovnice (33) byla vypočítána nejnižší dovolená tloušťka stěny, pro součinitel svarového spoje byla zvolena konzervativní hodnota 0,8.

$$e = \frac{1,2 \cdot 60,3}{2 \cdot 150 \cdot 0,8 + 1,2} = 0,3 \text{ mm} \quad (36)$$

Pro výrobu byla zvolena tloušťka potrubí 4 mm. Podle výpočtu (62) by stěna mohla být slabší, avšak do potrubí byl vysoustružen trubkový závit G2 s průměrem malého závitu 56,656 mm [96]. Z toho vyplývá, že stěna byla zeslabena o 1,822 mm. Tloušťka stěny byla tedy zvolena, tak aby nejtěsnější místo potrubí bylo maximálně 2 mm. Pro ověření byla proveden výpočet ještě pro zbývající rozměry trubek.

Trubka o průměru 33,7 mm:

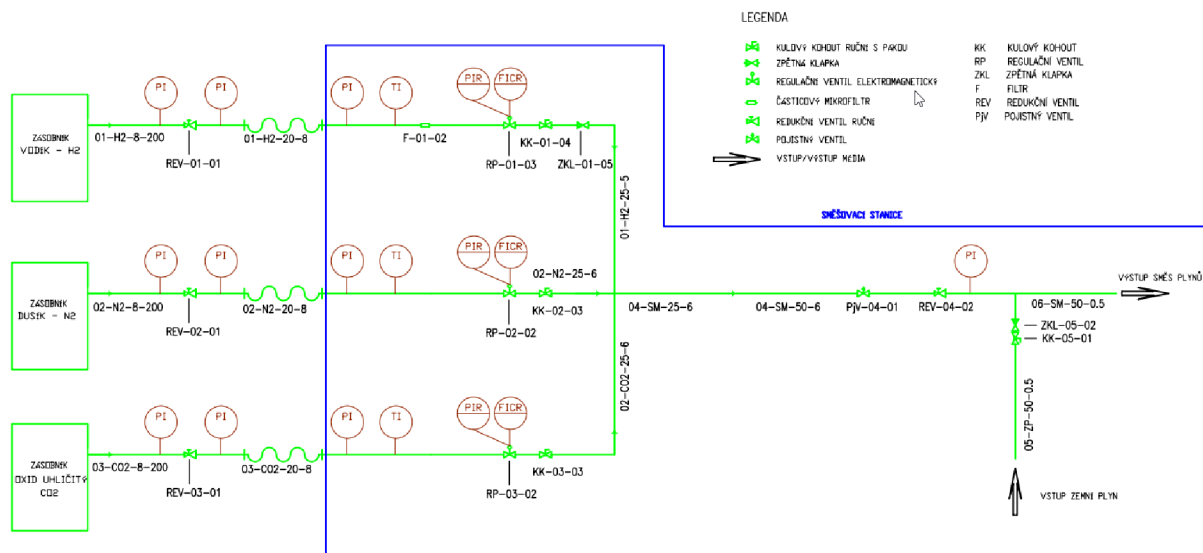
$$e = \frac{1,2 \cdot 33,7}{2 \cdot 150 \cdot 0,8 + 1,2} = 0,16 \text{ mm} \quad (37)$$

Pro výrobu potrubí byla zvolena tloušťka stěny 2 mm.

Trubka o průměru 25 mm:

$$e = \frac{1,2 \cdot 25}{2 \cdot 150 \cdot 0,8 + 1,2} = 0,12 \text{ mm} \quad (38)$$

Pro výrobu potrubí byla zvolena tloušťka stěny 2 mm.



Obr. 8.3 – PID schéma směšovací stanice

8.4 Pilotní zkoušky

První testy proběhly se stlačeným vzduchem a měly odhalit případné netěsnosti v potrubí. Postupně byly natlakovány všechny části směšovací stanice a pomocí pěnnotvorného roztoku byly hledány netěsnosti. Během testů se projevila netěsnost na potrubí vstupujícím do regulátoru tlaku, proto tato část musela být přetěsněna. V další fázi byla prověřena funkčnost průtokoměrů a pilotních ventilů.

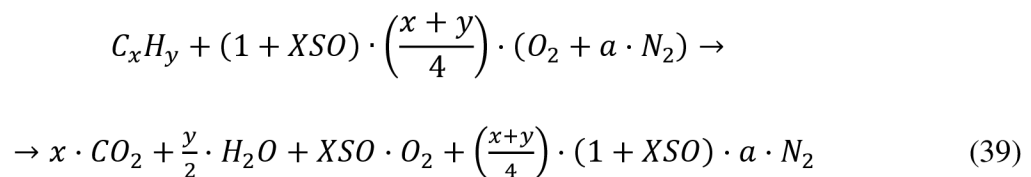
Na základě pozitivního průběhu testování byla směšovací stanice nasazena do ostrého provozu. Při použití zemního plynu společně s jedním inertním plynem, byla funkčnost stanice bezproblémová. Problémy se vyskytly až v případě použití dvou inertních plynů. Regulační ventily nedokázaly současně upravovat průtok dvou plynů. Ve spolupráci s dodavatelem průtokoměrů byla upravena citlivost jednotlivých ventilů, což přispělo ke stabilizaci průtoků.

9 Rovnice pro výpočet hořáku

Z průběžných měření na konvenčních typech hořáků vyplynula nutnost navrhnout nový typ hořáku, který by umožnil spalovat paliva s nízkou výhřevností a zároveň disponoval dostatečným výkonem. Pro usnadnění řešení bylo přistoupeno pouze k návrhu hořákové vestavby, která bude vložena do stávající vzduchové skříně. Pro návrh hořáku bylo nutné stanovit řadu parametrů tak, aby vestavba splnila svůj účel. Pro výpočet parametrů byly použity rovnice popsané v této kapitole.

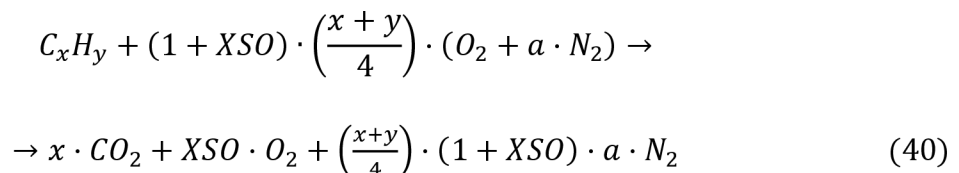
9.1 Globální reakce spalování

Globální reakce spalování uhlovodíkového paliva s okysličovadlem (stopové prvky zanedbány), kde produktem jsou vlhké spaliny [37]:



kde C_xH_y je sloučenina uhlíku a vodíku s x -díly uhlíku a y -díly vodíku,
 XSO je přebytek vzduchu a faktor pro výpočet koncentrace dusíku ve vzduchu,
 x značí celkový počet atomů uhlíku ve sloučenině,
 y značí celkový počet atomů vodíku ve sloučenině,
 a poměr dusíku a kyslíku ve spalovacím vzduchu.

Globální reakce spalování uhlovodíkového paliva, kde produktem jsou suché spaliny [37]:



Příklad: Metan (C_1H_4) je spalován s 15% přebytkem vzduchu. Určete obsah kyslíku v suchých spalinách.

$$x = 1, y = 4, XSO = 0,15.$$

$$\text{Vzduch} \approx 20,9 \% \text{ kyslíku, } 79,1 \% \text{ dusíku} \Rightarrow a = 0,791/0,209 = 3,78.$$

Obsah kyslíku v suchých spalinách je možné vypočítat z globální rovnice [37]:

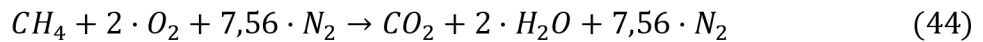
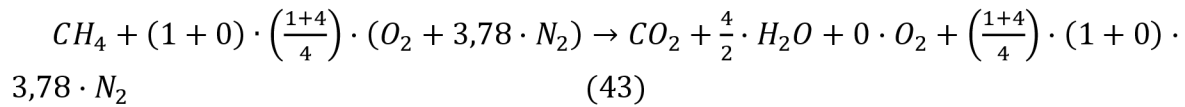
$$O_2 \text{ v suchých spalinách} = \frac{XSO(x+\frac{y}{4})}{x+(\frac{x+y}{4}) \cdot (a+(1+a) \cdot XSO)} \quad (41)$$

Po dosazení do rovnice (41) je možné spočítat obsah kyslíku [37]:

$$O_2 \text{ v suchých spalinách} = \frac{0,15(1+\frac{4}{4})}{1+(\frac{1+4}{4}) \cdot (3,78+(1+3,78) \cdot 0,15)} = 0,03 = 3 \% \quad (42)$$

9.2 Stechiometrický (směšovací) poměr

Globální rovnice spalování metanu se vzduchem při stechiometrických podmínkách [37]:



Stechiometrický poměr je možné specifikovat dvěma způsoby:

$$S_1 = \frac{\text{Průtok kyslíku obsaženého ve spalovacím vzduchu}}{\text{Průtok paliva}} \quad (45)$$

$$S_2 = \frac{\text{Průtok spalovacího vzduchu}}{\text{Průtok paliva}} \quad (46)$$

Jednotlivé stechiometrické poměry je pak již snadné dopočítat: $S_1 = \frac{2}{1} = 2$ a $S_2 = \frac{(2+7,56)}{1} = 9,56$.

9.3 Vstupní data

Pro návrh hořáku je nutné mít přehled o vstupních datech, kterými jsou:

- Složení paliva,
- výkon hořáku (popř. průtok paliva),
- regulační rozsah (nejčastěji 1:5),
- přebytek spalovacího vzduchu (popř. koncentrace kyslíku v suchých spalínách),
- teplota paliva,
- teplota spalovacího vzduchu.

9.4 Výhřevnost paliva

Pro výpočet celkové výhřevnosti paliva je nutné vzít v potaz vlastnosti všech složek, které palivo tvoří. Celkovou výhřevnost lze spočítat jako sumu součinu koncentrace a výhřevnosti jednotlivých složek. Veškeré údaje vztažené k výhřevnosti paliva složeného z více komponent jsou v této práci vypočítány pomocí rovnice (47) [78]:

$$LHV = \sum_{i=1}^n c_i \cdot LHV_i \quad (47)$$

kde LHV je výhřevnost paliva [MJ/m_N³],
 LHV_i je výhřevnost i -té složky paliva [MJ/m_N³],
 c_i je objemová koncentrace i -té složky paliva [-].

9.5 Spalné teplo paliva

Spalné teplo je možné spočítat pomocí podobné rovnice, jako tomu bylo v případě výhřevnosti. Po dosazení spalného tepla za výhřevnost do rovnice (47) dostane rovnice následující tvar [78]:

$$HHV = \sum_{i=1}^n c_i \cdot HHV_i \quad (48)$$

kde HHV je spalné teplo paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$],
 HHV_i je spalné teplo i -té složky paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$],
 c_i je objemová koncentrace i -té složky paliva [-].

9.6 Celkový spalovací výkon

Celkový spalovací výkon je možné dopočítat ze znalosti výhřevnosti paliva a jeho průtoku podle rovnice (49):

$$P_w = \frac{(\sum_{i=1}^n c_i \cdot LHV_i) \cdot (\sum_{i=1}^n c_i \cdot Q_i)}{1000 \cdot 3600} \quad (49)$$

kde P_w je celkový spalovací výkon [kW],
 LHV_i je výhřevnost i -té složky paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$],
 c_i je koncentrace i -té složky paliva [-],
 Q_i je průtok i -té složky paliva [$\text{m}_\text{N}^3/\text{hod}$].

9.7 Hustota paliva

Hustotu jakékoliv směsi plynů je možné dopočítat díky znalosti hustot jednotlivých složek. Výslednou hodnotu lze získat po dosazení do rovnice (50) [78]:

$$\rho = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \rho_i \quad (50)$$

kde ρ je hustota paliva [$\text{kg}/\text{m}_\text{N}^3$],
 ρ_i je hustota i -té složky paliva [$\text{kg}/\text{m}_\text{N}^3$],
 c_i je koncentrace i -té složky paliva [-].

9.8 Meze zápalnosti

Znalost mezí zápalnosti je důležitá pro správný návrh provozních podmínek. V rozmezí těchto hodnot dochází k vytvoření ideálních podmínek pro hoření a tedy zapálení plamene. Při poklesu pod dolní mez zápalnosti, či překročení horní hranice stanovené horní mezí zápalnosti nehrozí nebezpečí vznícení směsi paliva, ale na druhou stranu může plamen hořet nestabilně [58].

9.8.1 Dolní mez zápalnosti

$$L_d = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{L_{d,i}} + \frac{inert}{100}} \quad (51)$$

kde	L_d	je spodní mez zápalnosti paliva ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem [%],
	$L_{d,i}$	je spodní mez výbušnosti i -té složky paliva ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem [%],
	c_i	koncentrace i -té složky paliva [-],
	$inert$	je součet objemových koncentrací inertních složek plynu [% obj.].

9.8.2 Horní mez zápalnosti

$$L_h = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{L_{h,i}} + \frac{inert}{100}} \quad (52)$$

kde	L_h	je horní mez zápalnosti paliva ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem [%],
	$L_{h,i}$	je horní mez výbušnosti i -té složky paliva ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem [%],
	c_i	je objemová koncentrace i -té složky paliva [-],
	$inert$	je součet objemových koncentrací inertních složek plynu [% obj.].

9.9 Wobbého index

Wobbého index, který vypovídá o záměnnosti paliva, může být definován dvěma způsoby podle toho, jestli je index vypočítán z výhřevnosti (nižší) anebo ze spalného tepla (vyšší) [78].

$$W_{b,nižší} = \frac{LHV}{\sqrt{SG}} \quad (53)$$

kde	LHV	je výhřevnost paliva [MJ/m _N ³],
	SG	je relativní hustota paliva [-].

$$W_{b,vyšší} = \frac{HHV}{\sqrt{SG}} \quad (54)$$

kde	HHV	je spalné teplo paliva [MJ/m _N ³],
	SG	je relativní hustota paliva [-].

9.10 Adiabatická konstanta

Poissonovu adiabatickou konstantu směsi plynů lze vypočítat pomocí rovnice (55) [97]:

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot c_{p_i}}{\sum_{i=1}^n c_i \cdot c_{v_i}} \quad (55)$$

kde	κ	je adiabatická konstanta směsi paliva [-],
	c_{p_i}	je tepelná kapacita při stálém tlaku <i>i-té</i> složky paliva [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
	c_{v_i}	je tepelná kapacita při stálém objemu <i>i-té</i> složky paliva [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
	c_i	je objemová koncentrace <i>i-té</i> složky paliva [-].

9.11 Kritický poměr tlaků plynu

Jedná se o stav, kdy dojde k dosažení maximálního průtoku plynu tryskou a je možné ho spočítat pomocí rovnice (56) [98]:

$$\beta = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (56)$$

kde	β	kritický poměr tlaků plynu [-],
	p_k	je kritický tlak [Pa],
	p_1	je tlak plynu na vstupu do trysky [Pa],
	κ	adiabatická konstanta [-].

- Pokud
- $\frac{p_2}{p_1} < \beta \rightarrow$ nadkritický stav – výtoková rychlost z trysky je rovna kritické výtokové rychlosti (tj. rychlost proudění dosáhne rychlosti zvuku).
 - $\frac{p_2}{p_1} = \beta \rightarrow$ kritický stav – výtoková rychlost je rovna kritické výtokové rychlosti.
 - $1 > \frac{p_2}{p_1} > \beta \rightarrow$ podkritický stav – výtoková rychlost z trysky je menší než kritická výtoková rychlost.

9.12 Ekvivalentní průměr trysky

Stanovení ekvivalentního průměru trysky je silně závislé na provozních podmínkách. Zejména na tom, jaký je přetlak plynu před ústím trysky. V případě, že je přetlak vyšší než 10 kPa je nutné vzít v potaz, zda se jedná o podkritický nebo nadkritický stav [58].

9.12.1 Přetlak do 10 kPa

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{plyn,N} \cdot T_2 \cdot p_0}{3600 \cdot \varphi \cdot \pi \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho_2}} \cdot T_0 \cdot p_2}} \quad (57)$$

kde	d_{ekv}	je ekvivalentní průměr trysky [m],
	$V_{plyn,N}$	je průtok plynu za normálních podmínek [m_N^3/h],
	T_0	je absolutní teplota za normálních podmínek [K]
	T_2	je absolutní teplota plynu na výstupu z trysky [K],
	p_0	je absolutní tlak za normálních podmínek [Pa],
	p_1	je absolutní tlak plynu na vstupu do trysky [Pa],
	p_2	je absolutní tlak plynu na výstupu z trysky (tzv. protitlak) [Pa],
	ρ_2	je hustota plynu na výstupu z trysky [kg/m_N^3],
	φ	je rychlostní součinitel trysky [-].

9.12.2 Přetlak vyšší než 10 kPa

a) podkritický stav [58]:

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{plyn,N} \cdot T_2 \cdot p_0}{3600 \cdot \varphi \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}\right]} \cdot T_0 \cdot p_2}} \quad (58)$$

kde	d_{ekv}	je ekvivalentní průměr trysky [m],
	$V_{plyn,N}$	je průtok plynu za normálních podmínek [m_N^3/h],
	T_0	je absolutní teplota za normálních podmínek [K]
	T_2	je absolutní teplota plynu na výstupu z trysky [K],
	p_0	je absolutní tlak za normálních podmínek [Pa],
	p_1	je absolutní tlak plynu na vstupu do trysky [Pa],
	p_2	je absolutní tlak plynu na výstupu z trysky (tzv. protitlak) [Pa],
	ρ_1	je hustota plynu na vstupu do trysky [kg/m_N^3],
	φ	je rychlostní součinitel trysky [-],
	κ	je adiabatická konstanta [-].

b) kritický a nadkritický stav [58]:

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{plyn,N} \cdot T_1 \cdot p_0}{3600 \cdot \varphi \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa \cdot p_1}{\kappa+1} \cdot \frac{2}{\rho_1 \cdot \kappa+1}} \cdot T_0 \cdot p_1}} \quad (59)$$

kde	d_{ekv}	je ekvivalentní průměr trysky [m],
	$\dot{V}_{plyn,N}$	je průtok plynu za normálních podmínek [m_N^3/h],
	T_1	je absolutní teplota za normálních podmínek [K]
	T_2	je absolutní teplota plynu na výstupu z trysky [K],
	p_0	je absolutní tlak za normálních podmínek [Pa],
	p_1	je absolutní tlak plynu na vstupu do trysky [Pa],
	p_2	je absolutní tlak plynu na výstupu z trysky (tzv. protitlak) [Pa],
	φ	je rychlostní součinitel trysky [-],
	κ	je adiabatická konstanta [-].

9.13 Průměr jednoho otvoru v primární hlavě

Pokud je počet otvorů v sekundárních hořákových hlavách roven nule, pak průměr jednoho otvoru v primární hořákové hlavě je

$$d^{PO} = \sqrt{\frac{d_{ekv}^2}{n^{PH} \cdot n^{PO}}} \quad (60)$$

kde	d^{PO}	je průměr jednoho otvoru v primární hlavě [m],
	d_{ekv}	je ekvivalentní průměr trysky [m],
	n^{PH}	je počet primárních hlav [-],
	n^{PO}	je počet otvorů v primární hlavě [-].

Jinak platí

$$d^{PO} = \sqrt{\frac{d_{ekv}^2 \cdot \frac{RPS}{100}}{n^{PH} \cdot n^{PO}}} \quad (61)$$

kde	d_{ekv}	je ekvivalentní průměr trysky [m],
	n^{PH}	je počet primárních hlav [-],
	n^{PO}	je počet otvorů v primární hlavě [-],
	RPS	je poměr paliva mezi primárním a sekundárním stupněm [-].

Analogicky lze vypočítat průměr jednoho otvoru v sekundárních hořákových hlavách.

10 Návrh hořáku

Po analýze problémů popsaných v kapitolách 11.5 a 11.6, které vyplynuly během měření na konvenčních typech hořáků ZPH a APH, bylo přistoupeno k návrhu vlastního typu hořáku. Při návrhu hořáku bylo nezbytné vzít v potaz, že bude sloužit pro experimentální účely a budou na něm zkoušena paliva, která se budou svými vlastnostmi lišit. Bylo tedy nutné výsledný prototyp adaptovat na různé provozní podmínky. Při konstrukci hořáku je důležité dbát na to, aby bylo možné hořák provozovat v různých režimech. Při zapalování hořáku se běžně používá zemní plyn, který má vyšší výhřevnost než nízko-výhřevná paliva (v některých případech až 8 krát). Jedním z požadavků ze strany provozovatele bývá také možnost regulace výkonu v určitém rozsahu. Konstruktor proto musí při návrhu hořáku vzít v potaz rychlosti proudění paliva a vzduchu, a navrhnout řešení tak, aby při provozu nedocházelo k utržívání plamene anebo jeho zpětnému zášlehu. Hořáky také mohou být provozovány s vysokým anebo naopak s nízkým přebytkem spalovacího vzduchu. Pro výpočet byly definovány vstupní podmínky, které vycházejí z provozních parametrů zkušebny hořáků. Pro výpočet byly použity rovnice uvedené v kapitole 9.

10.1 Zadávací parametry

Hořák na nízko-výhřevné palivo by měl být navržen tak, aby bylo možné využít stávající vzduchovou skříň konvenčního hořáku. Řešením by tedy měla být hořáková vestavba zakončená hořákovou hlavou, která umožní spalování nízko-výhřevného paliva (směs metanu a inertního plynu) o minimální výhřevnosti až 5 MJ/m_N^3 při maximálním výkonu 1500 kW. Pro zkoušení nižších výkonů může být navržena alternativní hořáková hlava s nominálním výkonem 750 kW. V obou případech by měla být zachována možnost regulovat výkon v rozmezí 1:5. Z důvodu úspory inertních plynů bude pro zapálení hořáku na experimentálním zařízení používán zemní plyn. V reálných podmínkách může být využito nízko-výhřevného paliva, jako je bioplyn, vysokopecní plyn nebo jiného paliva s výhřevností alespoň 20 MJ/m_N^3 . Hořák by měl být schopný spalovat plynná paliva o různém složení. Jako s hlavní spalitelnou složkou paliva se počítá s metanem (v experimentálním prostředí tuto složku může nahradit zemní plyn), balastními plyny budou oxid uhličitý a dusík, se kterými by měly být i provedeny provozní zkoušky. Jako alternativní spalitelnou složku lze použít vodík. U hořáku by měla být zachována možnost přidat jeho středem měřicí zařízení anebo atomizér pro spalování kapalných paliv. Ventilátor spalovacího vzduchu je řízen frekvenčním měničem, takže je možné jeho průtok přesně regulovat.

Tab. 10.1 – Zadávací parametry pro návrhový výpočet hořáku

Zemní plyn	
Maximální tlak	0,1 bar (g)
Maximální průtok	$200 \text{ m}_N^3/\text{hod}$
Požadovaný průtok	$50 \div 150 \text{ m}_N^3/\text{hod}$
Teplota	$5 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$
Výhřevnost	$36,3 \text{ MJ/m}_N^3$ (výpočet dle [78])
Spalné teplo	$40,28 \text{ MJ/m}_N^3$ (výpočet dle [78])
Wobbeho číslo	$50,5 \text{ MJ/m}^3$ (výpočet dle [78])
Hustota při $0 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,738 \text{ kg/m}^3$

Tab.11.1 – Zadávací parametry pro návrhový výpočet hořáku – pokračování

Průměrné složení zemního plynu	[%]
CH ₄	97,094
C ₂ H ₆	1,590
C ₃ H ₈	0,362
n-C ₄ H ₁₀	0,057
i-C ₄ H ₁₀	0,061
n-C ₅ H ₁₂	0,010
i-C ₅ H ₁₂	0,007
neo-C ₅ H ₁₂	0
n-C ₆ H ₁₄	0,010
N ₂	0,709
CO ₂	0,1
Oxid uhličitý	
Tlak v zásobníku	200 bar (g)
Kapacita zásobníku	324,6 kg
Tlak po výstupu ze zásobníku	8 bar (g)
Maximální tlak před smícháním	5 bar (g)
Maximální tlak po smíchání	0,1 bar (g)
Maximální průtok	300 m _N ³ /hod
Minimální průtok	5 m _N ³ /hod
Teplota v potrubí	-15÷20 °C
Dusík	
Tlak v zásobníku	300 bar (g)
Kapacita zásobníku	153,6 m _N ³
Tlak po výstupu ze zásobníku	8 bar (g)
Maximální tlak před smícháním	5 bar (g)
Maximální tlak po smíchání	0,1 bar (g)
Minimální průtok	5 m _N ³ /hod
Maximální průtok	300 m _N ³ /hod
Teplota v potrubí	-15÷20 °C
Vodík	
Tlak v zásobníku	200 bar (g)
Kapacita zásobníku	144 m _N ³
Tlak po výstupu ze zásobníku	8 bar (g)
Maximální tlak před smícháním	6 bar (g)
Maximální tlak po smíchání	0,1 bar (g)
Minimální průtok	5 m _N ³ /hod
Maximální průtok	500 m _N ³ /hod
Teplota v potrubí	-15÷20 °C
Výhřevnost	10,8 MJ/m _N ³ (výpočet dle [78])
Spalné teplo	12,8 MJ/m _N ³ (výpočet dle [78])
Wobbeho číslo	45,9 MJ/m ³ (výpočet dle [78])

Tab.11.1 – Zadávací parametry pro návrhový výpočet hořáku – pokračování

Požadavky na hořák	
Minimální výhřevnost	6,9 MJ/m _N ³
Nominální výhřevnost	10÷15 MJ/m _N ³
Maximální výhřevnost	36,3 MJ/m _N ³ (zemní plyn)
Minimální průtok paliva	50 m _N ³ /hod
Nominální průtok paliva	75 m _N ³ /hod
Maximální průtok paliva:	150 m _N ³ /hod
Minimální tlak paliva před tryskou	0,05 bar (g)
Nominální tlak paliva před tryskou	0,2÷0,4 bar (g)
Maximální tlak paliva před tryskou	0,1 bar (g)
Palivo pro zapálení hořáku	Zemní plyn
Minimální výkon	500 kW
Nominální výkon	750 kW
Maximální výkon	1500 kW
Přebytek spalovacího vzduchu – α	1,15
Složení paliva při minimální výhřevnosti	15 % CH ₄ 85 % CO ₂ nebo N ₂ nebo směsi těchto plynů
Spalovací vzduch	
Minimální průtok	200 m _N ³ /hod
Maximální průtok	2500 m _N ³ /hod
Teplota	-5÷35 C
Minimální přetlak na hořáku	1 kPa
Maximální přetlak na hořáku	6 kPa

10.2 Návrh hořáku a výpočet

Pro návrh hořáku bylo využito poznatků získaných během experimentálního výzkumu a vývoje procesních hořáků. Nejjednodušším řešením v rámci vývoje bylo zachovat stávající vzduchovou skříň z hořáku APH a navrhnout do něj vestavbu, která by byla uzpůsobena požadovaným parametrům. Z důvodů nízké výhřevnosti paliva, musel být z kapacitních důvodů zvětšen průměr přívodního potrubí plynu, tak aby při nízké výhřevnosti a maximálním výkonu byly minimalizovány tlakové ztráty způsobené prouděním paliva. Prvním krokem ve výpočtu bylo stanovit průtočná množství plynů (zemního plynu a inertu) na základě požadované výhřevnosti. S využitím rovnice (47) byl stanoven poměr mezi hořlavou složkou a balastním plynem, aby bylo dosaženo výhřevnosti 6,9 MJ/m_N³. Pro tuto výhřevnost tedy připadá 20 % průtoku na zemní plyn a 80 % z celkového průtoku paliva na inertní plyn. Následně byly dopočítány průtoky jednotlivých složek. Výkonu 750 kW a nejnižší požadované výhřevnosti odpovídají průtočná množství 75 m_N³/hod zemního plynu a 300 m_N³/hod oxidu uhličitého nebo dusíku. Při výkonu 1500 kW je to dvojnásobek a to 150 m_N³/hod zemního plynu a 600 m_N³/hod oxidu uhličitého nebo dusíku. Hustota tohoto paliva je dle rovnice (50) 1,718 kg/m_N³. Dosazením za proměnné do rovnic (51) a (52) byly dopočítány dolní mez výbušnosti – 20,65 % a horní mez výbušnosti – 46,89 %. S využitím rovnic (53) a (54) byly stanoveny Wobbeho indexy: $W_{b,nižší} = 5,9 \text{ MJ/m}^3$ a $W_{b,vyšší} = 6,6 \text{ MJ/m}^3$. Adiabatická konstanta pro toto palivo byla vypočítána pomocí rovnice (55) tedy $\kappa=1,303$.

Pro návrh geometrie bylo nutné počítat s omezením, které vyplývá ze zadání. Tímto omezením je požadavek, aby středem hořáku bylo možné prostrčit atomizér kapalných paliv. Proto byla do středu hořáku navržena trubka z materiálu 17 248. Tato nerezová ocel je vhodná do vysokých teplot, které se mohou vyskytnout v ústí hořáku, a zároveň poskytuje dostatečnou ochranu vůči korozi. Plocha na konci trubky je sražena na menší průměr, vzniklo tak zúžení, na které je možné nasadit hořákovou hlavu a následně ji zde přichytit. Palivo zde bude proudit mezikružím, jehož vnitřní průměr je vymezen trubkou pro přidání atomizéru, a vnější průměr mezikruží by pak měl být zvolen tak, aby rychlost proudění paliva byla při maximálním průtoku plynu do 20 m/s. Průměr trubky byl dopočítán s využitím rovnice (62) (z důvodu relativně nízkého přetlaku plynu na vstupu do hořáku byla zanedbána stlačitelnost plynu), ze které byl vyjádřen parametr R :

$$v = \frac{Q}{\pi \cdot (R^2 - r^2)} \quad (62)$$

kde

v	je rychlost proudění [m/s],
Q	je průtok paliva [m_N^3/hod],
R	je vnitřní poloměr vnějšího potrubí [m],
r	je vnější poloměr vnitřního potrubí [m].

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot v} + r^2} \quad (63)$$

Po dosazení do rovnice (63) byl vypočten vnitřní průměr potrubí. Po konzultaci s dodavatelem hutního materiálu byla zvoleno potrubí z materiálu 12 022, tak aby odpovídalo vypočteným hodnotám. Z důvodu teplotního namáhání na konci potrubí, bude na tuto část vestavby přidán návarek z nerezové oceli 17 248.

Hořáková vestavba je primárně navržena jako hořák s jednostupňovým přívodem paliva, nicméně k hlavě jako takové lze přistupovat jako k prvku, který má k dispozici jak primární, tak sekundární stupeň distribuce paliva. Primární stupeň je navržen jako kruhové pole děr, které je v těsné blízkosti středu hořákové hlavy. Jedná se o díry kruhového průřezu, které jsou navrtány kolmo k ploše tak, aby plyny vystupující z trysky proudily ve směru osy hořáku a stabilizovaly plamen. Sekundární pole trysek je umístěno na vnějším okraji hořákové hlavy. Trysky jsou zde ve formě drážek skloněných pod úhlem tak, aby palivo vystupovalo tangenciálně podél hořákové osy. Toto opatření by mělo spolu s vířivým charakterem proudění spalovacího vzduchu zabezpečit intenzivní promíchávání paliva se spalovacím vzduchem. Protože se počítá se dvěma různými výkony a zároveň se jedná o experimentální zařízení, bylo navrženo několik verzí hořákových hlav. Pro oba výkony (750 kW i 1500 kW) tedy existují varianty, kdy do primárního stupně vstupuje 20 %, 30 %, 40 % a 100 % paliva.

Jelikož se jedná o případ, kdy je tlak paliva před hořákovou hlavou vyšší než 10 kPa, bylo nutné stanovit kritický poměr tlaků dosazením do rovnice (56):

$$\beta = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{2}{1,303+1}\right)^{\frac{1,303}{1,303-1}} = 0.545 \Rightarrow \text{podkritický} \quad (64)$$

Na základě výsledku v (64) je možné použít výpočet ekvivalentního průměru trysky popsany rovnicí (58). Pro samotný výpočet bylo nutné zvolit některé parametry:

- Teplota plynu byla zvolena 10 °C $\Rightarrow T_0=283,15$ K,
- vzhledem k charakteru navrhované hlavy a tvaru trysky byl stanoven rychlostní součinitel [58],
- pomocí stavové rovnice byla určena teplota v ústí trysky $\Rightarrow T_2=245,55$ K,
- absolutní tlak p_0 byl zvolen ve výši 175000 Pa, tak aby byla k dispozici určitá rezerva pro případ, že nebude možné z řádu odebírat plyn o maximálním dostupném přetlaku 95000 Pa.

Po dosazení do rovnice (58) byl vypočten ekvivalentní průřez trysky popisující stav, kdy veškeré palivo proudí jednou tryskou. Na základě zvoleného poměru paliva v primárním stupni byly určeny ekvivalentní průměry trysek pro primární a sekundární stupeň. V tomto případě bylo u sekundárního stupně nutné přihlídnout k tomu, že sekundární stupeň tvoří drážky a bylo tedy nutné plochu přepočítat. Výsledný otvor má tvar vycházející z výrobních možností. Následně pak bylo možné dopočítat plochy a počet otvorů pro další varianty hořákové hlavy.

Zbývající navrhovanou součástí je víříč, které je uchycen na přívodním potrubí nízko-výhřevného paliva. Víříč je navržen pro usměrnění proudu vzduchu směrem k ose hořáku, aby došlo k lepšímu promíchání vzduchu s palivem vystupujícím z hořákové hlavy. Sklon víříče je možné upravit na základě požadovaného maximálního výkonu, zároveň však musí být takový, aby poskytl maximální možnou plochu pro umístění třech kruhových polí otvorů zajišťujících vířivé proudění.

Hořáková hlava byla úspěšně patentována (číslo přihlášky 2017-33405), proto není možné zveřejnit vypočtené hodnoty a ani přesnou geometrii. Schéma hořáku, včetně jeho popisu je možné najít v přílohách P13 a P14, 3D model hořáku je zobrazen na Obr. 11.5.

11 Experimentální část

Pro experimentální část byly využity znalosti získané pomocí simulačních výpočtů popsané v kapitole 7. Pro experiment byly především důležité informace o mezích zápalnosti a výhřevnosti paliva, aby bylo možné správně nastavit podmínky pro zapálení směsi palivo/vzduch a dlouhodobě udržet stabilní plamen. Během zkoušek byly použity tři různé typy procesních hořáků, jejichž podrobný popis je uveden v kapitole 11.2. Průtok plynů byl regulován tak, že veškeré experimentální měření proběhlo při spalovacím výkonu 500 kW. Nižší výkon byl zvolen hlavně proto, aby na konvenčních typech hořáků mohlo být dosaženo vyššího stupně ochuzení paliva. Experimentální zkoušky jednotlivých plynů proběhly na zkušební hořáku, která je zobrazena na Obr. 11.1. Zařízení je vybaveno sofistikovaným zařízením pro sběr experimentálních dat, které byly použity pro vyhodnocení zkoušek. Technologické schéma zkušebny je spolu s měřicími prvky znázorněno na Obr. 11.2. Mezi sledované parametry patřily emise NO_x , CO, teplota spalin, teploty v plamenu, tepelné toky do stěn komory a také stabilita plamene, včetně vlivu inertních plynů na kvalitu hoření. Kromě zkoušek s již popsanými nízko-výhřevnými plyny se počítá s přimícháváním inertních plynů do ušlechtilého paliva tak, aby mohla být zmapována závislost tvorby oxidů dusíku na přidaných inertních plynech. Naměřené hodnoty byly graficky porovnány a následně vyhodnoceny.

11.1 Zkušebna hořáků

Nejdůležitějším zařízením zkušebny je dvouplášťová horizontální vodou chlazená pec o vnitřním průměru 1 metr a délce 4 metry. Přední a zadní strana komory jsou vyplněné izolací o celkové tloušťce 100 mm. Samotná komora je rozdělena do sedmi sekcí a to z důvodu lepšího chlazení. Každá sekce má vlastní přívod a odvod chladicí vody a je možné zaznamenávat vstupní a výstupní teploty, či proteklé množství. Průtok vody je zaznamenáván turbínovými průtokoměry a teploty odporovými teploměry.

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

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



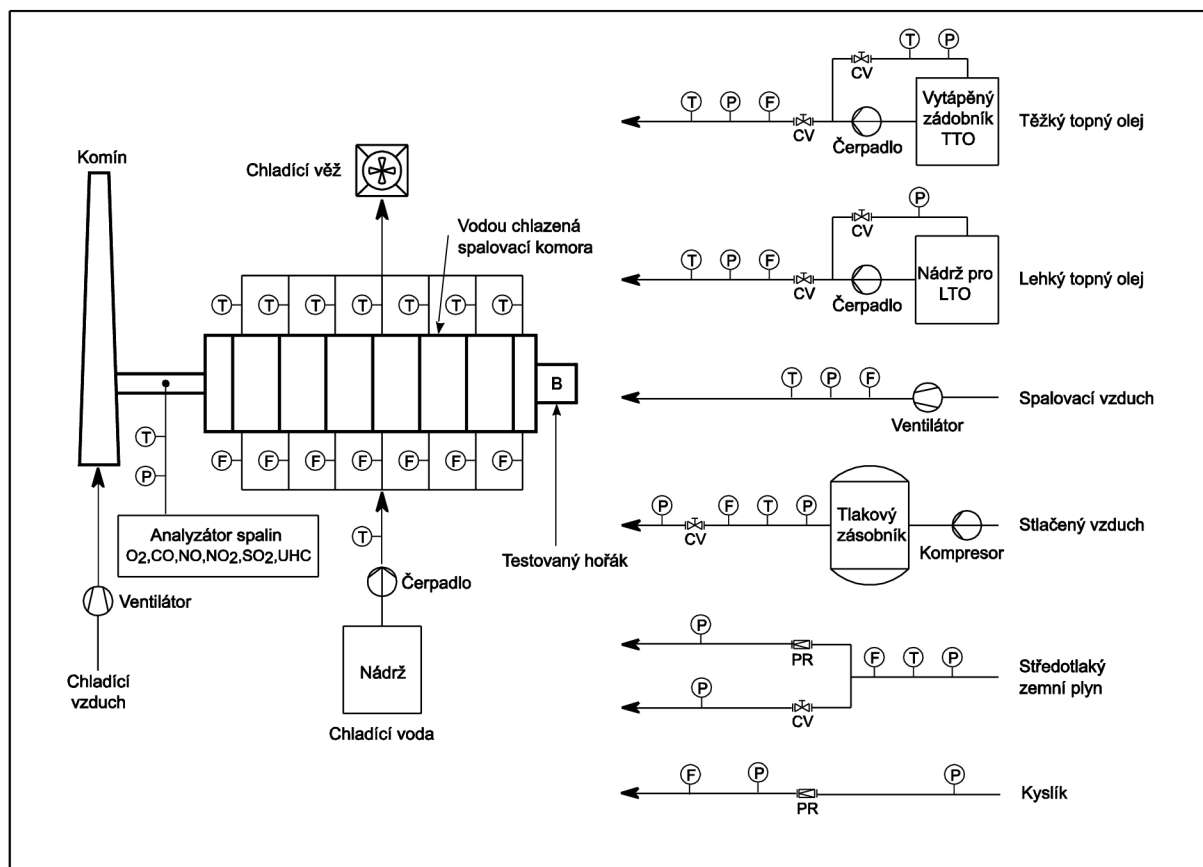
Obr. 11.1 – Zkušebna hořáků na VUT v Brně

Spaliny ze spalovací komory vystupují skrz kouřovod, který je osazen třemi jímkami, ty slouží pro odběr vzorku ze spalin nebo pro měření teploty spalin, tlaku v komoře a také samotné složení spalin. Složení spalin bylo určeno spalinovým analyzátozem Siemens ULTRAMAT 23. Analyzátor umožňuje měření NO v rozsahu $0 \div 1250 \text{ mg/m}^3$, SO₂ v rozsahu $0 \div 3000 \text{ mg/m}^3$, CO v rozsahu $0 \div 1250 \text{ mg/m}^3$, CO₂ v rozsahu $0 \div 20 \%$ obj. a O₂ v rozsahu $0 \div 25 \%$ obj. Kyslík je měřen paramagneticky, ostatní složky na základě infračervené absorpce. Výstupní signál je $0/4 \div 20 \text{ mA}$. Pro zajištění maximální přesnosti je nutné počítat s dobou náběhu min. 30 min. Nejvyšší přesnost je však dosažena po 2 hodinách. Průtok plynu může být v závislosti na podmínkách regulován v rozsahu $60 \div 120 \text{ l/h}$. Pro odběr vzorků je analyzátor vybaven otápenou sondou s filtrem 0,1 mm (připojení na přírubu DN 65), otápeným vedením (6 m) s termoregulací ($50 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$), chladícím modulem pro zkondenzování vlhkosti z plynu, kyselinovým filtrem, membránovým čerpadlem a externím modulem pro konverzi NO₂ na NO s garantovanou min. 95 % konverzí a katalyzátorem na bázi uhlíku-molybdenu s dlouhodobou životností. Teplota spalin je přímo ve spalinovodu měřena termočlánkem typu K. Ve spalovací komoře může být udržován trvalý podtlak 400 Pa nebo přetlak 600 Pa. Podtlak je vytvářen pomocí ejektoru umístěného ve spodní části komína.

Spalovací vzduch je dopravován k ústí komory pomocí vysokotlakého ventilátoru vybaveného frekvenčním měničem. Maximální výkon ventilátoru je $2500 \text{ m}_N^3/\text{h}$ při maximálním přetlaku 4 kPa.

System pro sběr dat umožňuje jednak automatický sběr dat po vteřině nebo po dvou minutách, anebo zápis dat na povel operátora. System sbírá data všech měřených veličin zahrnující průtoky spalovacího vzduchu, paliva a chladicí vody, teploty spalovacího vzduchu, paliva a chladicí vody, tlaky v přívodních potrubích a složení a teplotu spalin na výstupu ze spalovací komory. Všechny měřené a dopočítané veličiny řídicí jednotkou pak lze odečíst i z ovládacího panelu. Úkolem bezpečnostního systému je zajistit bezpečný a spolehlivý chod

zkušebního zařízení s využitím informací od čidel, umožňuje zabránit např. přehřátí chladicí vody. Součástí systému je zabezpečovací souprava určená k zapalování a ionizačnímu hlídání plamene plynového hořáku. Hořák je vybaven jednou společnou elektrodou pro hlídání i zapalování (tzv. jedno-elektrodový systém). Souprava je umístěna ve skříni, ovládací a signalizační prvky jsou na dveřích skříně. V případě utržení plamene nebo jeho vzdálení se od elektrody dojde k zániku ionizovaného prostředí a relé hlídače plamene se rozezne.



Obr. 11.2 – Technologické schéma zkušebny hořáků

11.2 Hořáky

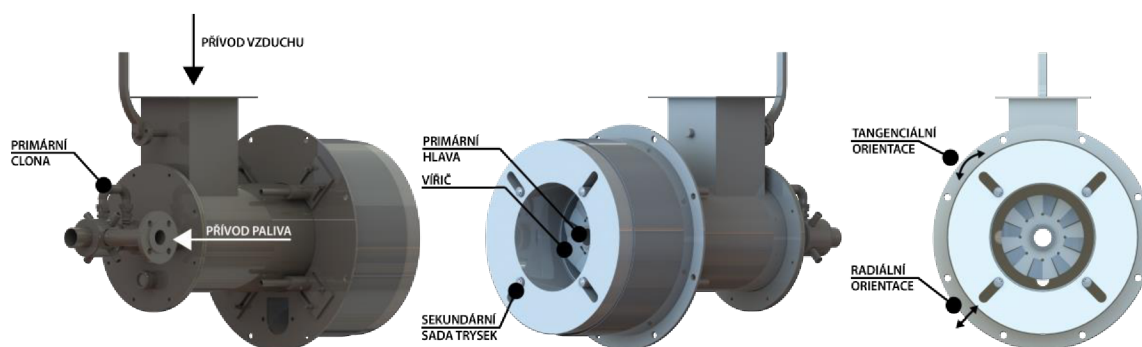
Z pilotních zkoušek, které proběhly na hořáku ZPH (viz. kapitola 11.2.1), vyplynulo, že pro získání dostatečného množství dat bude muset být měření provedeno na hořáku s jinou geometrií. Proto byly do původního plánu zahrnuty testy na hořáku APH (viz. kapitola 11.2.2). Nicméně ani s tímto zařízením se nepodařilo dosáhnout uspokojivých výsledků ochuzení paliva. Proto byla navržena nová hořáková vestavba a další měření bylo provedeno na hořáku určeném výhradně pro spalování nízko-výhřevných paliv (viz. kapitola 11.2.3).

11.2.1 Hořák ZPH

Hořák ZPH je navržen s dvoustupňovým přívodem paliva, ale je možné ho také provozovat v jedностupňovém režimu. Primární hlava hořáku je osazena dvanácti tryskami, které jsou rozmístěny ve dvou kruhových polích. Dále je zde 8 sekundárních trysek, které je možné měnit a přizpůsobit jejich sklon a natočení. Trysky je možné natáčet/posunovat jak v tangenciálním, tak i v radiálním směru vzhledem k ose hořáku. Natočení může být jak po směru, tak proti směru hodinových ručiček. Nejkratší radiální vzdálenost trysek od osy hořáku je 180 mm,

největší je pak 230 mm. Maximální výkon primárního stupně je možné ovlivnit vyměnitelnou clonou s různým průměrem. Tímto opatřením je také možné měnit poměr mezi primárním a sekundárním stupněm. 3D model hořáku je pak zobrazen na Obr. 11.3.

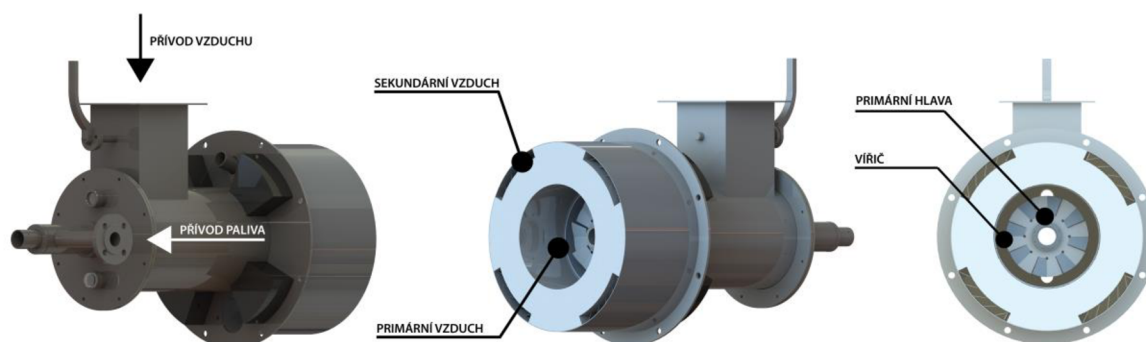
Hořák je vybaven tzv. poutačem plamene, který je zde ve formě víříče. Víříč se skládá z osmi lopatek, které jsou přichyceny k centrálnímu rozvodu plynu. Pro zapálení hořáku se používá hořák s přirozeným sáním vzduchu o maximálním výkonu 18 kW.



Obr. 11.3 – 3D model hořáku ZPH na zemní plyn

11.2.2 Hořák APH

Hořák umožňuje rozdělit proud spalovacího vzduchu mezi primární a sekundární kanál, pomocí různých typů vyměnitelných vestaveb. Díky této modulaci je možné ovlivnit teplotní pole uvnitř hořáku a eliminovat teplotní špičky, kde se vytváří oxidy dusíku. Primární hlava hořáku má celkem 16 trysek rozmístěných do 2 kruhových polí. Pole blíže k víříči zajišťuje stabilitu plamene, tzv. stabilizační trysky, zatímco pole na vrcholu hořákové hlavy je nasměrováno po směru hoření plamene a zajišťuje výkon hořáku, tzv. výkonové trysky. Vlastnosti hořáku a tedy i charakter proudění spalovacího vzduchu lze měnit pomocí poutačů plamene (víříčů) s rozdílnou geometrií. Hořák je navržen tak, aby umožňoval regulaci výkonu v rozsahu 1:10. Model hořáku je zobrazen na Obr. 11.4. Stejně tak jako u hořáku ZPH je pro zapálení hořáku použit hořák s přirozeným sáním vzduchu.

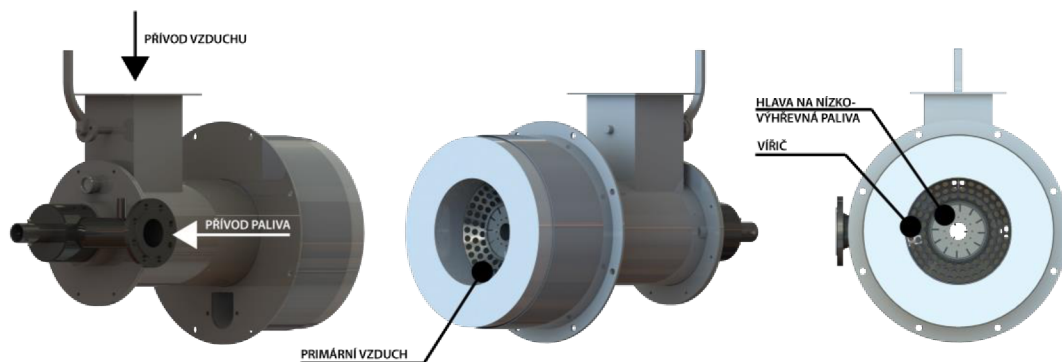


Obr. 11.4 – 3D model hořáku APH na zemní plyn

11.2.3 Hořák LPH

Při zkoušení výše zmíněných typů hořáků vyplynulo, že bude nutné hořáky modifikovat anebo přijít s novým řešením. Výsledky měření na hořácích ZPH a hořáku APH a jejich evaluace je podrobněji rozebrána v kapitolách 11.4 a 11.5.

Během zkoušek se ukázalo, že geometrie konvenční hořáku neumožňuje splnit nároky vyšších průtoků nízko-výhřevného paliva. Aby bylo možné zjistit závislost mezi obsahem inertních plynů v palivu a jejich vlivem na výsledné emise oxidů dusíku, bylo nutné navrhnout novou geometrii. Zvolený postup a návrh hořákové vestavby je podrobně rozebrán v kapitolách 9 a 10.



Obr. 11.5 – 3D model hořáku LPH na nízko-výhřevný plyn

11.3 Plán měření

Jak již bylo popsáno na začátku kapitoly 1, zkoušky hořáku probíhaly při konstantním výkonu 500 kW tak, aby bylo možné naměřené hodnoty porovnat. Pro všechny tři hořáky byl předem určen postup najíždění výkonu. V první fázi byl hořák zapálen pomocí ušlechtilého paliva (zemního plynu) a až poté co byla vyhřáta spalovací komora, došlo k ustálení teploty spalin a také předávaného tepla do stěn komory (určeno na základě stabilizace výstupní teploty chladicí vody). Současně byl nastaven proud spalovacího vzduchu tak, aby spalování probíhalo s přebytkem $\alpha=1,15$, což odpovídá koncentraci 3 % O_2 v suchých spalinách. Po vyhřátí spalovací komory a stabilizaci provozních parametrů byl v druhé fázi do zemního plynu postupně přimícháván inertní plyn, aby nedošlo k narušení stability hoření a bylo tak možné dosáhnout zvolené koncentrace inertního plynu v palivu.

11.3.1 Měření složení a teploty spalin

Kromě toho, že v průběhu experimentální části byly postupně proměřeny jednotlivé hořáky, byly jednotlivé sekvence měření rozděleny podle toho, co bylo vyhodnocováno. V první fázi, která je označena jako TEST A, byl vyhodnocen vliv přidání jednotlivých inertních plynů na emise oxidů dusíku (NO_x), teplotu spalin v kouřovodu, tvar a stabilitu plamene. Plán měření pro jednotlivé hořáky disponoval určitými odlišnostmi, zejména díky rozdílným konstrukcím hořákových hlav, které velikostí otvorů omezovaly maximální možný průtok naředěného ušlechtilého paliva. Vzhledem k rozdílným vlastnostem dusíku a oxidu uhličitého se po přidání jednotlivých plynů podařilo u všech hořáků dosáhnout rozdílných maximálních průtoků. Proměřená nastavení pro dusík jsou souhrnně uvedena v Tab. 11.1, nastavení pro oxid uhličitý v Tab. 11.2 a pro jejich kombinace v Tab. 11.3.

Tab. 11.1 – Plán měření TEST A – N₂

	Průtok dusíku N ₂ [m _N ³ /h] / Výhřevnost paliva [MJ/m _N ³]													
	0	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	30	40	50	60	70	77,5
	36,3	33,0	31,6	30,3	29,0	27,9	26,9	25,9	22,7	20,2	18,2	16,5	15,1	14,2
TEST A														
ZPH primární	•	•	•	•	•	•	–	–	–	–	–	–	–	–
ZPH sekundární	•	•	•	•	•	•	•	•	–	–	–	–	–	–
APH primární	•	–	–	•	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
APH sekundární	•	–	–	•	–	–	–	•	•	•	•	•	•	•
	Průtok dusíku N ₂ [m _N ³ /h] / Výhřevnost paliva [MJ/m _N ³]													
		0		30		60		90		120				
		36,3		22,7		16,5		13,0		10,7				
LPH		•		•		•		•		•				

Tab. 11.2 – Plán měření TEST A – CO₂

	Průtok dusíku CO ₂ [m _N ³ /h] / Výhřevnost paliva [MJ/m _N ³]											
	0	5	7,5	10	20	30	40	50	60	90	120	
	36,3	33,0	31,6	30,3	25,9	22,7	20,2	18,2	16,5	13,0	10,7	
TEST A												
ZPH primární	•	•	•	•	–	–	–	–	–	–	–	
ZPH sekundární	•	•	•	•	–	–	–	–	–	–	–	
APH primární	•	–	–	•	–	–	–	–	–	–	–	
APH sekundární	•	–	–	•	•	•	•	•	•	–	–	
LPH	•	–	–	–	–	•	–	–	•	•	•	

Tab. 11.3 – Plán měření TEST A – CO₂/N₂

	Průtok dusíku CO ₂ [m _N ³ /h] / Průtok dusíku N ₂ [m _N ³ /h]		
	Výhřevnost paliva [MJ/m _N ³]		
	0	5/5	5/7,5
	36,3	30,3	29,0
TEST A			
ZPH primární	•	•	•
ZPH sekundární	•	•	•

11.3.2 Měření teplot v plamenu

Druhá sekvence, označovaná jako TEST B, spočívala v měření teploty plamene v horizontální rovině souměrnosti spalovací komory. Měření probíhalo termočlánky zkonstruovanými pro použití v spalovací komoře na zkušební hořáky. K měření byly použity vodou chlazené termočlánky typu R (platina-platina-13%-rhodium), které bez problémů zvládají teplotu do 1480 °C. Krátkodobě však umožňují zaznamenat teploty až do 1760 °C [99]. Vodiče termočlánku byly vedeny keramickým hrotem, který má primárně vodiče chránit před poškozením. Keramický hrot byl usazen do vodou chlazeného nerezového výměníku typu trubka v trubce, kterým bylo přivedeno měděné kompenzační vedení. Výstupní proud z termočlánku byl přiveden k dataloggeru midi LOGGER GL2220 od společnosti Graphtec. Pomocí záznamového zařízení byla data z průběhu měření uložena a připravena pro další zpracování. Zařízení disponuje celkem 10 vstupy, nicméně pro potřeby zkoušek jich bylo

využito pouze 8, což odpovídá počtu průhledítek (inspekčních otvorů) na straně spalovací komory.

Pro správné změření teploty v plamenu bylo nutné nejprve stabilizovat podmínky uvnitř spalovací komory, které nesmí být v průběhu experimentu změněny. Jedná se zejména o nastavení konstantního výkonu a průtoku inertního plynu a následně o stabilizaci výstupní teploty spalin. Měření probíhalo v minutových intervalech, přičemž pro samotné měření bylo vyhrazeno 30 sekund, zbývající čas byl vyhrazen na změnu pozice termočlánku. Termočlánky byly postupně zasouvány v horizontální rovině směrem k ose komory. Počáteční pozicí byla vzdálenost 5 cm (z konstrukčních důvodů není možné měřit ve vzdálenosti 0 cm) od vnitřní strany pláště komory, následovaná pozicemi na 10, 20, 30, 40 a 50 cm. Plán měření teplot v plamenu je uveden v Tab. 11.4.

Tab. 11.4 – Plán měření TEST B – N_2 a CO_2

	Průtok dusíku N_2 [m_N^3/h]				Průtok dusíku CO_2 [m_N^3/h]			
	Výhřevnost paliva [MJ/m_N^3]				Výhřevnost paliva [MJ/m_N^3]			
	0	10	30	60	0	10	30	60
	36,3	30,3	22,7	16,5	36,3	30,3	22,7	16,5
TEST B								
ZPH primární	•	•	–	–	•	•	–	–
ZPH sekundární	•	•	–	–	•	•	–	–
APH primární	•	–	–	–	•	–	•	–
APH sekundární	•	–	•	•	•	–	•	•
	Průtok dusíku CO_2 a N_2 [m_N^3/h] / Výhřevnost paliva [MJ/m_N^3]							
	0	30	60	90	120			
	36,3	22,7	16,5	13,0	10,7			
LPH	•	•	•	•	•			

11.3.3 Měření tepelných toků

Měření tepelných toků je v této práci uváděno pod označením TEST C. Před samotným měřením bylo nezbytné odvdzdušnit jednotlivé sekce spalovací komory, aby nedocházelo ke zkreslení experimentálních dat. Měření při jednotlivých nastaveních standardně probíhalo 20 minut, nicméně před zahájením měření muselo dojít k ustálení tepelných toků. Tepelné toky bylo možné vypočítat na základě znalosti průtoku a vstupní a výstupní teploty chladicí vody. Při výpočtu tepelných toků se vychází z kalorimetrické rovnice.

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{v,i} \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i = \rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i \quad (65)$$

$$\dot{q}_i = \frac{\rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i}{A_i} = \frac{\rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot (t_{out,i} - t_{in,i})}{L_i \cdot \pi} \quad (66)$$

kde: \dot{Q}_i – tepelný tok pro *i-tou* sekci [W],
 $m_{v,i}$ – hmotnostní průtok pro *i-tou* sekci [kg/s],
 $c_{p,i}$ – měrná tepelná kapacita [J/kg·K],
 Δt_i – rozdíl teplot chladicí vody na výstupu a vstupu [°C],
 \dot{q}_i – hustota tepelného toku *i-té* sekce [W/m²],
 $V_{v,i}$ – objemový průtok pro *i-tou* sekci [m³/s],
 ρ_i – hustota vody závislosti na teplotě [kg/m³],
 A_i – plocha *i-té* sekce [m²],
 L_i – délka *i-té* sekce [m],
 $t_{out,i}$ – výstupní teplota chladicí vody *i-té* sekce [°C],
 $t_{in,i}$ – vstupní teplota chladicí vody *i-té* sekce [°C].

Pro výpočet byla uvažována konstantní hustota chladicí vody a také konstantní hodnota tepelné kapacity v celé sekci komory. Obě veličiny byly aproximovány pomocí následujících vztahů [100]:

$$\rho_t = 1006 - 0,26 \cdot \frac{\hat{t}_1}{2} - 0,26 \cdot \left(\frac{\hat{t}_1}{2}\right)^2 \quad (67)$$

kde: ρ_t – hustota vody závislosti na teplotě [kg/m³],
 \hat{t}_1 – je součet teploty na vstupu a na výstupu (69) [°C].

$$c_{p,i} = 4210 - 1,363 \cdot \frac{\hat{t}_1}{2} - 0,014 \cdot \left(\frac{\hat{t}_1}{2}\right)^2 \quad (68)$$

kde: ρ_t – hustota vody závislosti na teplotě [kg/m³],
 \hat{t}_1 – je součet teploty na vstupu a na výstupu (69) [°C].

$$\hat{t}_1 = t_{in,i} + t_{out,i} \quad (69)$$

Tab. 11.5 – Plán měření (●označuje nastavení, při kterém bylo provedeno měření)

	Průtok dusíku N ₂ [mN ³ /h] Výhřevnost paliva [MJ/mN ³]				Průtok dusíku CO ₂ [mN ³ /h] Výhřevnost paliva [MJ/mN ³]			
	0	10	30	60	0	10	30	60
	36,3	30,3	22,7	16,5	36,3	30,3	22,7	16,5
TEST C								
ZPH primární	–	–	–	–	–	–	–	–
ZPH sekundární	●	●	–	–	●	●	–	–
APH primární	●	–	–	–	–	–	–	–
APH sekundární	●	–	●	●	●	–	●	–
	Průtok dusíku CO ₂ a N ₂ [mN ³ /h] / Výhřevnost paliva [MJ/mN ³]							
	0	30	60	90	120			
	36,3	22,7	16,5	13,0	10,7			
LPH	●	●	●	●	●			

Měření tepelných toků podléhá tzv. chybové analýze. Pomocí této analýzy jsou odhaleny chyby systematické a také chyby náhodné, které se projeví během měření. Nejvýznamnější vliv na přesnost naměřených hodnot mají především měřicí přístroje. Pro určení nepřesnosti je tedy nutné vzít v potaz nepřesnost měření definovanou výrobcem každého použitého zařízení. V tomto případě se vychází ze znalosti známých chyb hodnot teplot a průtoků, které byly využity pro dopočítání absolutních chyb tepelných toků pomocí vzorce pro výpočet rozptylu [101]:

$$\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 \quad (70)$$

kde: σ_P je rozptyl produktu P,
 σ_A je rozptyl nezávislé proměnné A,
 σ_B je rozptyl nezávislé proměnné B.

Pro další výpočet se předpokládá konstantní hustota a tepelná kapacita chladicí vody v jednotlivých sekcích spalovací komory. Proměnná A je tedy v tomto případě definovaná jako objemový průtok chladicí vody V_i a proměnná B vyjadřuje rozdíl teplot chladicí vody na vstupu a na výstupu Δt . Směrodatnou odchylku tepelného toku je pak možné pro *i-tou* sekci vyjádřit z:

$$\left(\frac{\sigma_{q_i}}{q_i}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{out,i}}^2 + \sigma_{t_{in,i}}^2}{\Delta t_i^2} \quad (71)$$

Po separaci proměnné σ_{q_i} dostane rovnice tvar:

$$\sigma_{q_i} = q_i \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{out,i}}^2 + \sigma_{t_{in,i}}^2}{\Delta t_i^2}} \quad (72)$$

Pro měření teploty chladicí vody byly použity odporové teploměry PTP50J od výrobce Rawet s teplotním rozsahem 0 – 100 °C a přesností udávanou výrobcem $\pm 0,5\%$ z měřicího rozsahu,

maximálně však $\pm 0,25$ °C. Průtokoměr chladicí vody byl od výrobce Sensus typ 420 s přesností třídy C a maximálním průtokem $10 \text{ m}^3/\text{hod}$. Průtokoměr disponuje přesností ± 2 % z měřicího rozsahu. Průtokoměr je vybaven impulsním a datovým systémem HRI s impulsním výstupem 1 litr/puls.

Pro analýzu naměřených hodnot byla použita rovnice (72). Průměrná hodnota chyb je pro všechny sekce vypočtena v Tab. 11.6. Kompletní chybová analýza pro všechna měření tepelných toků na všech třech typech hořáků je k nahlédnutí v příloze P15.

Tab. 11.6 – Průměrná relativní chyba v jednotlivých sekcích

	Sekce 1	Sekce 2	Sekce 3	Sekce 4	Sekce 5	Sekce 6	Sekce 7
Relativní chyba [%]	3,89	2,76	2,67	2,84	3,25	3,71	3,04

11.4 Výsledky měření – hořák ZPH

Hořák ZPH, který byl původně navržen jako hořák se stupňovitým přívodem ušlechtilého paliva, neumožňoval dosáhnout velkého naředení zemního plynu inertními plyny při konstantním výkonu 500 kW. Již během prvního měření na hořáku bylo možné pozorovat, že tato konstrukce hořáku bude pro tento typ zkoušek nevhodná. V případě spalování pouze pomocí primárního stupně nebyla použita žádná omezovací clona na straně vstupujícího plynu a byl použit víříč se sklonem lopatek 30° a průměrem 245 mm. Během provozu sekundárního stupně byl ponechán stejný víříč jako v předchozím případě a zároveň byla v primárním stupni použita clona o průměru 6 mm, která zajistila rozdělení paliva mezi primárním a sekundárním stupněm v poměru 30/70. Během spalovacích zkoušky byly použity trysky sekundárního stupně s úhlem sklonu hlavy 20° . Trysky byly natočeny pod úhlem 30° ve směru rotace spalovacího vzduchu a jejich vzdálenost od osy hořáku byla nastavena na 230 mm. Vzhledem k tomu, že se při použití tohoto hořáku jednalo o prvotní zkoušky se směšovací stanicí a nízko-výhřevnými palivy vůbec, probíhalo přidávání inertního plynu do ušlechtilého paliva pouze v malých krocích tak, aby bylo možné získané poznatky správně vyhodnotit. Jak v případě oxidu uhličitého, tak i dusíku umožňoval ovládací ventil minimální průtok $5 \text{ mN}^3/\text{h}$ (odpovídající výhřevnosti paliva $33,0 \text{ MJ}/\text{mN}^3$). V případě, kdy byl přidáván dusík, byl průtok v dalších měřeních postupně zvyšován o $2,5 \text{ mN}^3/\text{h}$ až na hodnotu $15 \text{ mN}^3/\text{h}$ (primární stupeň, odpovídá výhřevnosti paliva $27,9 \text{ MJ}/\text{mN}^3$) a $20 \text{ mN}^3/\text{h}$ (sekundární stupeň, odpovídá výhřevnosti paliva $25,9 \text{ MJ}/\text{mN}^3$). Při přidání oxidu uhličitého do paliva bylo v důsledku vyšší molekulové hmotnosti CO_2 dosaženo nižších průtoků: $10 \text{ mN}^3/\text{h}$ v primárním i v sekundárním režimu (odpovídá výhřevnosti paliva $30,3 \text{ MJ}/\text{mN}^3$). Ve všech případech se jednalo o maximální průtok, kterého bylo možné dosáhnout, aby nedošlo ke zhasnutí plamene. U obou inertních plynů se při dosažení maximálního přidávaného množství projevila nestabilita plamene a docházelo k jeho utržívání na některých lopatkách víříče.

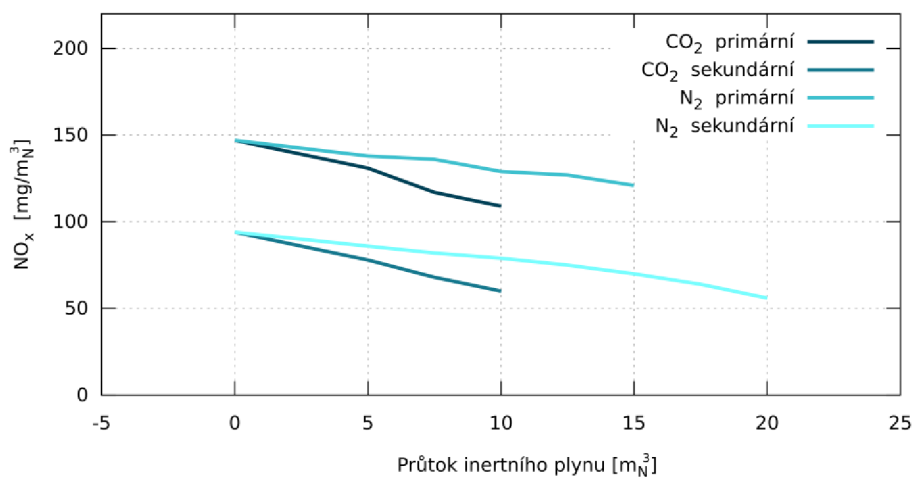
11.4.1 Emise a stabilita plamene

Emise oxidů dusíku (NO_x) vykazovaly jasný trend. Přidávání inertního plynu do ušlechtilého paliva mělo pozitivní vliv na redukci jejich koncentrace ve spalinách. Efekt každého z plynů byl však odlišný. Během měření, kdy bylo do paliva přidáváno $15 \text{ mN}^3/\text{h}$ dusíku, došlo na hořáku provozovaném v primárním režimu k poklesu NO_x o $26 \text{ mg}/\text{mN}^3$ (snížení o 17 %) ze

147 mg/m_N³ (referenční hodnota získaná spalováním čistého ušlechtilého paliva s výhřevností 36,3MJ/m_N³) na 121 mg/m_N³. V případě porovnání stejného paliva spalovaného v sekundárním režimu hořáku došlo k poklesu o 24 mg/m_N³ z původní hodnoty 94 mg/m_N³ na 70 mg/m_N³, což odpovídá poklesu 25 %. Díky větší ploše trysek bylo v sekundárním režimu možné do paliva přidat větší množství dusíku (20 m_N³/h), přičemž bylo dosaženo výhřevnosti paliva 26,9 MJ/m_N³ a NO_x byly zredukovány až na 56 mg/m_N³ (redukce o 40 %).

Podobný efekt mělo také přidání oxidu uhličitého. Přidání maximálního množství 10 m_N³/h do zemního plynu a následné spalování v primárním režimu přineslo redukcí NO_x o 38 mg/m_N³ (snížení o 25 %) ze 147 mg/m_N³ na 109 mg/m_N³. Pro stejnou směs paliva bylo během provozu hořáku v sekundárním režimu dosaženo, v porovnání s ušlechtilým palivem, snížení o 34 mg/m_N³ (redukce 36 %), přičemž naměřená hodnota byla 60 mg/m_N³. Při porovnání ekvivalentních průtoků inertních plynů je vidět, že oxid uhličitý má mnohem větší efekt na redukcí NO_x než N₂. To je hlavně dáno schopností CO₂ absorbovat více tepelné energie, čímž dochází k daleko většímu ochlazení plamene. Dalším vysvětlením rozdílu vlivu jednotlivých inertních plynů může být schopnost N₂ obsaženého v palivu reagovat s volným kyslíkem. Po přidání sice dochází k ochlazení plamene, ale navýšení koncentrace N₂ v prostoru plamene může zapříčinit vznik většího množství NO_x. Naproti tomu CO₂ plamen pouze ochlazuje a s žádnou složkou paliva nereaguje.

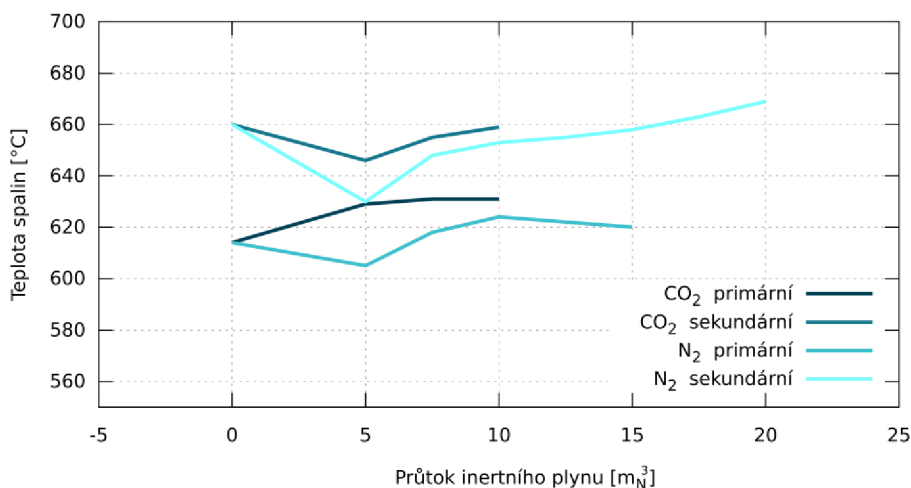
V rámci této série experimentů bylo také proměřeno palivo, ve kterém se vyskytovaly současně oba inertní plyny. Tento test nepřinesl žádné nestandardní výsledky, v podstatě byl potvrzen klesající trend vyplývající z předchozích měření. Největší vliv na redukcí NO_x má především CO₂, vliv N₂ je nižší. Pro lepší srozumitelnost jsou výsledky prezentovány také ve formě grafu na Obr. 11.6 a také v Tab. 11.7.



Obr. 11.6 – Hořák ZPH – vliv inertních plynů na emise NO_x

Teplota spalin bezprostředně po přidání inertního plynu klesla, ale s dalším zvyšováním průtoku inertních plynů se trend otočil. Během zkoušek v primárním režimu teplota spalin vzrostla z 629 °C na 643 °C při průtoku 15 m_N³/h N₂ a na 654 °C při průtoku 10 m_N³/h CO₂. V sekundárním režimu hořáku se po přidání dusíku do paliva projevil stejný fenomén jako v primárním režimu a po dosažení průtoku 20 m_N³/h N₂ v palivu teplota vzrostla z původních 683 °C na 692 °C. Podobný průběh bylo možné pozorovat také během přidání CO₂, v okamžiku

když průtok dosáhl 10 m_N³/h došlo ke změně trendu a teplota vzrostla na 682 °C. Průběh teplot byl s největší pravděpodobností dán konstrukcí hořáku. Po přidání inertního plynu došlo ke zvětšení objemu paliva, což se na výstupu z trysek projevilo vyšší rychlostí plynů, díky které bylo palivo rozptýleno na delším úseku a došlo k jeho vyhoření až v zadní části komory. Tuto domněnku potvrzuje i rozložení teplot v plamenu po přidání inertního plynu (Obr. 11.13 a Obr. 11.14). Vývoj teploty je patrný z grafu na Obr. 11.7.



Obr. 11.7 – Hořák ZPH – vliv inertních plynů na teplotu v plamenu

Dusík přidávaný do hořáku provozovaném v primárním režimu stabilitu plamene nijak zásadně neovlivnil, plamen hořel stabilně v celém rozsahu. To bylo dáno jednak tím, že veškeré palivo bylo vstříkáváno do středu hořáku (jádra plamene) a jednak skutečností, že ochuzení paliva bylo stále nízké. Lze ale předpokládat, že pokud by bylo možné dosáhnout vyšších průtoků N₂, pak by se nestabilita hoření začala projevovat výrazněji. V sekundárním režimu byla stabilita plamene dobrá až do průtoku 15 m_N³/h N₂. Při průtocích nad 15 m_N³/h N₂ se plamen začínal na některých lopatkách víříče utrhávat. V tomto režimu by nebylo možné zařízení dlouhodobě provozovat. Nestabilita byla zejména dána tím, že 70 % paliva bylo distribuováno skrz sekundární trysky a v jádru plamene nebylo dostatečné množství hořlavého plynu, který by plamen stabilizoval. Zlepšení stability by s největší pravděpodobností pomohla změna primární clony na clonu o větším průměru, tj. do primárního stupně by vstupovalo větší množství paliva.

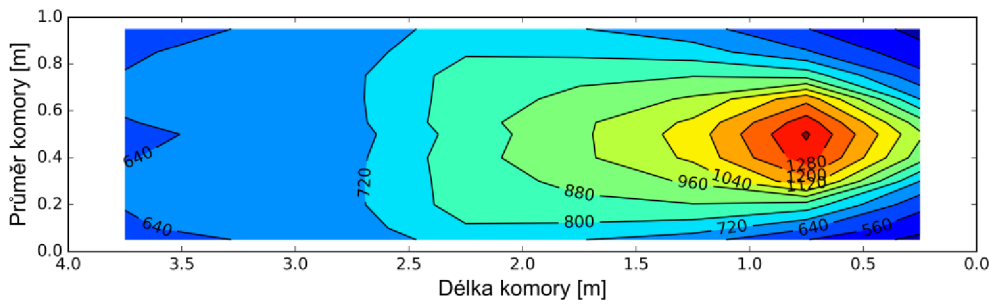
S přidáním dusíkem bylo možné pozorovat změnu v barvě plamene. Při jednostupňovém spalování byl plamen modrožlutý a s přidáváním inertním plynem docházelo spíše k jeho žloutnutí. Při dvoustupňovém spalování zůstávalo jádro modré, obálka se však postupně ze žluté zbarvila domodra. Podobné změny bylo možné pozorovat i po přidání oxidu uhličitého, nicméně modrá barva byla intenzivnější. Na primární hlavě bylo v plamenu možné rozlišit jednotlivé proudy paliva vystupujícího s trysek. Přidávání inertních plynů mělo také vliv na délku plamene, po přidání balastního plynu došlo ke značnému zkrácení plamene, v některých případech až o 0,65 m.

Tab. 11.7 – Výsledky měření na hořáku ZPH TEST A

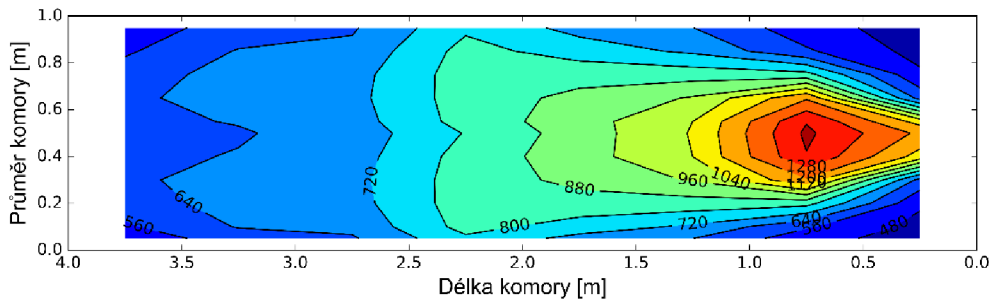
Výkon hořáku [kW]	Typ hořáku [-]	Režim hořáku [-]	Průtok CO ₂ [m _N ³ /h]	Průtok N ₂ [m _N ³ /h]	NO _x [ppm]	NO _x [mg/m _N ³]	Délka plamene [m]	Průměr plamene [m]	Teplota spalin [°C]
500	ZPH	Primární	0	0	72	147	2,25	0,65	614
500	ZPH	Primární	0	5	67	138	2,2	0,65	605
500	ZPH	Primární	0	7,5	66	136	2	0,65	618
500	ZPH	Primární	0	10	63	129	1,75	0,65	624
500	ZPH	Primární	0	12,5	62	127	1,6	0,65	622
500	ZPH	Primární	0	15	59	121	1,75	0,65	620
500	ZPH	Primární	5	0	64	131	2	0,65	629
500	ZPH	Primární	7,5	0	57	117	1,5	0,65	631
500	ZPH	Primární	10	0	53	109	1,5	0,5	631
500	ZPH	Primární	5	5	59	121	1,75	0,55	620
500	ZPH	Primární	5	7,5	58	120	1,6	0,55	628
500	ZPH	Sekundární	0	0	46	94	2,5	0,75	660
500	ZPH	Sekundární	0	5	42	86	2,5	0,7	630
500	ZPH	Sekundární	0	7,5	40	82	2,3	0,7	648
500	ZPH	Sekundární	0	10	39	79	2,25	0,65	653
500	ZPH	Sekundární	0	12,5	36	75	2	0,65	655
500	ZPH	Sekundární	0	15	34	70	2,2	0,65	658
500	ZPH	Sekundární	0	17,5	31	64	2	0,65	663
500	ZPH	Sekundární	0	20	27	56	2,2	0,65	669
500	ZPH	Sekundární	5	0	38	78	2,25	0,65	646
500	ZPH	Sekundární	7,5	0	33	68	2,25	0,65	655
500	ZPH	Sekundární	10	0	29	60	2,1	0,65	659

11.4.2 Teploty v plamenu

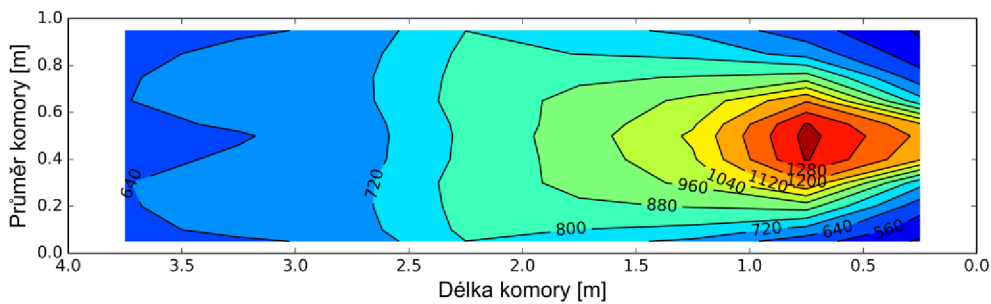
Při analýze teplot v plamenu je vidět, že po přidání inertních plynů do paliva dochází ke změně v rozložení teplot. Na Obr. 11.8 je zobrazena mapa teplotních polí plamene získaných měřeními při jednostupňovém spalování samotného zemního plynu. Nejvyšší teploty nad 1320 °C jsou v jádru plamene přibližně ve vzdálenosti 0,75 m od hořáku. Teplota plamene se ve směru hoření postupně snižuje, stejně tak je nižší teplota plamene u chlazených stěn spalovací komory, kde je část tepla odebrána. Po přidání 10 m_N³/hod N₂ došlo ke změně teplot v jádru plamene, tak jak je znázorněno na Obr. 11.9. Jádro plamene se posunulo směrem k hořáku a došlo k jeho zúžení, což byl důsledek vyšších výstupních rychlostí s hořákové hlavy. Vyšší výstupní rychlost vyvolala turbulentní proudění v jádru plamene, díky čemuž se palivo se vzduchem rychleji promíchalo. V těsné blízkosti hořáku je také možné pozorovat nárůst teplot. Tento jev koresponduje se zjištěním, že po přidání dusíku došlo ke zkrácení plamene. Od třetí sekce spalovací komory (tj. od vzdálenosti 1 m) směrem ke spalinovodu je tvar teplotního pole téměř identický jako v případě spalování samotného zemního plynu. Výrazné ochlazení plamene je možné pozorovat na Obr. 11.10, kde byl do paliva přidán oxid uhličitý. Téměř vymizely teploty nad 1320 °C a opět je zřejmý trend zkracujícího se plamene. K většímu uvolňování tepla (v porovnání s Obr. 11.8) dochází přímo v okamžiku, kdy palivo opouští primární trysku. Obecně lze říct, že po přidání inertního plynu jsou jednotlivá teplotní pole menší, což naznačuje, že došlo k ochlazení plamene. Přimíchání N₂ a CO₂ do paliva o celkovém průtoku 10 m_N³/hod (v poměru 1:1) nepřineslo žádné neočekávané výsledky. Rozložení teplotních polí je v podstatě průsečíkem mezi přidáním samotného N₂ a CO₂, což je vidět na Obr. 11.11.



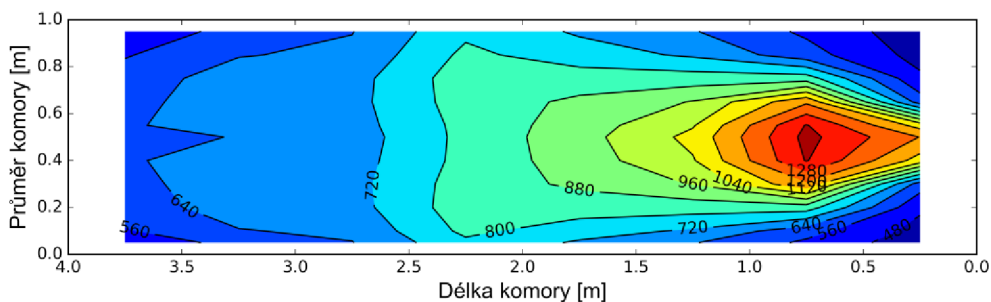
Obr. 11.8 – Hořák ZPH – primární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.9 – Hořák ZPH – primární režim – $10 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



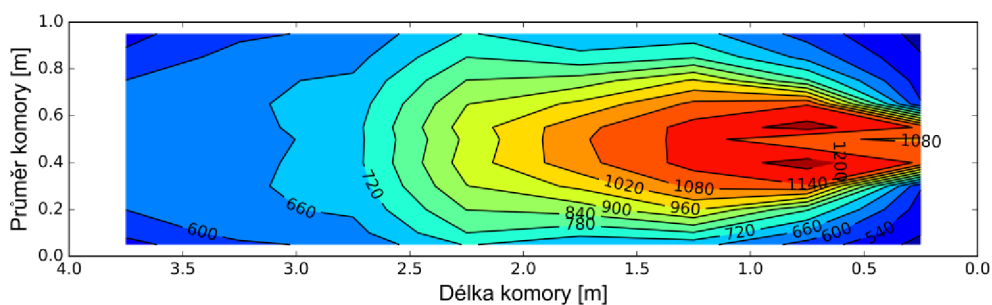
Obr. 11.10 – Hořák ZPH – primární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $10 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



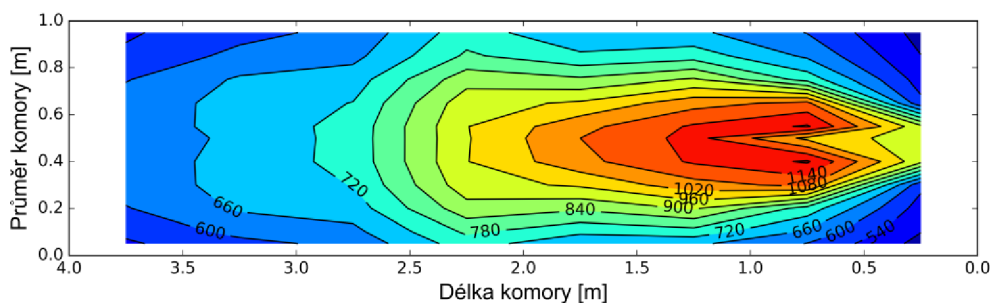
Obr. 11.11 – Hořák ZPH – primární režim – $5 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $5 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

Dvoustupňové spalování paliva se v průmyslu používá hlavně z důvodu snížení teplotních špiček v plamenu a tedy tím i snížení tvorby NO_x . V důsledku toho, že přívod paliva není koncentrován do jednoho místa, jako je tomu u jednostupňového přívodu, je dosaženo širšího a delšího plamene. Srovnáním teplotních polí na Obr. 11.8 a Obr. 11.12 lze vidět, že v případě jednostupňového spalování jsou nejvyšší teploty koncentrovány do jednoho místa, a to do středu plamene. V případě dvoustupňového spalování, došlo v důsledku distribuce paliva na větší vzdálenost ke snížení teplot. Je zde patrný teplotní rozdíl ca. $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Toto snížení má již značný vliv na produkci termických oxidů dusíku, neboť jejich tvorba je přibližně

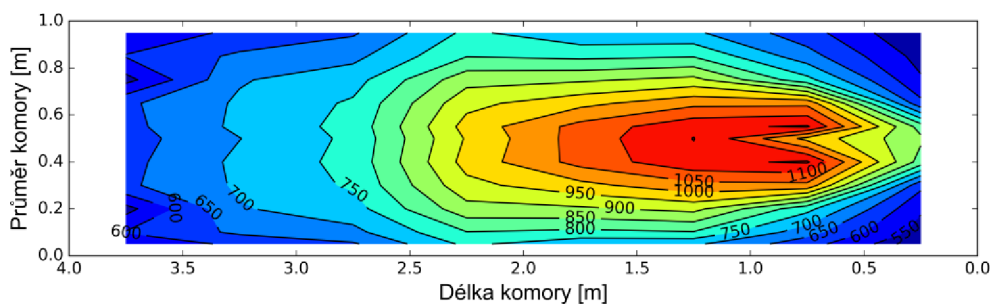
exponenciálně závislá na teplotě. To znamená, že i malé snížení teplotních špiček má za následek velké snížení tvorby NO_x . Zároveň je možné si všimnout, že se plamen díky nastříkávání paliva pomocí sekundárních trysek prodloužil i rozšířil. Dochází tedy k postupnému uvolňování dodané tepelné energie na větším prostoru. Centrum s největší koncentrací uvolňování tepelné energie není přímo v ose hořáku, ale je rozloženo v kruhovém poli přibližně 10 cm od osy spalovací komory. K mnohem výraznější změně, než při provozu v primárním režimu, došlo po přidání N_2 do paliva. Plamen se viditelně ochladil, teplota byla snížena o ca. $80\text{ }^\circ\text{C}$ a na Obr. 11.13 je možné pozorovat, že teploty v bezprostřední blízkosti hořákového kamene také poklesly. Obecně lze ale říct, že dusík ovlivnil oblast teplot nad $840\text{ }^\circ\text{C}$ (vzdálenost 2,5 m od ústí hořáku) tak, že došlo k jejímu natažení směrem ke konci spalovací komory. S největší pravděpodobností to bylo způsobeno vyšší rychlostí paliva vstupujícího do spalovací komory, kdy k vyhoření části paliva došlo až ve větší vzdálenosti od hořáku. Ještě větší ochlazení v plamenu je možné pozorovat po přidání CO_2 . Tvar teplotních polí je celkově podobný jako po přidání N_2 , což je vidět na Obr. 11.14. Dochází ke snížení teplotních špiček přibližně o $100\text{ }^\circ\text{C}$. Přidání obou inertních plynů do paliva zároveň lze při pohledu na Obr. 11.15 opět popsat tak, jako že se jedná o kompromis mezi Obr. 11.13 a Obr. 11.14.



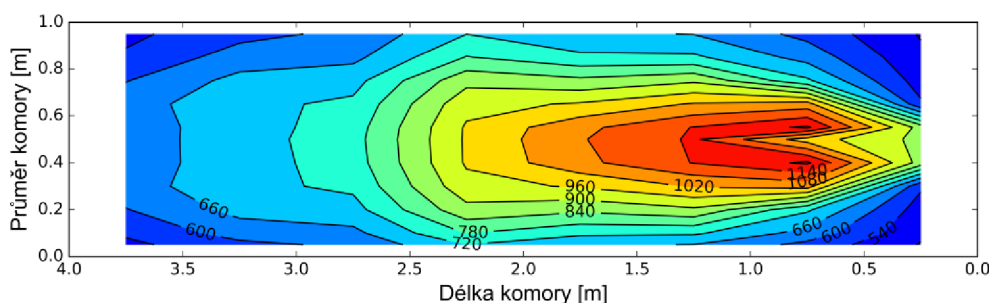
Obr. 11.12 – Hořák ZPH – sekundární režim – $0\text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0\text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.13 – Hořák ZPH – sekundární režim – $10\text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0\text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.14 – Hořák ZPH – sekundární režim – $0\text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $10\text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.15 – Hořák ZPH – sekundární režim – $5 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $5 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

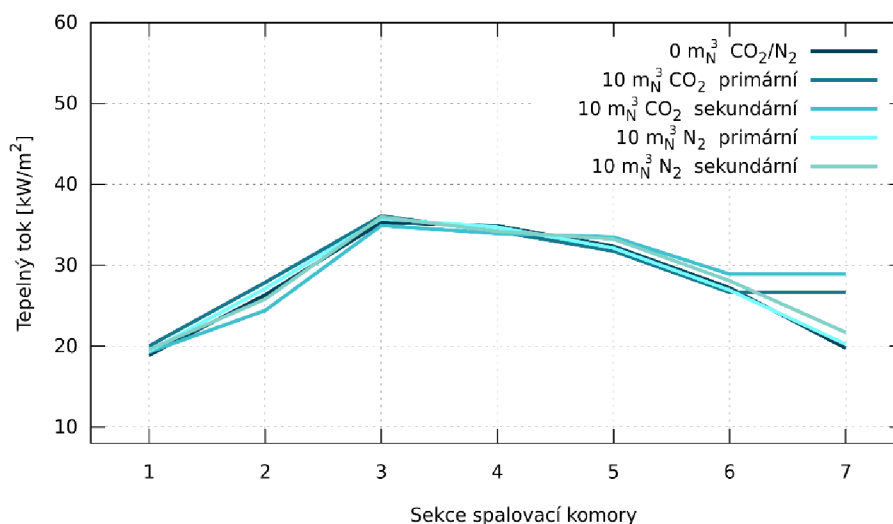
11.4.3 Tepelné toky a termická účinnost

Množství přidávaného balastního plynu do ušlechtilého paliva bylo natolik nízké, že tepelné toky nebyly po přidání inertního plynu nějak výrazně ovlivněny. Tím, že byl navýšen objem plynů vystupujících ze spalovací komory, které odebírají část tepla, dochází v zadní části komory k mírnému nárůstu. Při porovnání vlivu inertních plynů na tepelné toky je patrné, že oxid uhličitý dokáže díky své větší emisivitě předat více tepla než dusík a to navzdory tomu, že byl plamen celkově více ochlazen. Současně je možné pozorovat nárůst termické účinnosti[‡], jak je uvedeno v Tab. 11.8. U celkového tepelného toku je spíše patrný trend, že po přidání inertního plynu má termická účinnost tendenci se snižovat. Jedná se však pouze o malé množství balastního plynu v palivu na to, aby bylo možné vyvodit definitivní závěry. Je to i z toho důvodu, že naměřené hodnoty jsou na úrovni statistické chyby, což je patrné již při prvním pohledu na Obr. 11.16.

Tab. 11.8 – Výsledky měření na hořáku ZPH TEST C

Výkon hořáku	Typ hořáku	Režim hořáku	Průtok CO ₂	Průtok N ₂	Celkový tepelný výkon	Termická účinnost
[kW]	[-]	[-]	[m _N ³ /h]	[m _N ³ /h]	[kW]	[%]
500	ZPH	Primární	0	0	324,39	64,78
500	ZPH	Primární	0	10	327,68	65,26
500	ZPH	Primární	10	0	329,23	65,87
500	ZPH	Primární	5	5	330,61	66,23
500	ZPH	Sekundární	0	0	333,86	66,52
500	ZPH	Sekundární	0	10	333,12	66,45
500	ZPH	Sekundární	10	0	336,75	67,17
500	ZPH	Sekundární	5	5	333,61	66,16

[‡] Termická neboli tepelná účinnost vypovídá o tom, jak efektivně dokáže být využito přivedené teplo. V případě spalování se jedná o poměr mezi odvedeným teplem do stěn spalovací komory a celkovým tepelným výkonem hořáku.



Obr. 11.16 – Hořák ZPH – tepelné toky

11.4.4 Test stability

Provoz hořáku spalujícího nízko-výhřevné palivo byl také podroben testu stability. Pro účely testu bylo do paliva přidáno 10 m³/hod N₂ a následně 10 m³/hod CO₂. Test stability spočíval ve snižování, resp. zvyšování, průtoku spalovacího vzduchu, tak aby bylo dosaženo přebytku $\alpha = 1,05$ (1,1 % O₂ ve spalinách), resp. $\alpha = 2,97$ (14,3 % O₂ ve spalinách). Hořák byl během testu stability provozován v sekundárním režimu. Při testu bylo možné pozorovat vysokou stabilitu plamene jak při podmínkách, které se blížily stechiometrickému spalování ($\alpha = 1,05$), tak při značném přebytku spalovacího vzduchu, který odpovídal $\alpha = 1,7$. Další navyšování průtoku spalovacího vzduchu až na hodnotu přebytku $\alpha = 2,97$ způsobilo, že plameny vystupující ze sekundárních trysek se začaly utrhávat a měly tendenci zhasínat. Při tomto „extrémním“ přebytku vzduchu byl plamen silně nestabilní. Během testu byly také zaznamenávány emise NO_x. S navyšující se koncentrací kyslíku, a celkově i balastního dusíku, ve spalinách dochází k ochlazení plamene a snížení tvorby NO_x. Pokles byl také zaznamenán v případě snižování přebytku spalovacího vzduchu, tak jako ho popisuje Baukal [42]. Tento jev byl dán tím, že v peci nebylo k dispozici dostatečné množství volného kyslíku, který by s dusíkem reagoval a vytvořil směs ve formě NO nebo NO₂.

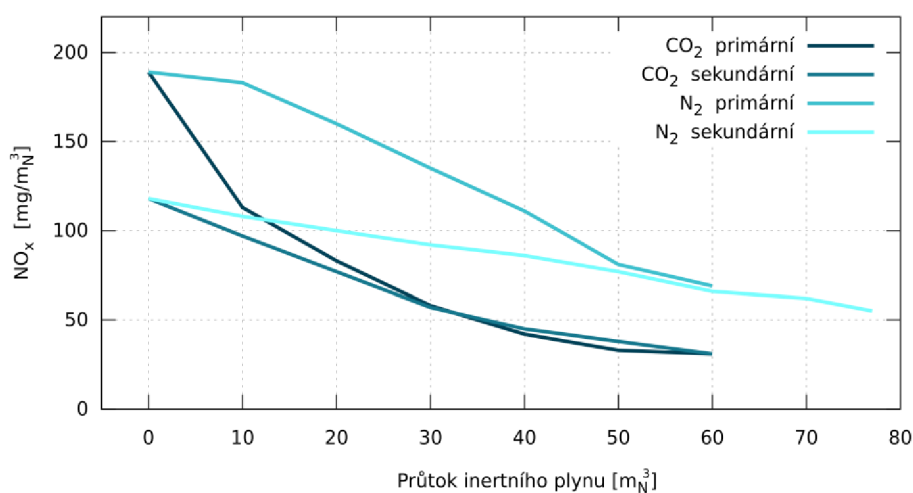
11.5 Výsledky měření hořák – hořák APH

Během zkoušek s tímto typem hořáku byl použit vířič o průměru 260 mm s úhlem sklonu lopatek 30°. Při provozu v primárním režimu byly otvory pro usměrnění vzduchu zaslepeny a veškerý spalovací vzduchu proudil primárním vzduchovým kanálem. V sekundárním režimu byla do hořáku vložena vestavba, která zajistila distribuci spalovacího vzduchu mezi primárním vzduchovým kanálem a čtyřmi sekundárními vzduchovými kanály v poměru 70/30. Toto nastavení vychází z dlouhodobých měření a vyznačuje se největší redukcí NO_x ve spalinách s ohledem na stabilitu hoření. Hořák APH je konstruován na stejný výkon jako ZPH, ale proto, že palivo proudilo pouze středem hořáku, byla zajištěna stabilita plamene během celého experimentu a bylo tedy možné při výkonu 500 kW dosáhnout mnohem větších průtoků inertních plynů. V případě dusíku bylo dosaženo maximálního možného průtoku 77,5 m³/hod (což odpovídá výhřevnosti paliva 14,2 MJ/m³). Po přidání tohoto množství balastního plynu bylo největší redukce emisí NO_x dosaženo v sekundárním režimu, v porovnání se spalováním

bez inertních plynů v palivu. Při použití oxidu uhličitého byl jeho maximální průtok $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ (výhřevnost paliva v tomto případě byla $16,5 \text{ MJ}/\text{m}_N^3$). I přesto, že plamen byl při maximálním dosaženém průtoku dusíku a oxidu uhličitého stabilní, další navýšení průtoku inertního plynu (a tedy i snížení výhřevnosti paliva) nebylo možné s konstrukčních důvodů. Omezením v tomto případě byl nárůst objemu paliva, který při stávajících provozních podmínkách (tlak paliva, velikost otvorů v hořákové hlavě), nebylo možné skrz trysky hořákové hlavy protlačit.

11.5.1 Emise a stabilita plamene

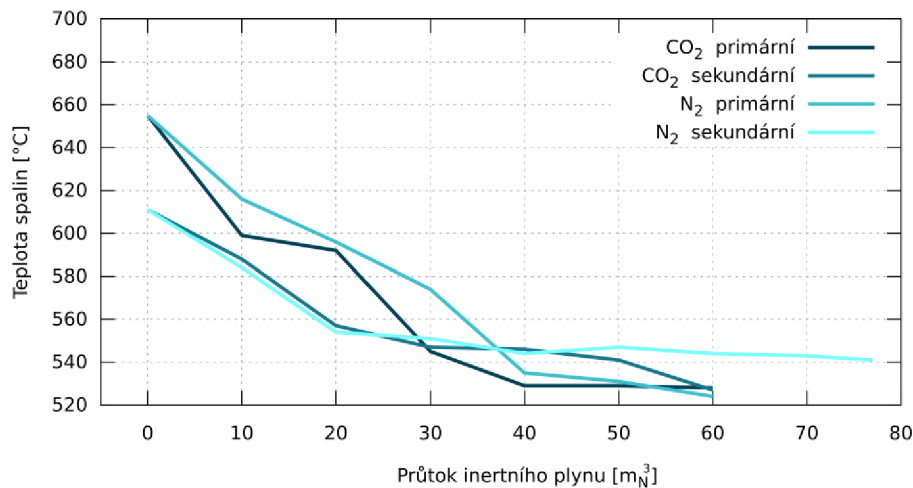
Díky možnosti většího ochuzení paliva bylo získáno mnohem větší množství naměřených dat v porovnání se zkouškami hořáku ZPH. Byl potvrzen trend, který bylo možné pozorovat už v případě hořáku ZPH. Po přidání inertního plynu do paliva dochází k jasnému potlačení tvorby oxidů dusíku. Tento jev je možné pozorovat v případě provozu hořáku jak v primárním režimu, tak i v sekundárním režimu. Při spalování ušlechtilého paliva s primárním přívodem vzduchu byla naměřena hodnota emisí oxidů dusíku $189 \text{ mg}/\text{m}_N^3$, což už je z pohledu současné legislativy téměř hraniční hodnota. Nicméně po přidání inertních plynů dochází k rapidnímu poklesu. V případě dusíku (při maximálním průtoku) emise poklesly o $119 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ na hodnotu $70 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ (v tomto případě se jedná o pokles o 63 %). Při zkouškách s ušlechtilým palivem, kdy byl přívod spalovacího vzduchu do spalovací komory stupňovitý, byla hodnota NO_x $118 \text{ mg}/\text{m}_N^3$. Přidáním dusíku do paliva došlo k postupnému snížení emisí oxidů dusíku o $63 \text{ mg}/\text{m}_N^3$, tj. nejnižší naměřená hodnota emisí v tomto režimu byla $55 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ (jedná se o redukci ve výši 47 %). K mnohem výraznější redukci NO_x došlo po přidání oxidu uhličitého. V případě provozu hořáku s jednostupňovitým přívodem spalovacího vzduchu klesly emise NO_x z původních $189 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ o $158 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ (došlo k redukci o 83 %). Při použití sekundární distribuce vzduchu se emise NO_x snížily z původních $118 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ na $31 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ (jedná se o pokles 73 %).



Obr. 11.17 – Hořák APH – vliv inertních plynů na emise NO_x

Stejně tak jako u emisí je možné pozorovat klesající trend i u výstupní teploty spalin. V obou režimech, ve kterých byl hořák provozován, dochází k výraznému poklesu teploty spalin na výstupu ze spalovací komory. V primárním režimu je možné u dusíku sledovat pokles o $131 \text{ }^\circ\text{C}$ a v případě oxidu uhličitého o $128 \text{ }^\circ\text{C}$. V sekundárním režimu došlo při použití dusíku ke

snížení o 70 °C a u oxidu uhličitého ke snížení o 72 °C. Pokles teploty koresponduje s celkovým poklesem emisí a je jasně vidět, že při ochlazování plamene dochází následně také ke snížení teploty ve spalínách. Snížení teploty je dáno zejména větším podílem balastních plynů ve spalovací komoře a posléze také ve spalinovodu.



Obr. 11.18 – Hořák APH – vliv inertních plynů na teplotu spalin

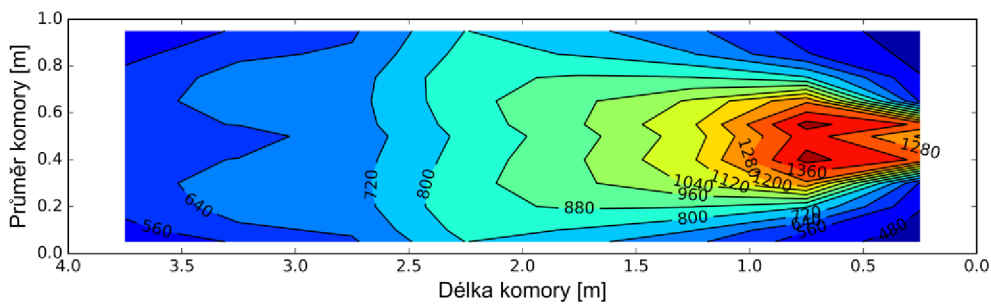
Z pohledu stability byl pozorován naprosto opačný trend, než během měření na hořáku ZPH. Zatímco v prvním případě byl problém s utržíváním plamene a jeho zhasínáním na lopatkách, při použití hořáku APH tento problém nenastal, protože veškeré palivo bylo soustředěno do středu plamene. Při postupném přidávání dusíku do plamene v sekundárním režimu bylo vidět, že plamen, který byl původně měkký a vířivý, měl modré jádro a žlutou obálku, postupně měnil svou charakteristiku. Již přidání 10 mN³/hod N₂ do plamene přineslo viditelnou změnu plamene, který již neplápolal a byl ostrý. Po zvýšení průtoku na 30 mN³/hod N₂ již bylo možné rozpoznat plameny hořící od jednotlivých trysek hořákové hlavy a zároveň se postupně vytratila žlutá barva z plamene. Další navyšování koncentrace dusíku v palivu již žádnou výraznou změnu nepřineslo, pouze modrá barva plamene byla intenzivnější. Podobně je možné popsat také přidávání oxidu uhličitého do plamene: ke změnám charakteru plamene dochází mnohem dříve než u plamene z hořáku ZPH, plameny od jednotlivých trysek hořákové hlavy je možné rozlišit již při průtoku 20 mN³/hod CO₂ a následné navyšování balastního plynu vedlo pouze k jejich zvýraznění. V porovnání s dusíkem byla modrá barva plamene intenzivnější, což ukazuje na větší ochlazení plamene. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 11.9.

Tab. 11.9 – Výsledky měření na hořáku APH TEST A

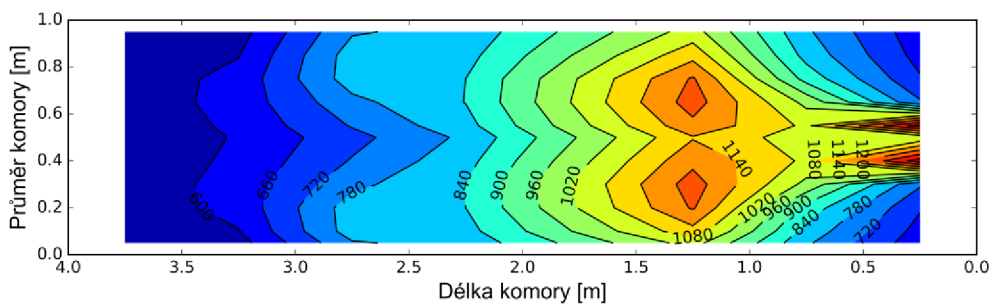
Výkon hořáku	Typ hořáku	Režim hořáku	Průtok CO ₂	Průtok N ₂	NO _x	NO _x	Délka plamene	Průměr plamene	Teplota a spalin
[kW]	[-]	[-]	[m _N ³ /h]	[m _N ³ /h]	[ppm]	[mg/m _N ³]	[m]	[m]	[°C]
500	APH	Primární	0	0	92	189	1,7	0,6	655
500	APH	Primární	0	10	89	182	1,75	0,8	599
500	APH	Primární	0	20	78	159	1,5	0,8	592
500	APH	Primární	0	30	66	135	1,5	0,9	545
500	APH	Primární	0	40	54	110	1,75	0,9	529
500	APH	Primární	0	50	40	82	1,5	1	529
500	APH	Primární	0	60	34	70	1,5	1	528
500	APH	Primární	10	0	55	113	1,7	0,6	616
500	APH	Primární	20	0	40	83	1,5	0,6	596
500	APH	Primární	30	0	28	58	1,4	0,9	574
500	APH	Primární	40	0	20	42	1,4	1	535
500	APH	Primární	50	0	16	33	1,25	1	531
500	APH	Primární	60	0	15	31	1,25	0,8	524
500	APH	Sekundární	0	0	58	118	2,1	0,6	611
500	APH	Sekundární	0	10	53	108	2	0,6	584
500	APH	Sekundární	0	20	49	100	2	0,6	554
500	APH	Sekundární	0	30	45	92	1,5	1	551
500	APH	Sekundární	0	40	42	86	1,5	1	544
500	APH	Sekundární	0	50	37	77	1,5	1	547
500	APH	Sekundární	0	60	32	66	1,5	1	544
500	APH	Sekundární	0	70	30	62	1,5	1	543
500	APH	Sekundární	0	77,5	27	55	1,5	1	541
500	APH	Sekundární	10	0	47	97	1,75	0,8	588
500	APH	Sekundární	20	0	38	77	1,7	1	557
500	APH	Sekundární	30	0	28	57	1,5	1	547
500	APH	Sekundární	40	0	22	45	1,5	1	546
500	APH	Sekundární	50	0	18	38	1,25	1	541
500	APH	Sekundární	60	0	15	31	1,25	1	527

11.5.2 Teploty v plamenu

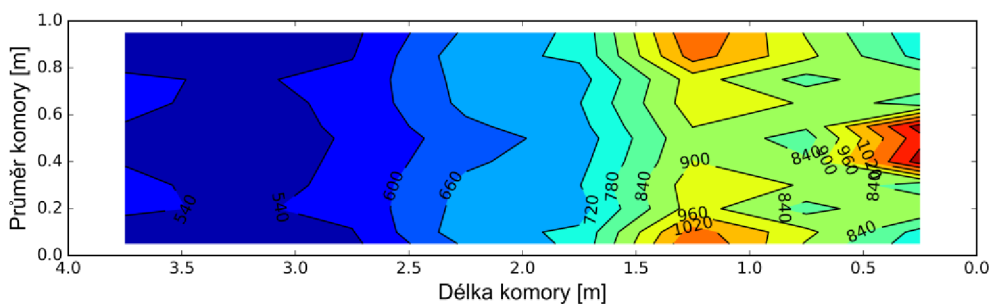
V základním nastavení, při kterém nebyl žádný inertní plyn přimícháván do paliva, se během spalování v primárním režimu vyskytují v jádře vysoké teploty až 1450 °C. Tím, že je veškeré palivo koncentrováno ve středu plamene, poskytuje toto prostředí ideální podmínky pro vznik oxidů dusíku. Tento fakt je ještě umocněn tím, že je vzduch přiveden pouze primárním kanálem a tak je veškeré palivo spáleno v blízkosti ústí hořáku. Z teplotní mapy na Obr. 11.19 je patrné, že dochází k postupnému vyhoření paliva ve směru osy spalovací komory. Plamen se postupně rozšiřuje a ochlazuje. Po přidání inertních plynů v množství 30 m_N³/hod, respektive 60 m_N³/hod do paliva je vidět jasnou změnu v charakteristice plamene, tak jako bylo popsáno v Kapitole 11.5.1. Zároveň je vidět rozdělení na jednotlivé proudy vycházející z hlavy hořáku. Teploty v blízkosti ústí jsou stále vysoké, nicméně oproti spalování samotného zemního plynu došlo k jejich snížení o více než 200 °C. Zároveň je možné pozorovat vznik kuželového pole ve vzdálenosti ca. 0,75 m od ústí hořáku a s maximálními teplotami ve vzdálenosti ca. 15 cm od osy hořáku. Zde se maximální teploty pohybují na hranici 1150 °C. Toto uspořádání teplotního pole je s ohledem na tvorbu emisí NO_x mnohem výhodnější, protože dochází ke snížení vysokých teplot a tím také k potlačení tvorby termických oxidů dusíku.



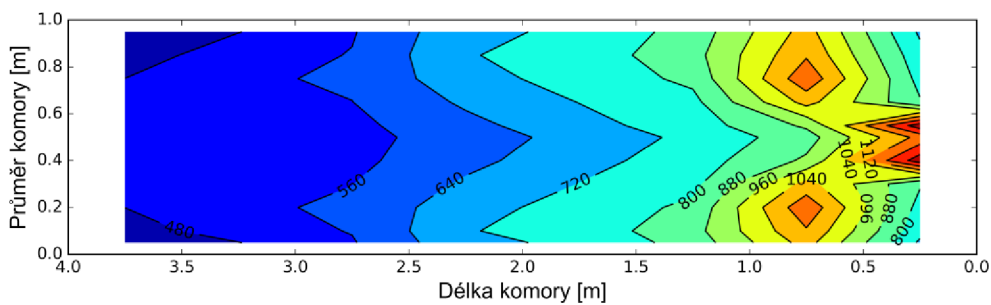
Obr. 11.19 – Hořák APH – primární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



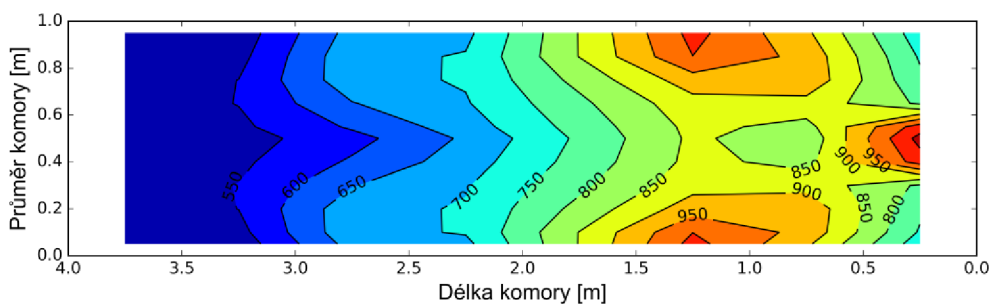
Obr. 11.20 – Hořák APH – primární režim – $30 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.21 – Hořák APH – primární režim – $60 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

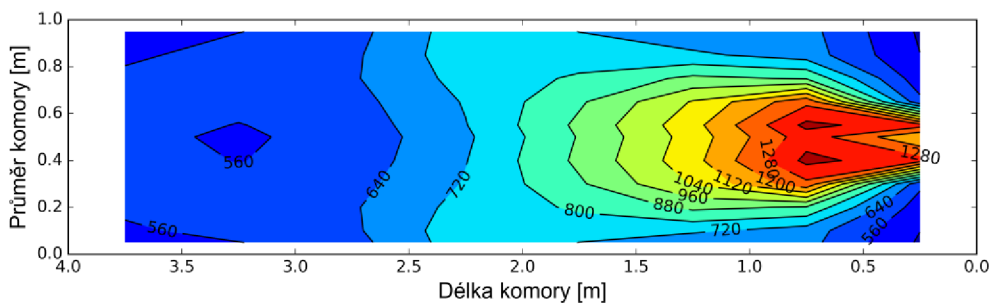


Obr. 11.22 – Hořák APH – primární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $30 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

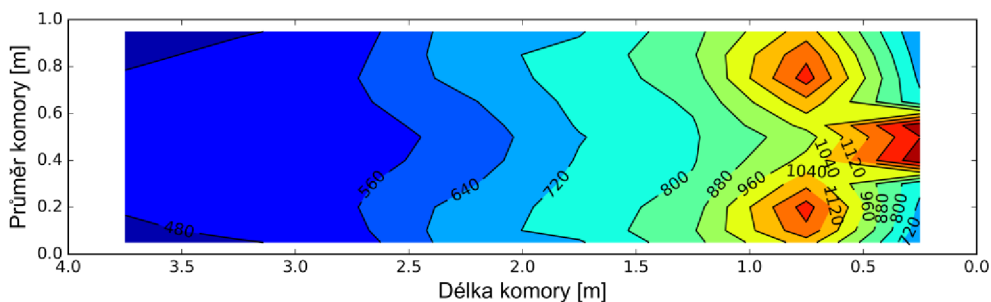


Obr. 11.23 – Hořák APH – primární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $60 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

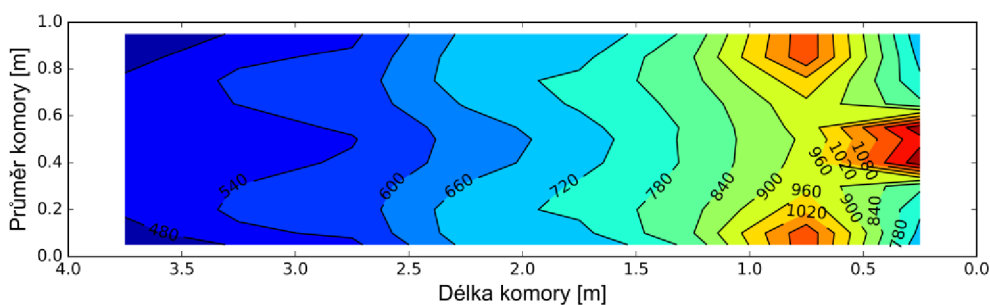
Rozdělení vzduchu mezi primární a sekundární stupeň přispělo ke snížení teploty v jádru plamene. Nejvyšší naměřené teploty v jádru se pohybují okolo 1320 °C. Oproti primárnímu režimu je vidět také změna ve vzdálenějších místech od hořáku, kde také došlo ke snížení teplot. Z Obr. 11.24 je stále zřetelné, že palivo vyhořívá v okolí centrální osy a není zde vidět žádný posun směrem ke stěně spalovací komory. Přidání dusíku ve výši 30 m³/hod změnilo tvar plamene stejně jako v případě jednostupňového spalování. Ve vzdálenosti ca 0,75 m a ca 20 cm od centrální osy od ústí hořáku došlo k vytvoření kuželového pole s výskytem teplot nad 1100 °C. Další významná teplotní špička je v blízkosti ústí hořáku. V porovnání se spalováním ušlechtilého paliva nedošlo k tak výraznému snížení teplot v jádru plamene, ale došlo k přetvoření teplotního pole tak, že k vyhoření palivo nedošlo pouze v okolí osy souměrnosti (Obr. 11.25). Navýšení průtoku dusíku na 60 m³/hod se výrazně podepsalo na změně teplotních polí. Kruhové (kuželové) uspořádání přetrvává, nicméně plameny v této fázi výrazněji ošlehávají stěny komory, kde se také tvoří teplotní špičky. V porovnání Obr. 11.26 s Obr. 11.25 je možné pozorovat mírný pokles teplot v jádru plamene. Na Obr. 11.27 je vidět změny, které nastaly po přidání 30 m³/hod oxidu uhličitého. Celkově lze popsat podobně jako v případě přidávání dusíku. Celkově však došlo k poklesu teplot v plamenu a jádro vytvořeného kruhového teplotního pole je mnohem blíže stěně komory. Podobně lze popsat i Obr. 11.28, kde je možné pozorovat lokální přehřívání stěny a výrazné zatížení chladicího systému v této části spalovací komory.



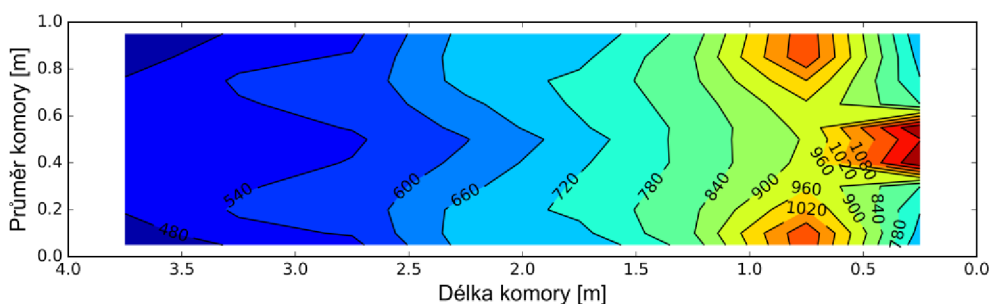
Obr. 11.24 – Hořák APH – sekundární režim – 0 m³/h N₂, 0 m³/h CO₂



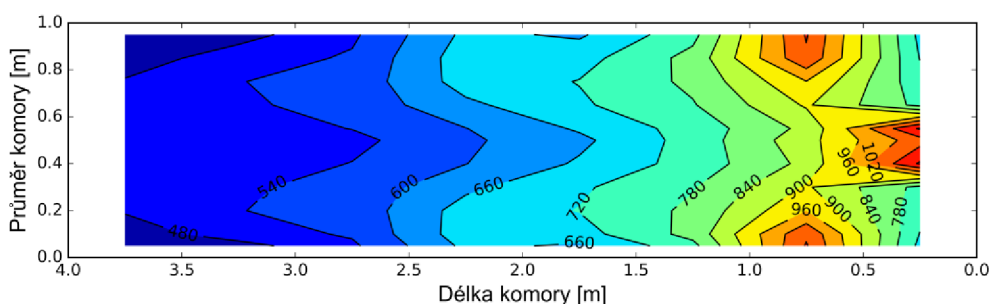
Obr. 11.25 – Hořák APH – sekundární režim – 30 m³/h N₂, 0 m³/h CO₂



Obr. 11.26 – Hořák APH – sekundární režim – $60 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.27 – Hořák APH – sekundární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $30 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



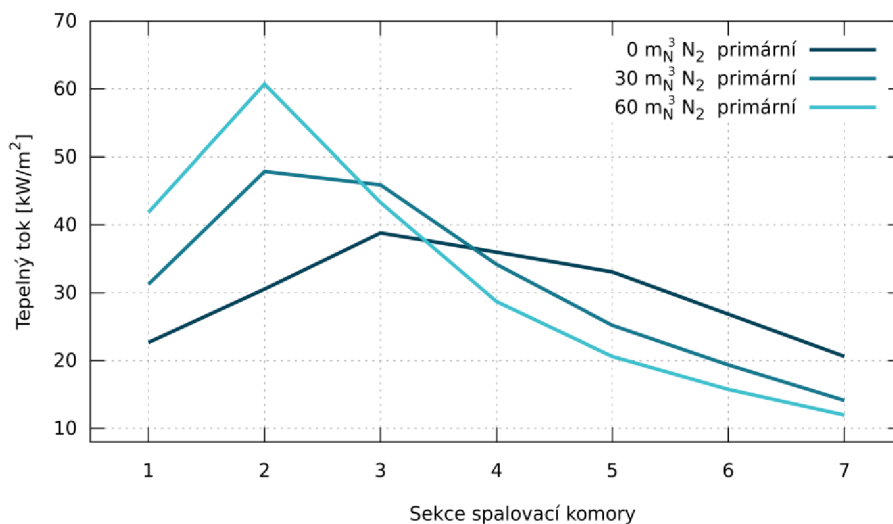
Obr. 11.28 – Hořák APH – sekundární režim – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $60 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

11.5.3 Tepelné toky a termická účinnost

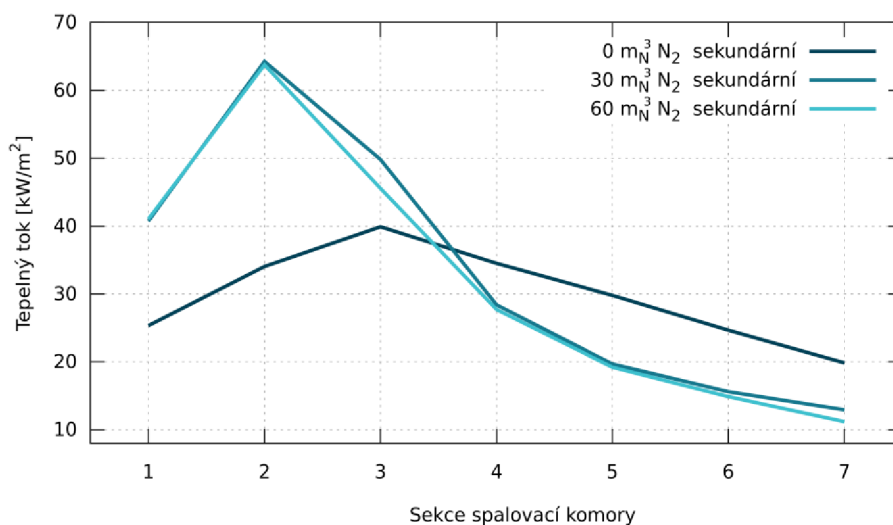
Spalování čistého zemního plynu se vyznačovalo delším plamenem. Po přidání inertního plynu do paliva došlo ke zkrácení plamene a podobný fenomén je možné pozorovat i u tepelných toků. Zatímco při spalování samotného zemního plynu byl největší tepelný tok mezi třetí a čtvrtou sekcí, po přidání inertního plynu je patrný posun maxima tepelného toku blíže k ústí hořáku. Po přidání $30 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ dusíku v primárním režimu hořáku byl největší tepelný tok ve třetí sekci. Další navýšení na $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ dusíku přineslo posunutí maxima tepelného toku do druhé sekce, jak vidět na Obr. 11.29. Po přidání dusíku v sekundárním režimu je v obou případech vidět špička tepelného toku v druhé sekci, viz Obr. 11.30. Podobný průběh tepelných toků byl vyhodnocen i po přidání oxidu uhličitého a to v obou režimech (Obr. 11.31 a Obr. 11.32). U všech nastavení, kde se vyskytuje v palivu inertní plyn, je možné si všimnout, že oproti spalování samotného zemního plynu, dochází k výraznému poklesu tepelného toku předaného v posledních sekcích spalovací komory. Nicméně i přes tento pokles došlo po vyjádření celkového toku předaného v celé délce spalovací komory k nárůstu celkového předaného tepla. Podrobné výsledky pro jednotlivá měření jsou uvedeny v Tab. 11.10. Srovnání vlivu oxidu uhličitého a dusíku na tepelný tok a potažmo i na celkový výkon na Obr. 11.33 a

Obr. 11.34 neukázalo žádné zásadní rozdíly (kromě primárního režimu a průtoku dusíku $30 \text{ m}_N^3/\text{hod}$).

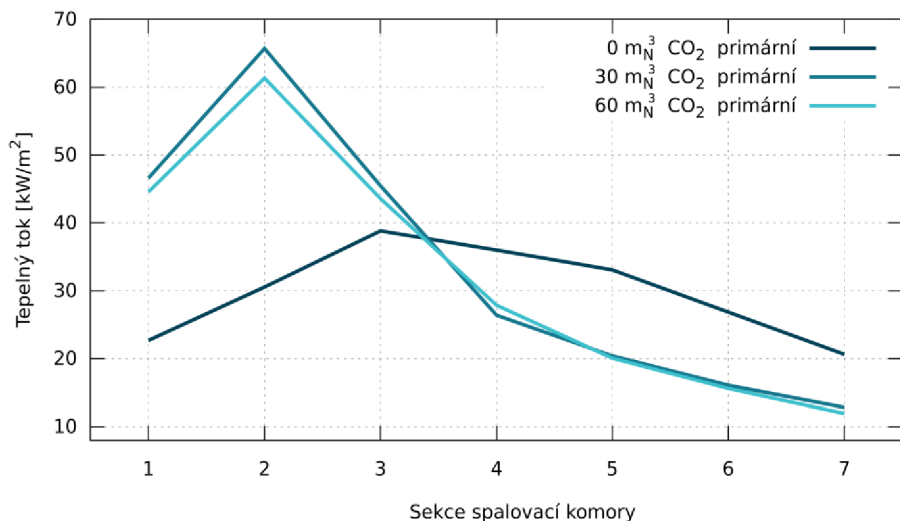
Termická účinnost po přidání jakéhokoliv inertního plynu vzrostla, přičemž maxima bylo dosaženo při přidání $30 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ CO_2 i N_2 . Dochází zde k nárůstu termické účinnosti až o 5 %. Po dalším navýšení průtoku inertních plynů byl naopak zaznamenán její pokles, viz Obr. 11.35.



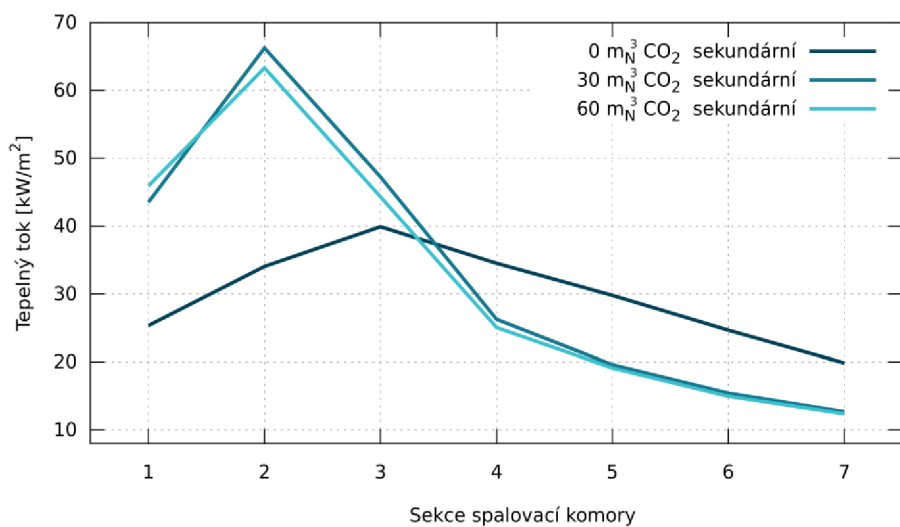
Obr. 11.29 – Hořák APH – primární režim – vliv přidání N_2 na tepelné toky



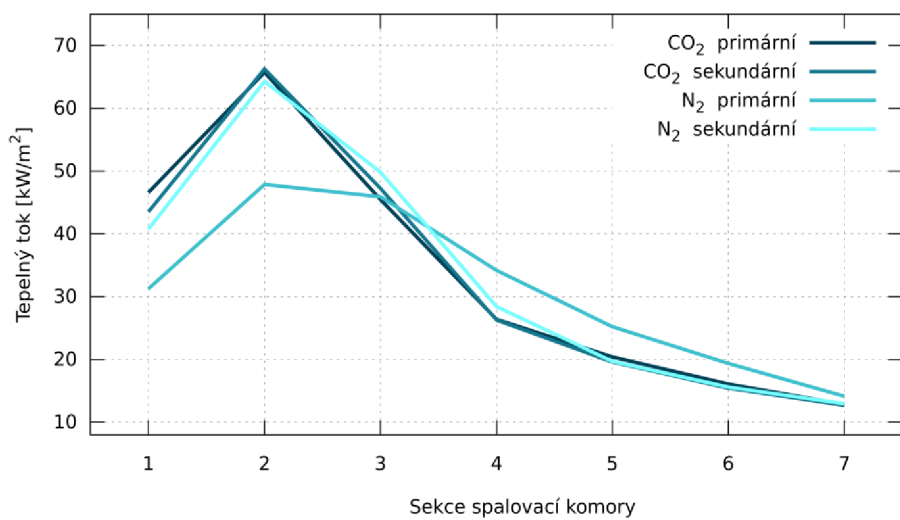
Obr. 11.30 – Hořák APH – sekundární režim – vliv přidání N_2 na tepelné toky



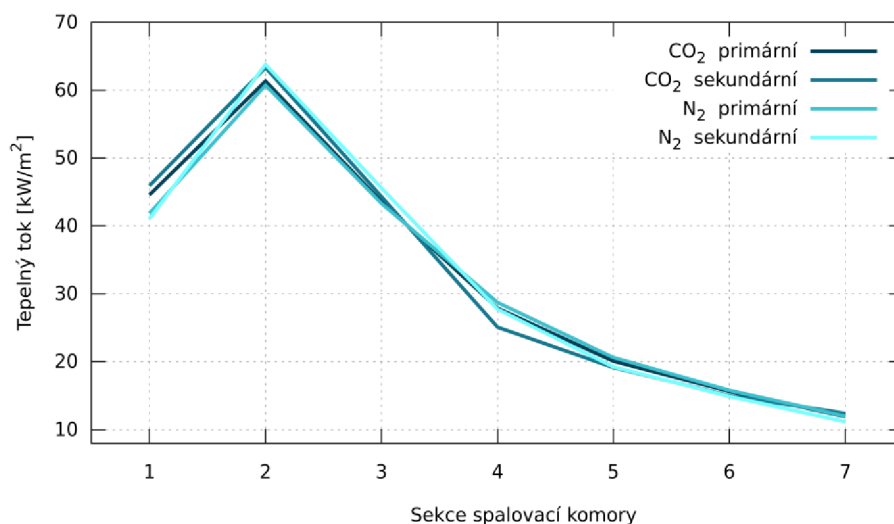
Obr. 11.31 – Hořák APH – primární režim – vliv přidání CO₂ na tepelné toky



Obr. 11.32 – Hořák APH – sekundární režim – vliv přidání CO₂ na tepelné toky



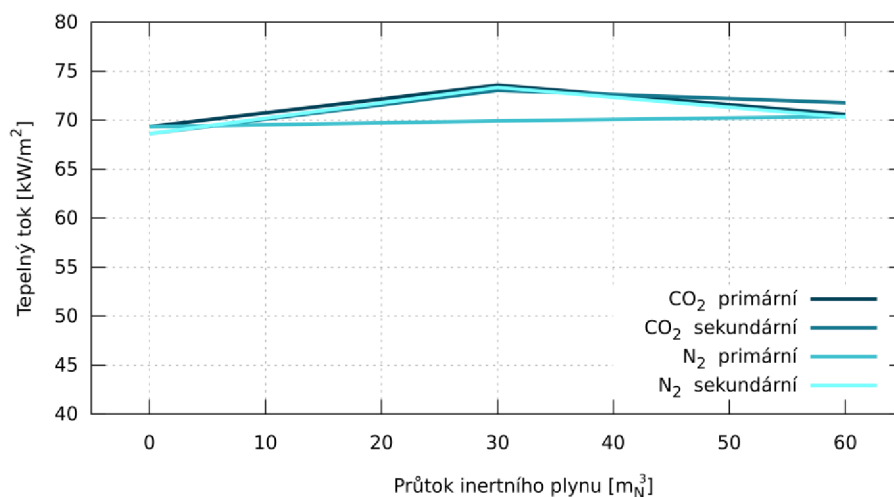
Obr. 11.33 – Hořák APH – vliv přidání 30 m³/h N₂ a CO₂ na tepelné toky



Obr. 11.34 – Hořák APH – vliv přidání $60 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 a CO_2 na tepelné toky

Tab. 11.10 – Výsledky měření na hořáku APH TEST C

Výkon hořáku [kW]	Typ hořáku [-]	Režim hořáku [-]	Průtok CO_2 [m_N^3/h]	Průtok N_2 [m_N^3/h]	Celkový tepelný výkon [kW]	Termická účinnost [%]
500	APH	Primární	0	0	346,32	69,34
500	APH	Primární	0	30	350,21	69,92
500	APH	Primární	0	60	352,05	70,39
500	APH	Primární	30	0	368,20	73,59
500	APH	Primární	60	0	354,26	70,59
500	APH	Sekundární	0	0	343,95	68,63
500	APH	Sekundární	0	30	367,11	73,35
500	APH	Sekundární	0	60	352,01	70,59
500	APH	Sekundární	30	0	365,14	73,04
500	APH	Sekundární	60	0	354,68	71,79



Obr. 11.35 – Hořák APH – vliv přidání N_2 a CO_2 na termickou účinnost spalování

11.5.4 Test stability

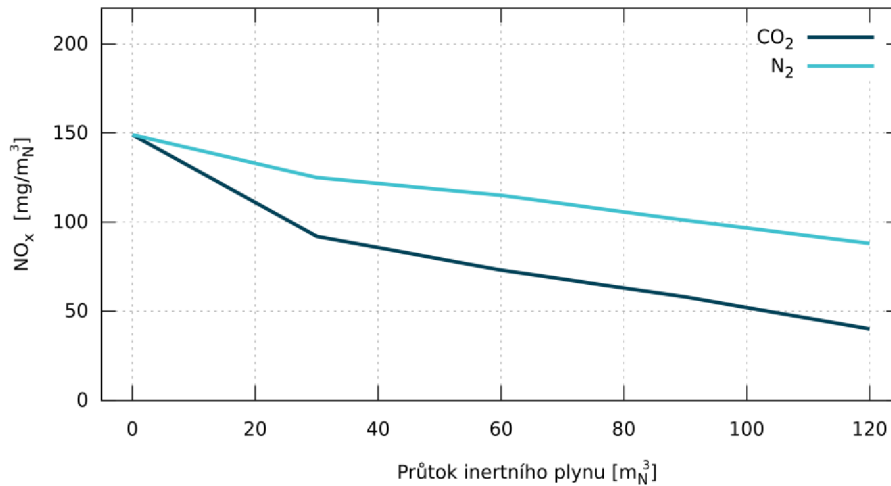
Plamen byl po celou dobu experimentu s hořákem APH stabilní a nebyly pozorovány žádné nestandardní stavy, které by nebyly popsány v předchozích kapitolách. Nicméně k testu stability, jak byl popsán v kapitole 11.5.4, nedošlo z důvodu nedostatku inertních plynů. Obecně lze ale očekávat podobné výsledky jako v případě hořáku ZPH, tedy že plamen bude u tohoto typu hořáku stabilní.

11.6 Výsledky měření hořák – hořák LPH

Pro prvotní zkoušky byla na hořáku použita plynová hlava umožňující maximální výkon 750 kW (při předpokládané výhřevnosti paliva $6,9 \text{ MJ/m}_N^3$). Byla použita hořáková hlava v konfiguraci, která umožňovala distribuovat palivo v poměru 30/70 mezi primární a sekundární stupeň. Toto rozdělení platí zejména při vyšších průtocích, kdy je proudění paliva stabilizované. Vzhledem k tomu, že byl tento hořák navržen pro spalování paliv s nízkou výhřevností, bylo možné dosáhnout výrazně vyššího průtoku obou inertních plynů. V obou případech bylo dosaženo průtoku $120 \text{ m}_N^3/\text{hod}$, což po smíchání se zemním plynem odpovídá výhřevnosti paliva $10,7 \text{ MJ/m}_N^3$. Konstrukce hořáku již nebyla limitujícím prvkem, nicméně limitujícím faktorem byly v tomto případě svazky plynů, ve kterých byly inertní plyny dodány. Při pokusu o odběr $150 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ oxidu uhličitého došlo k zamrznutí svazku láhví a svazek neumožnil další provoz. Proto byly provedeny zkoušky pouze s maximálním průtokem inertních plynů $120 \text{ m}_N^3/\text{hod}$. Směšovací stanice byla trvale napojena pouze na jeden zásobník, což znamená, že v případě dusíku bylo k dispozici ca. $153,6 \text{ m}_N^3$ a v případě oxidu uhličitého se jednalo o 600 kg.

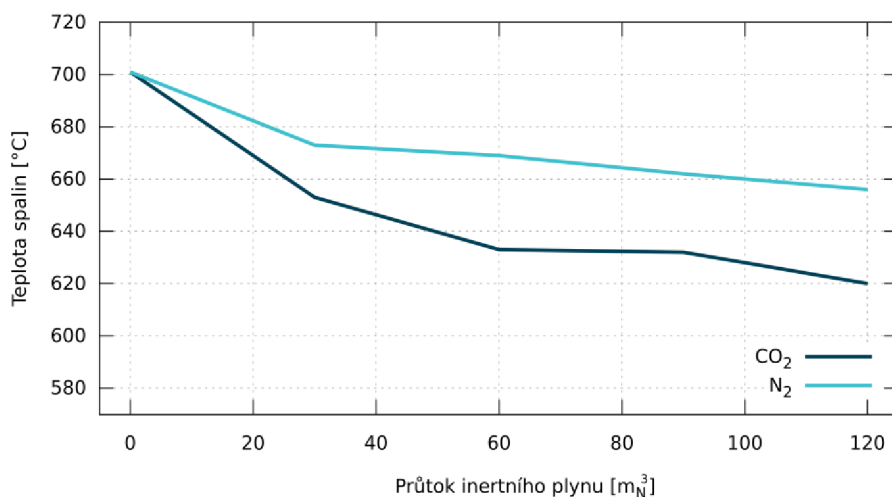
11.6.1 Emise a stabilita plamene

Při použití hořáku LPH bylo možné pozorovat trend, který se projevil již během předchozích měření. Inertní plyny značně ochladily plamen a z pohledu tvorby oxidů dusíků přispěly ke vzniku redukčního prostředí. Při spalování samotného zemního plynu byla naměřena koncentrace NO_x ve spalinách 149 mg/m_N^3 . Nutno podotknout, že plamen byl v tomto režimu silně nestabilní z důvodu nízké výstupní rychlosti paliva z trysek a tedy i nízké intenzity promíchávání paliva se spalovacím vzduchem. Přidání inertního plynu do paliva přispělo k navýšení výstupní rychlosti z hořákové hlavy a došlo k výrazné stabilizaci plamene. Z Obr. 11.36 je patrné, že během navyšování průtoku dusíku dochází k postupnému poklesu emisí NO_x ve spalinách až na hodnotu 88 mg/m_N^3 (jedná se o redukci 38 % při průtoku dusíku $120 \text{ m}_N^3/\text{hod}$). Při provozu hořáku LPH je možné pozorovat výrazný rozdíl mezi vlivem dusíku a oxidu uhličitého na emise oxidů dusíku. Oxid uhličitý dokázal snížit teplotní špičky v plamenu výrazněji než dusík. Naměřené koncentrace NO_x dosahovaly pouhých 40 mg/m_N^3 (redukce 72 %). Stejně tak jako došlo k poklesu emisí, snížila se také postupně teplota spalin. Maximální naměřená teplota spalin při spalování samotného zemního plynu byla 701°C . Při maximálním průtoku dusíku došlo ke snížení o 45°C na 656°C (v porovnání se spalováním zemního plynu), při maximálním průtoku oxidu uhličitého byla naměřena teplota ještě nižší, a to 620°C (pokles teploty o 81°C).



Obr. 11.36 – Hořák LPH – vliv inertních plynů na emise NO_x

Při spalování samotného zemního plynu byl plamen značně nestabilní. Kvůli nízkým výstupním rychlostem z hořákové hlavy nebylo palivo se spalovacím vzduchem dostatečně promícháváno. Palivo vyhořivalo na dlouhém úseku a délka plamene byla 3 m. Plamen byl jasně žlutý s malým modrým jádrem a celý plápolal (důsledek nedostatečného promíchávání). Přidání 30 m³/hod dusíku plamen přispělo ke stabilizaci, nicméně konec plamene měl stále značný rozptyl. Plamen lze charakterizovat jako tzv. měkký plamen. Zároveň došlo k částečnému zkrácení na 2,5 m. Další navýšení průtoku N₂ se odrazilo na výrazné změně barvy. Plamen byl téměř celý modrý, žlutá barva se vyskytovala pouze ojediněle. Bylo již možné pozorovat rotační pohyb jádra plamene, který byl způsoben drážkami na vnějším okraji hořákové hlavy. Díky navyšující se turbulenci uvnitř plamene docházelo k lepšímu promíchávání paliva a spalovacího vzduchu, díky čemuž se plamen zkrátil na 1,5 m. Současně se také zmenšil jeho průměr z původního 1 m na 0,7 m. Během dalšího měření, kdy byl průtok dusíku navýšen již na 90 m³/hod a následně na 120 m³/hod, nebyla pozorována žádná výrazná změna tvaru plamene. Také došlo k úplnému vymizení žluté barvy a plamen byl kompletně modrý. Přidání oxidu uhličitého mělo podobný efekt, avšak změny v plamenu bylo možné pozorovat při nižších průtocích. Přidáním 30 m³/hod CO₂ do paliva došlo ke zkrácení plamene na 2 m. Při vyšších průtocích oxidu uhličitého bylo oproti spalování s dusíkem vidět výraznější vířivý pohyb, modrá barva plamene byla intenzivnější, a plamen se zkrátil na 1 m.



Obr. 11.37 – Hořák APH – vliv inertních plynů na teplotu spalin

Tab. 11.11 – Výsledky měření na hořáku LPH TEST A

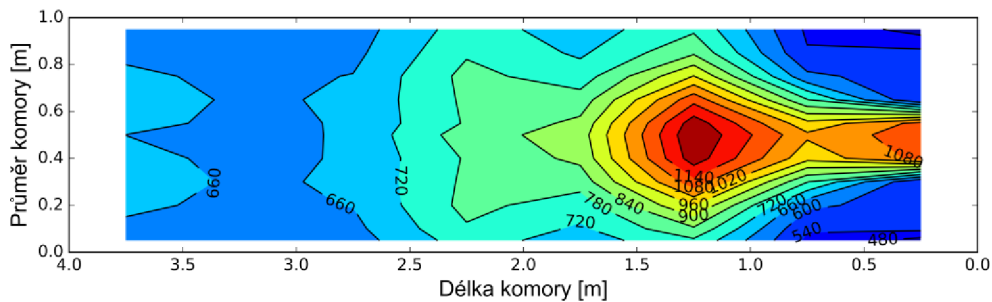
Výkon hořáku [kW]	Typ hořáku [-]	Režim hořáku [-]	Průtok CO ₂ [m ³ /h]	Průtok N ₂ [m ³ /h]	NO _x [ppm]	NO _x [mg/m ³]	Délka plamene [m]	Průměr plamene [m]	Teplota spalin [°C]
500	LPH	-	0	0	73	149	3,0	1,0	701
500	LPH	-	0	30	61	125	2,5	1	673
500	LPH	-	0	60	56	115	1,5	0,7	669
500	LPH	-	0	90	49	101	1,5	0,7	662
500	LPH	-	0	120	43	88	1,5	0,7	656
500	LPH	-	30	0	45	92	2,0	0,9	653
500	LPH	-	60	0	36	73	2,0	0,7	633
500	LPH	-	90	0	28	58	1,0	0,7	632
500	LPH	-	120	0	20	40	1,0	0,6	620

11.6.2 Teploty v plamenu

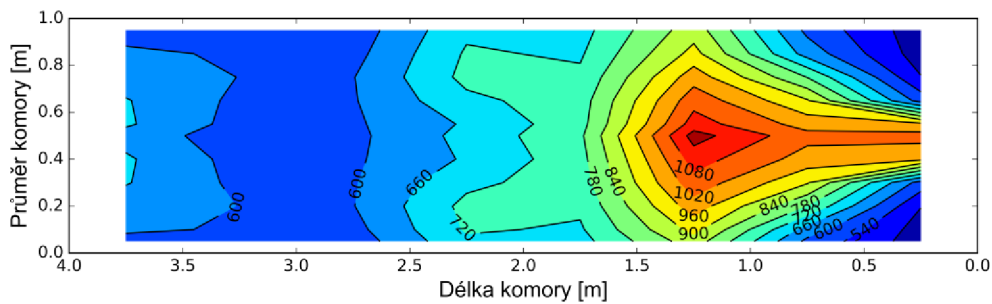
Distribuce teplot v plamenu je zobrazena na Obr. 11.38. Z obrázku je patrné, že v případě spalování samotného zemního plynu se hlavní ohnisko, kde dochází k vyhoření velké části paliva, nachází na úrovni třetí sekce komory. K vyhoření paliva však dochází na delším úseku. Teploty v jádru plamene překračují 1250 °C, což podporuje vznik termických oxidů dusíku. Avšak v porovnání se dvěma přechozími hořáky je nejvyšší naměřená teplota nižší. Po přidání 30 m³/hod oxidu uhličitého do paliva je možné na Obr. 11.39 vidět značné ochlazení plamene a i redukci teplotní špičky o ca 100 °C. Zároveň dochází k roztažení plamene a přetvoření jednotlivých teplotních polí. V tomto případě je také patrné, že jádro plamene má tendenci vychladnout dříve než jeho obálka, což je dobře vidět v páté sekci chladicí komory. Další navýšení průtoku oxidu uhličitého na 60 m³/hod přineslo sražení teplotních špiček o dalších 100 °C a ještě větší rozšíření plamene. Mezi třetí a čtvrtou komorou nabývají teplotní pole tvar vlnoploch. Po výstupu z ústí hořáku dochází k postupnému rozšíření jednotlivých polí, které vytvářejí útvar podobný trojúhelníku. Podobný průběh je možné vidět i během postupného zvýšení průtoku oxidu uhličitého na 120 m³/hod. Pro tento průtok se maximální teploty v plamenu pohybují okolo 1050 °C a byly zaznamenány v oblasti třetí sekce spalovací komory

(Obr. 11.42). Ve směru osy hoření již dochází k postupnému ochlazování plamene a odebírání tepla stěnami komory.

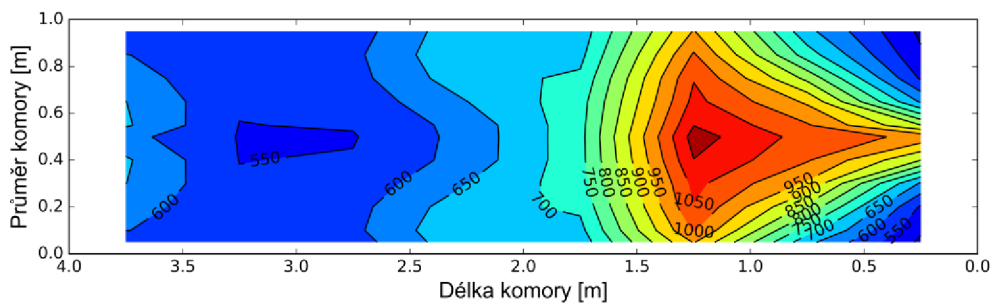
Přidávání dusíku do paliva mělo podobný průběh, avšak nebylo dosaženo takového ochlazení plamene jako během přidávání oxidu uhličitého. Po přidání $30 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ dusíku poklesla maximální teplota o ca $50 \text{ }^\circ\text{C}$, čemuž odpovídá i pouze malé snížení naměřené koncentrace NO_x ve spalinách. Průběh naměřených teplot je vidět na Obr. 11.43. Jak již bylo popsáno v kapitole 11.6.1, dochází k postupnému zkracování plamene a zároveň k jeho rozšíření. Změny v rozložení teplotních polí jsou vidět na Obr. 11.44 (pro průtok $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$), na Obr. 11.45 (pro průtok $90 \text{ m}_N^3/\text{hod}$) a na Obr. 11.46 (pro průtok $120 \text{ m}_N^3/\text{hod}$). Nejnižší naměřená teplota v jádru plamene se pohybovala okolo $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.



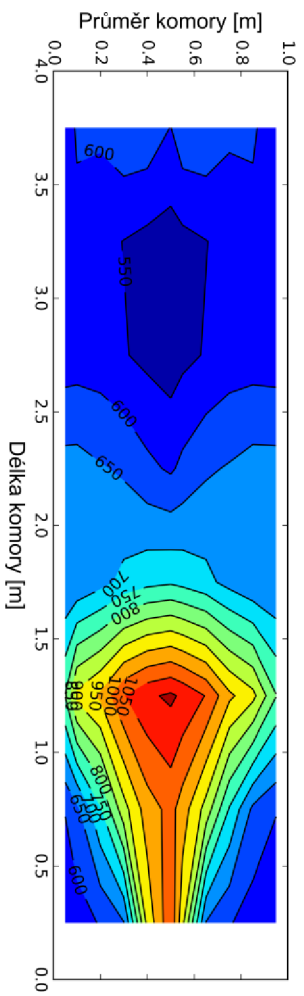
Obr. 11.38 – Hořák LPH – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



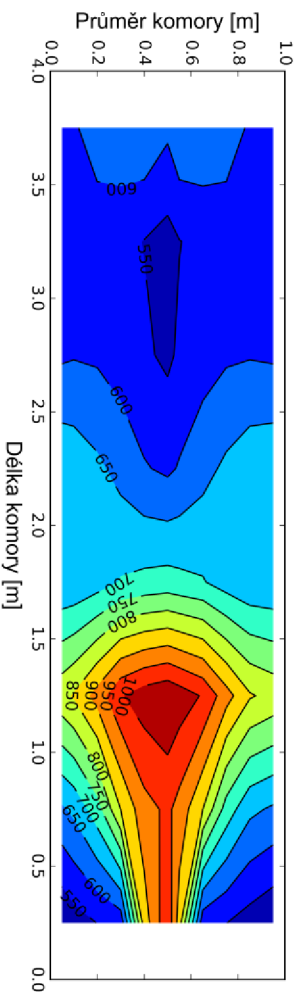
Obr. 11.39 – Hořák LPH – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $30 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



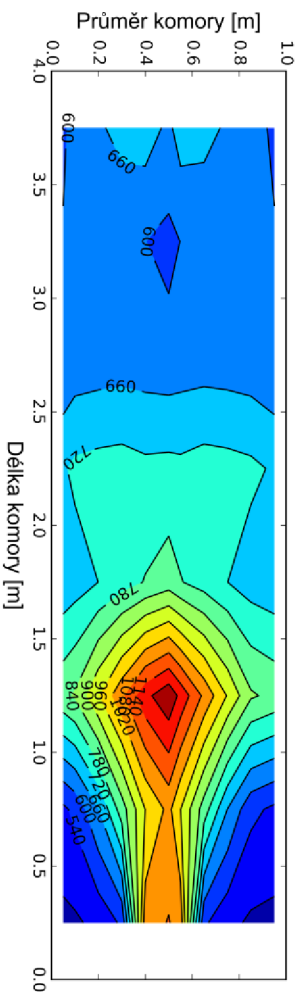
Obr. 11.40 – Hořák LPH – $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $60 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



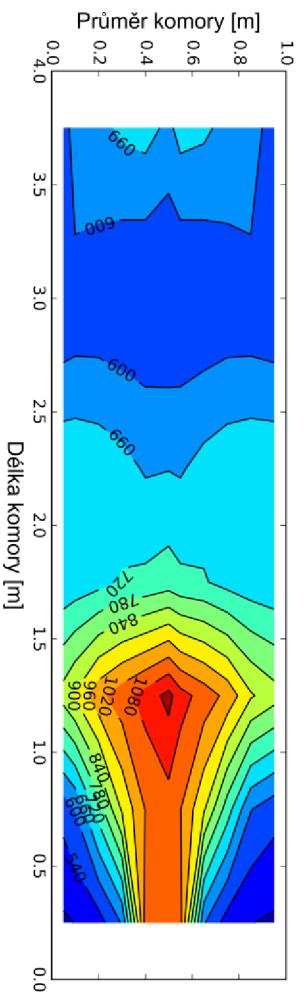
Obr. 11.41 – Hořák LPH – $0 \text{ mN}^3/\text{h N}_2$, $90 \text{ mN}^3/\text{h CO}_2$



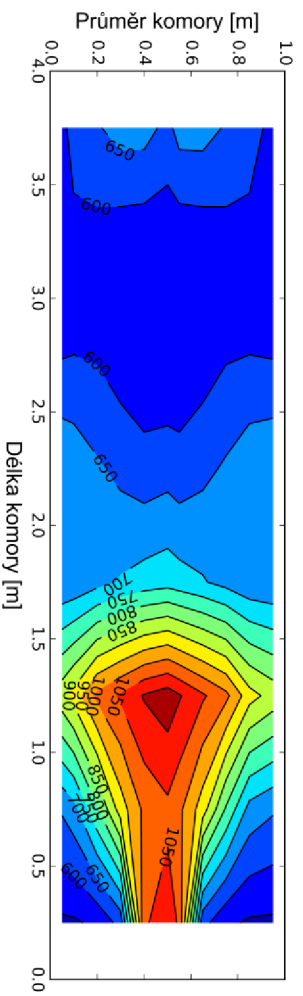
Obr. 11.42 – Hořák LPH – $0 \text{ mN}^3/\text{h N}_2$, $120 \text{ mN}^3/\text{h CO}_2$



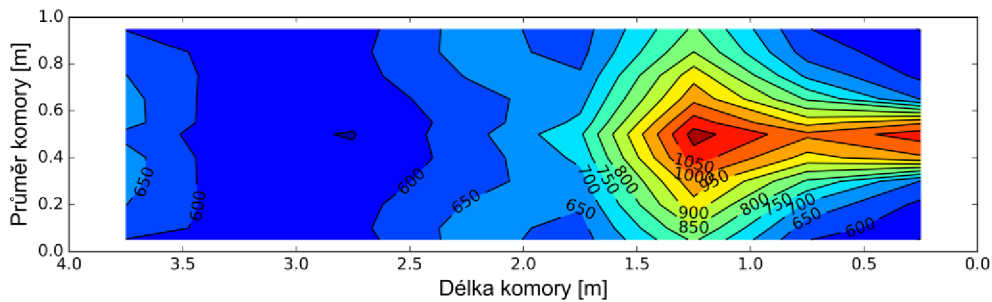
Obr. 11.43 – Hořák LPH – $30 \text{ mN}^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ mN}^3/\text{h CO}_2$



Obr. 11.44 – Hořák LPH – $60 \text{ mN}^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ mN}^3/\text{h CO}_2$



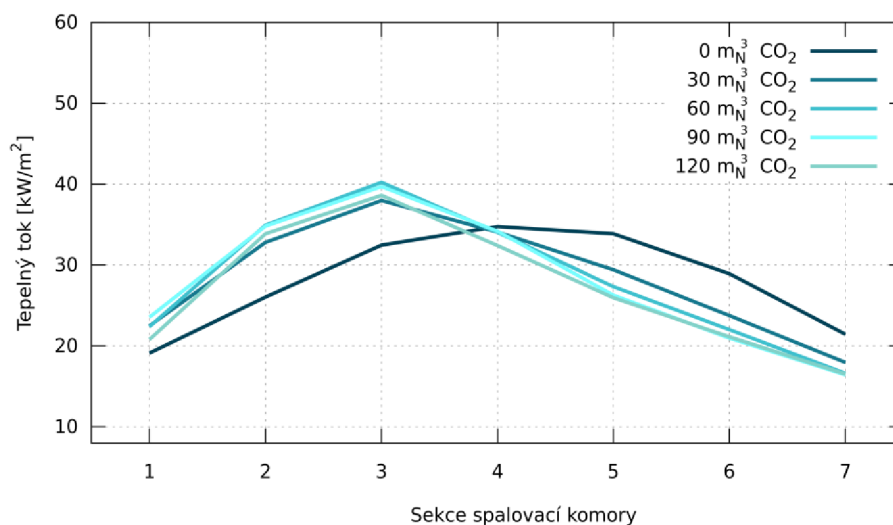
Obr. 11.45 – Hořák LPH – $90 \text{ mN}^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ mN}^3/\text{h CO}_2$



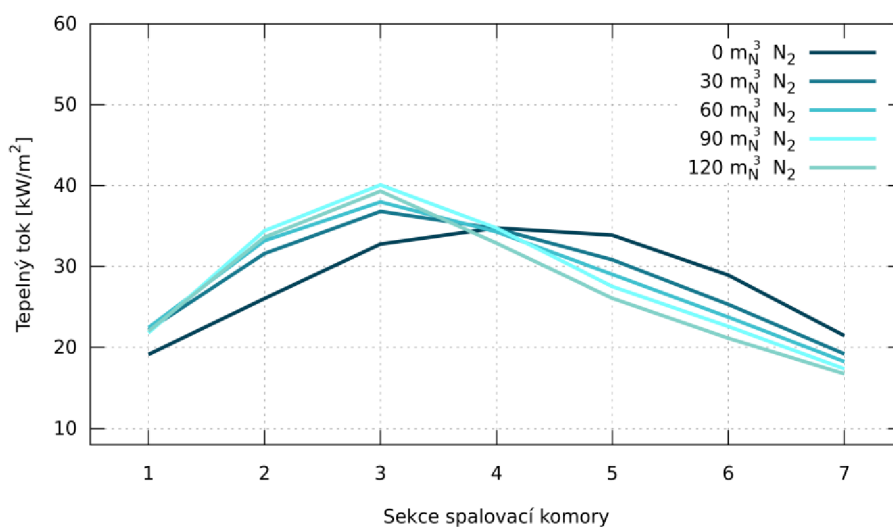
Obr. 11.46 – Hořák LPH – $120 \text{ m}_N^3/\text{h } \text{N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h } \text{CO}_2$

11.6.3 Tepelné toky a termická účinnost

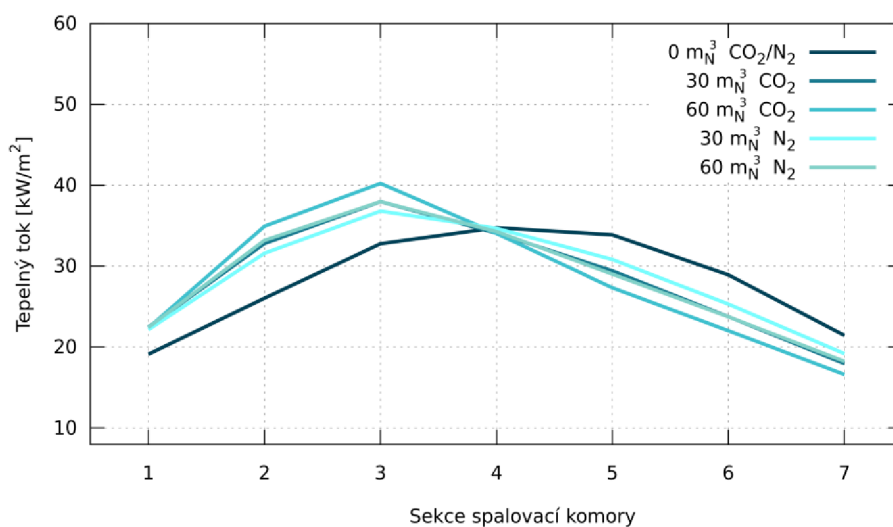
Během spalování samotného zemního plynu se vytvořil dlouhý plamen, který dohořival až v posledních sekcích spalovací komory. Tepelný tok po délce komory je při tomto nastavení téměř symetrický a největší hodnota byla vypočtena pro čtvrtou sekci. Postupné přidání oxidu uhličitého do plamene vedlo ke stabilizaci plamene a hlavně k jeho zkrácení tak, že maxima tepelného toku bylo dosaženo ve třetí sekci spalovací komory. Největší tepelný tok v této sekci byl zjištěn pro průtok $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ oxidu uhličitého. Při dalším navyšování průtoku inertního plynu bylo více tepla odváděno spaliny pryč ze spalovací komory a nejvyšší hodnota tepelného toku klesala. I přesto, že inertní plyn v palivu změnil tvar křivky, celkový tepelný výkon byl podobný. Při dalším navýšení průtoku oxidu uhličitého na $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ je od 3. sekce směrem ke spalinovodu patrný pokles, jak je vidět na Obr. 11.47. Podobný průběh je vidět také na Obr. 11.48, kdy byl do paliva přidáván dusík. Obecně lze říci, že dusík plamen neochladil tolik jako oxid uhličitý a tedy i celkový předaný tepelný výkon je vyšší, nicméně nejedná se o velký rozdíl. Z porovnání shodných průtoků obou inertních plynů na Obr. 11.49 a Obr. 11.50 vyplývá, že ve třetí sekci je předán větší tepelný tok, když je do paliva přidán oxid uhličitý. Toto tvrzení však platí do průtoku $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ včetně. Při průtocích vyšších než $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ byly tepelné toky vyšší při použití dusíku. Totéž platí i pro celkový tepelný výkon. Naopak termická účinnost byla nejvyšší, když byl spalován samotný zemní plyn, jakékoliv přidání inertního plynu mělo za následek její pokles společně s tím, jak rostl objem plynů ve spalovací komoře, čímž byla část tepla odváděna ve spalínách. Křivku závislosti termické účinnosti na přidaném inertním plynu ukazuje Obr. 11.51.



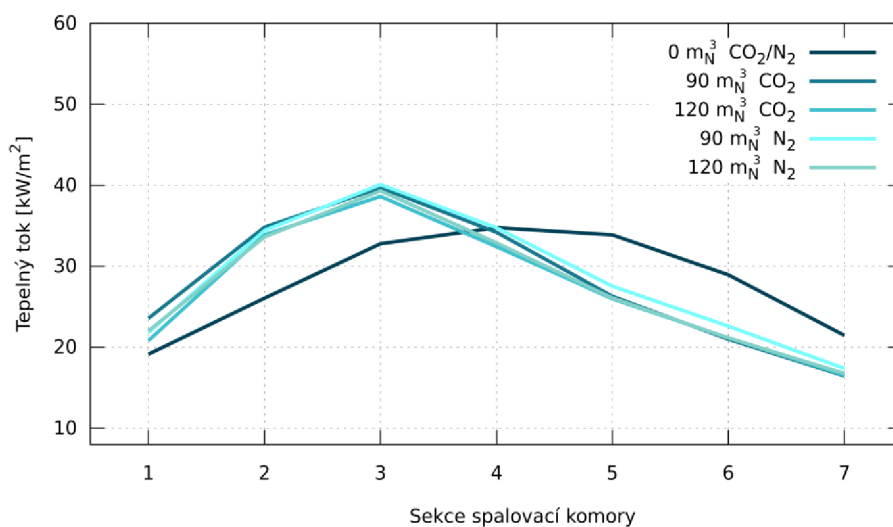
Obr. 11.47 – Hořák LPH – vliv přidání CO_2 na tepelné toky



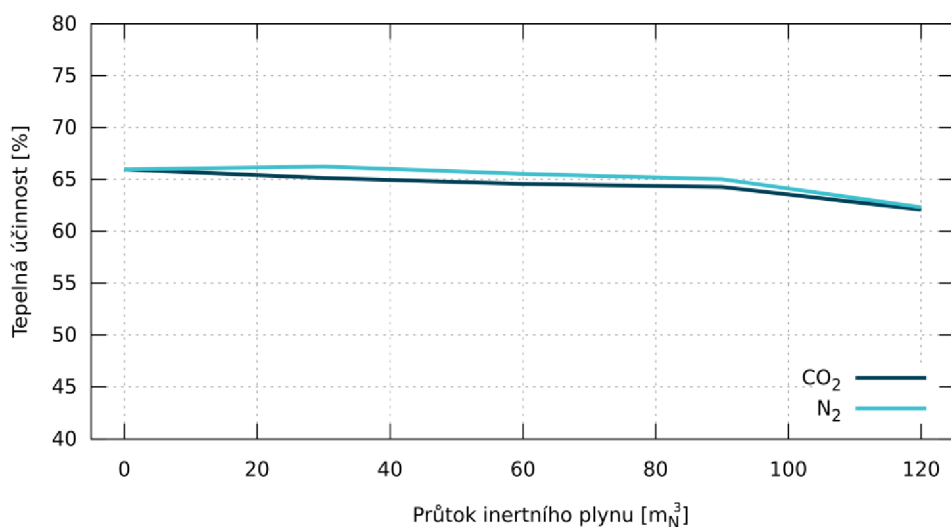
Obr. 11.48 – Hořák LPH – vliv přidání N_2 na tepelné toky



Obr. 11.49 – Hořák APH – vliv přidání $30 \text{ m}_N^3/\text{h}$ a $60 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 a CO_2 na tepelné toky



Obr. 11.50 – Hořák APH – vliv přidání $90 \text{ m}_N^3/\text{h}$ a $120 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 a CO_2 na tepelné toky



Obr. 11.51 – Hořák LPH – vliv přidání N_2 a CO_2 na termickou účinnost spalování

Tab. 11.12 – Výsledky měření na hořáku LPH TEST C

Výkon hořáku [kW]	Typ hořáku [-]	Režim hořáku [-]	Průtok CO_2 [m_N^3/h]	Průtok N_2 [m_N^3/h]	Celkový tepelný výkon [kW]	Termická účinnost [%]
500	LPH	–	0	0	329,86	65,97
500	LPH	–	0	30	332,27	66,25
500	LPH	–	0	60	328,28	65,54
500	LPH	–	0	90	326,80	65,02
500	LPH	–	0	120	315,34	62,32
500	LPH	–	30	0	327,36	65,15
500	LPH	–	60	0	324,22	64,57
500	LPH	–	90	0	321,08	64,28
500	LPH	–	120	0	311,68	62,09

11.6.4 Test stability

Test stability nebyl proveden ze stejného důvodu, jako tomu bylo v případě hořáku APH.

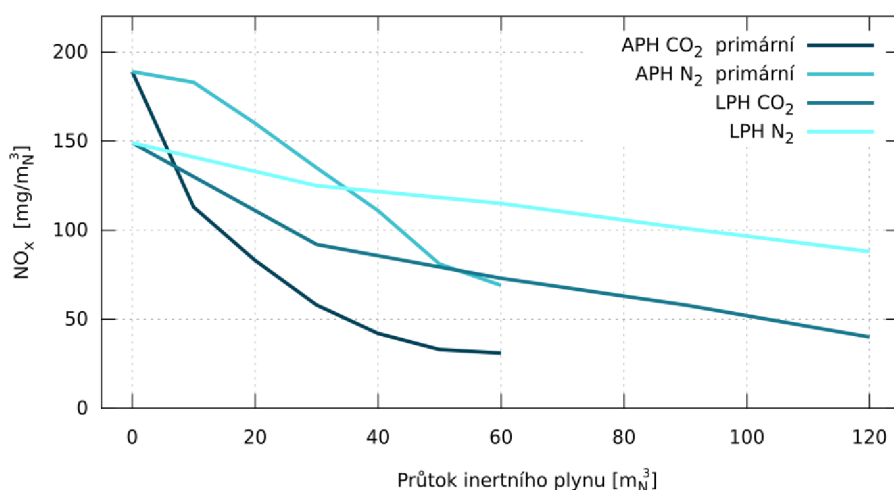
11.7 Porovnání jednotlivých typů hořáků

Relevantní výsledky byly získány pro hořáky APH a LPH, porovnání se tedy bude vztahovat výhradně na hodnoty naměřené na těchto dvou typech hořáků. Hořák ZPH není z důvodu nízkého ochuzení paliva do srovnání zahrnut.

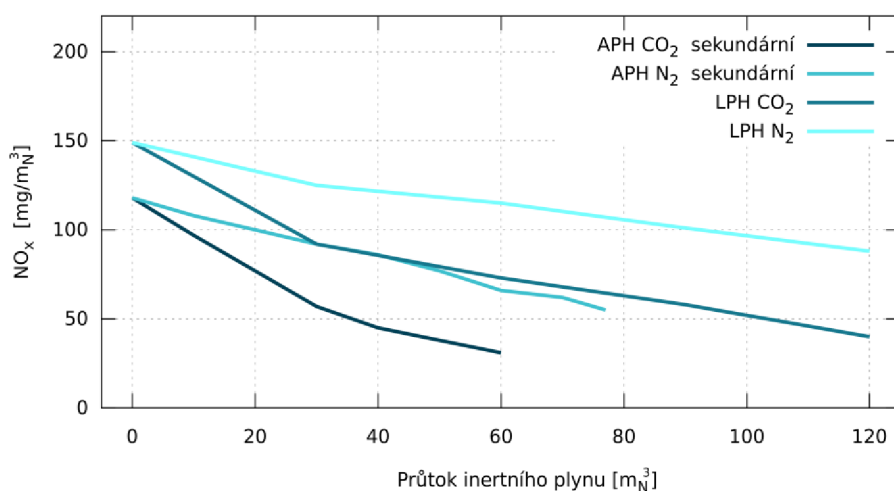
11.7.1 Emise a stabilita plamene

Z výsledků je patrné, že každý z hořáků je navržen pro jiný druh plynu. Zejména co se týká efektivního spalování, vychází v porovnání jednoznačně lépe konvenční hořák APH. V případě spalování zemního plynu v primárním režimu hořáku APH je sice možné pozorovat výrazně vyšší naměřené hodnoty emisí, ale po přidání inertního plynu do paliva dochází k rychlému ochlazení plamene a tedy i redukci termických NO_x . Při maximálním dosaženém průtoku v primárním režimu na hořáku APH jsou emise NO_x na mnohem nižší úrovni než u hořáku LPH při srovnatelných vlastnostech paliva. Díky tomu, že hořák LPH umožňuje přidat vyšší množství inertního plynu, je možné vidět na Obr. 11.52, že dochází k postupnému přiblížení se k hodnotám, které byly dosaženy užitím hořáku APH.

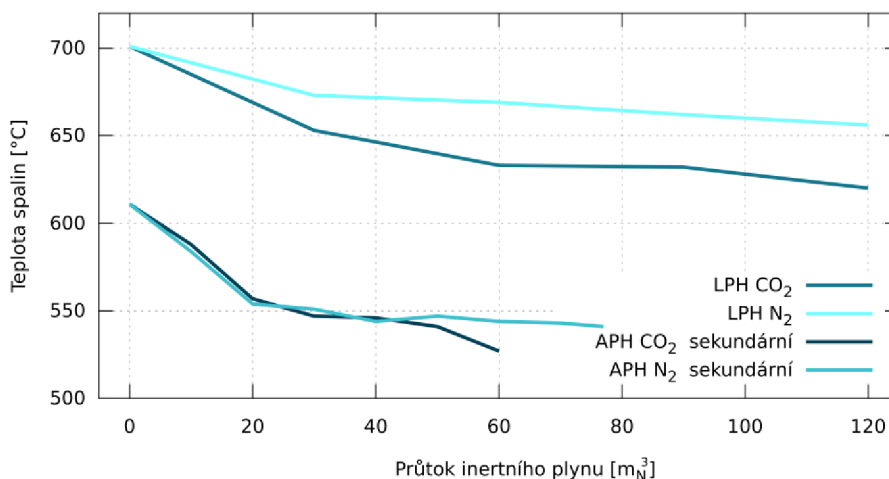
V sekundárním režimu hořáku bylo z pohledu tvorby oxidů dusíku na hořáku APH dosaženo výrazně lepších hodnot již během spalování samotného zemního plynu. Přidání inertního plynu do plamene mělo za následek snížení emisí NO_x a zároveň přispělo ke zvýšení stability plamene. Je ovšem nutné poznamenat, že charakteristika plamene se výrazně změnila. U hořáku LPH byl zpočátku plamene značně nestabilní, postupné navyšování obsahu inertního plynu v palivu zvětšilo jeho objem, což přispělo ke zvýšení výstupní rychlosti z hořákové hlavy a ke zlepšení promíchání paliva se spalovacím vzduchem. Při maximálním průtoku oxidu uhličitého i dusíku u hořáku APH dochází k podchlazení plamene a je vidět výrazný pokles emisí NO_x . Při srovnatelných průtocích hořák LPH ani zdaleka nedosahuje podobných hodnot. Další navyšování obsahu inertních plynů v palivu však pomáhá snížení emisí NO_x . U hořáku LPH se negativně projevuje, že vzduchový kanál je dimenzován až na výkon 1500 kW a není možné využít celého potenciálu hořáku pro vyvinutí turbulentního proudění. V grafu na Obr. 11.53 je vidět srovnání spalování nízko-výhřevného paliva na hořáku APH v sekundárním režimu a na hořáku LPH.



Obr. 11.52 – Vliv přidání N_2 a CO_2 na emise NO_x – hořák APH primární vs. LPH



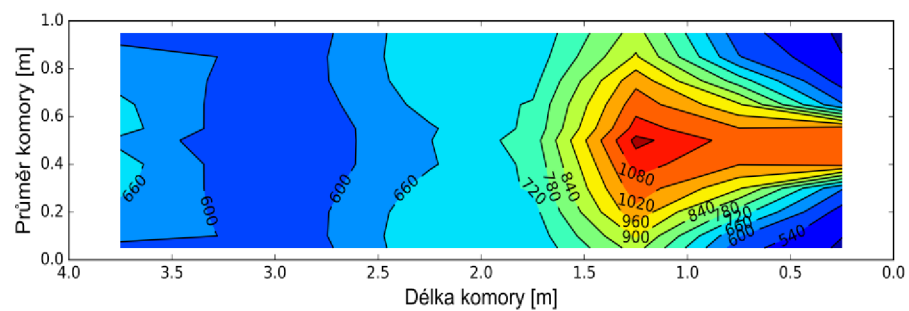
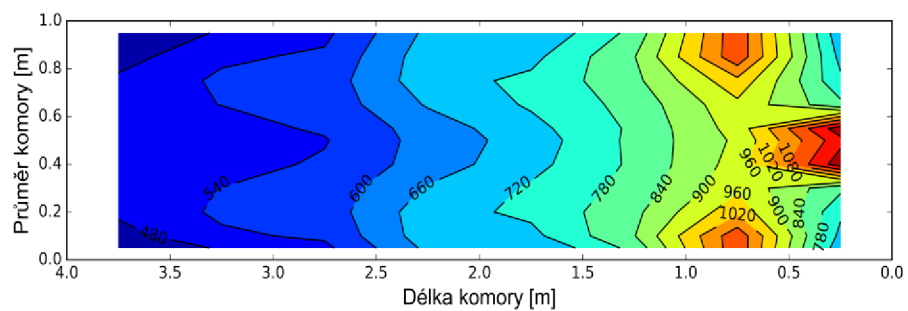
Obr. 11.53 – Vliv přidání N_2 a CO_2 na emise NO_x – hořák APH sekundární vs. LPH



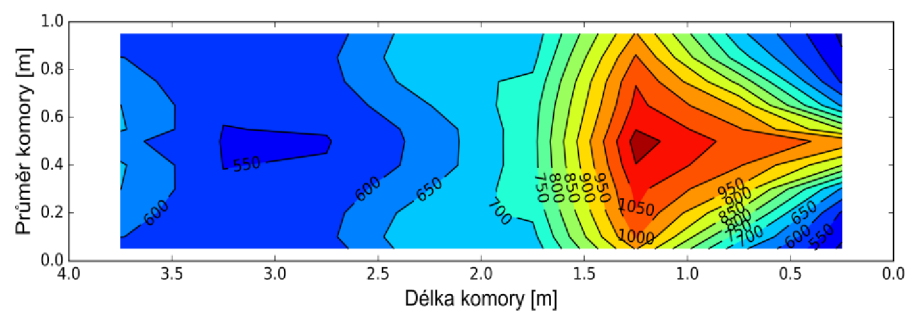
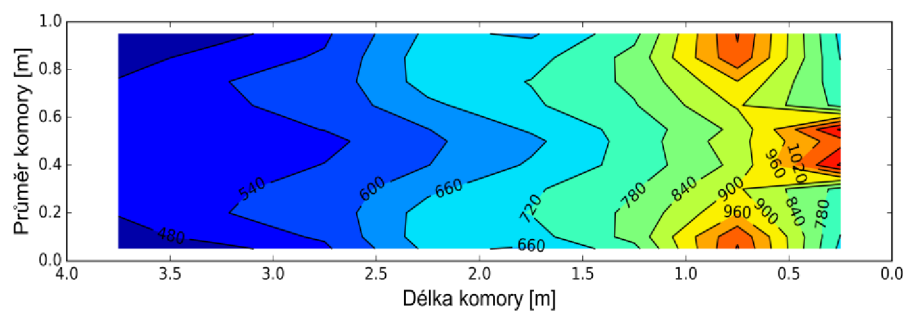
Obr. 11.54 – Vliv přidání N₂ a CO₂ na emise NO_x – APH sekundární vs. LPH

11.7.2 Teploty v plamenu

Pro porovnání teplot v plamenu byla opět vybrána nastavení, u kterých je do paliva přidáváno 60 mN³/hod inertního plynu. Pro hořák APH jsou na Obr. 11.55a a Obr. 11.56a zobrazena teplotní pole, která byla získána během spalování v sekundárním režimu. Teplotní pole obou hořáků odpovídají geometrii jejich hořákových hlav. Na hořáku APH jsou trysky navrtány na zkosené ploše, tak aby bylo palivo rozptýleno do prostoru ve formě kužele. Naproti tomu trysky na hořáku LPH jsou navrtány do plochy, která je kolmo k ose spalovací komory a palivo je pak nuceno proudit podél osy hořáku. Na základě těchto parametrů je možné pozorovat rozdílný tvar teplotních polí. Po přidání dusíku do paliva se u hořáku APH nejvyšší teploty vyskytují v bezprostřední blízkosti ústí hořáku a dále se pak posunují směrem ke stěně komory v druhé sekci. V případě hořáku LPH byla nejvyšší teplota naměřena v třetí sekci. Teplotní pole teplot nad 1000 °C má tendenci se rozšiřovat, ale rozšíření není tak výrazné jako u hořáku APH. Po přidání oxidu uhličitého je průběh podobný, ale oblasti s výskytem vyšších teplot se značně zvětšily. U hořáku LPH již palivo směřuje ke stěnám komory podobně jako u hořáku APH, nicméně s tím rozdílem, že značná část paliva je pořád spalována v oblasti osy souměrnosti komory.



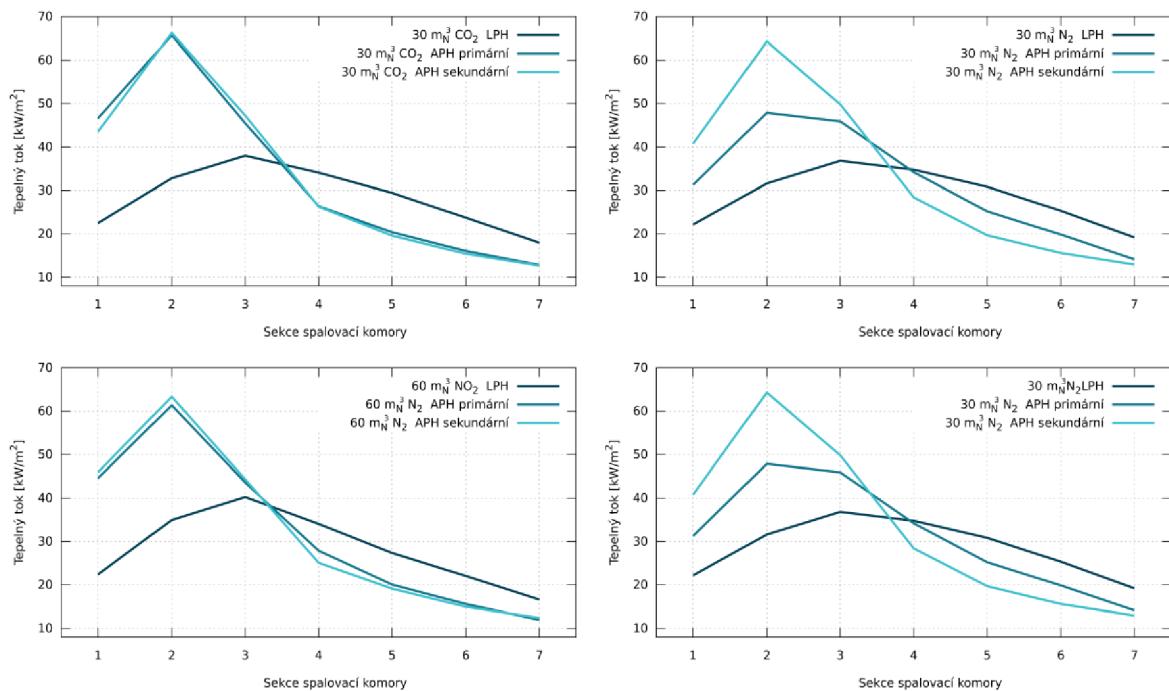
Obr. 11.55 a,b – Teploty v plamenu po přidání $60 \text{ m}_N^3/\text{h } \text{N}_2$ – APH sekundární vs. LPH



Obr. 11.56 a,b – Teploty v plamenu po přidání $60 \text{ m}_N^3/\text{h } \text{CO}_2$ – APH sekundární vs. LPH

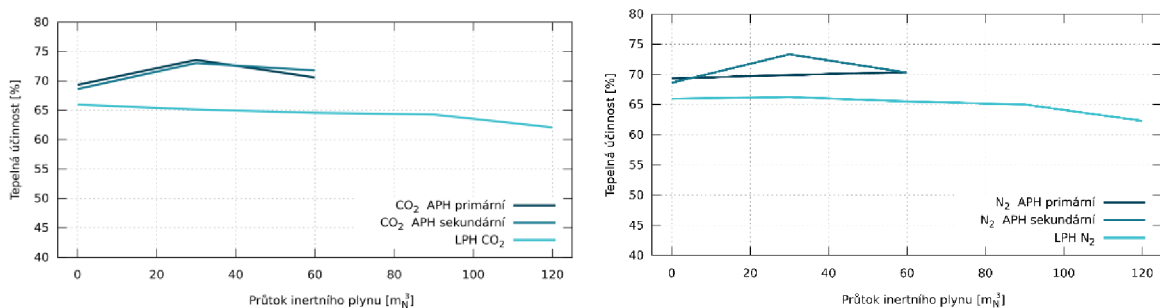
11.7.3 Tepelné toky a termická účinnost

Na Obr. 12.57 jsou srovnány vlivy inertních plynů při průtocích $30 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ a $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}$. Rozložení tepelných toků u obou hořáků odpovídá do značné míry tvaru plamene, popsanému v předchozí kapitole. Lze pozorovat, že u hořáku LPH je plamen delší a dochází k postupné distribuci tepelného toku podél spalovací komory. Na druhou stranu profily tepelných toků na hořáku APH se vyznačují maximem ve druhé sekci komory a směrem ke konci spalovací komory prudce klesají.



Obr. 11.57 – Vliv přidání CO_2 a N_2 na tepelné toky – APH vs. LPH

Porovnání hořáků APH a LPH z pohledu termické účinnosti vyznívá jednoznačně lépe pro hořák konvenčního typu, který je optimalizován pro maximální efektivitu spalování. Hořák LPH disponuje horší účinností. Důvodem může být skutečnost, že nebyl využit celý jeho potenciál.



Obr. 11.58 – Vliv přidání CO_2 a N_2 na termickou účinnost – APH vs. LPH

11.8 Vlastnosti a skutečné složení paliv

Pro výpočet vlastností paliva a následného složení spalin byl použit výpočtový model v programu ChemCAD popsáný v kapitole 6. Díky tomuto výpočtu bylo možné doložit některé

poznatky, zejména změny při měření teplot. Při pohledu na složení spalin a analýze obsahu dusíku nebo oxidu uhličitého je vidět jasná závislost. Pokud by byla podobná paliva použita pro zapálení hořáku, je důležité znát horní a dolní mez výbušnosti. Vlastnosti paliv po přidání dusíku a oxidu uhličitého jsou shrnuty v Tab. 11.13 a Tab. 11.14. Během experimentálního měření byl inertní plyn vždy přimícháván do zemního plynu až poté, co bylo zapáleno, a ve spalovací komoře panovaly stabilní podmínky.

Tab. 11.13 – Vlastnosti a složení paliva po přidání oxidu uhličitého

Průtok CO ₂ [mN ³]												N ₂ /CO ₂ [mN ³]	
	0	5	7,5	10	20	30	40	50	60	90	120	5/5	5/7,5
Složky paliva													
Vodík [% obj.]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metan [% obj.]	97,101	88,27	84,43	80,91	69,35	60,68	53,94	48,55	44,13	34,68	28,56	80,91	77,68
Etan [% obj.]	1,59	1,45	1,38	1,33	1,14	0,99	0,88	0,8	0,72	0,57	0,47	1,33	1,27
Propan [% obj.]	0,362	0,33	0,31	0,3	0,26	0,23	0,2	0,18	0,16	0,13	0,11	0,3	0,29
n-Butan [% obj.]	0,057	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05
Isobutan [% obj.]	0,061	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05
Pentan [% obj.]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0,01	0,01
Hexan [% obj.]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0,01	0,01
Oxid uhelnatý [% obj.]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxid uhličitý [% obj.]	0,1	9,18	13,13	16,75	26,84	37,56	44,5	50,05	54,59	64,32	70,62	8,42	8,08
Dusík [% obj.]	0,709	0,64	0,62	0,59	0,51	0,44	0,39	0,35	0,32	0,25	0,21	8,92	12,57
Vlastnosti paliva													
LHV [MJ/mN ³]	36,3	33	29,92	30,25	25,93	22,69	20,16	18,15	16,5	12,96	10,68	30,25	29,04
HHV [MJ/mN ³]	40,3	36,62	33,21	33,57	28,77	25,18	22,38	19,01	18,31	14,39	11,85	33,57	30,55
LFL [%]	4,95	5,41	5,65	5,88	6,79	7,69	8,57	9,35	10,27	12,72	15,03	5,88	6,11
HFL [%]	15,01	16,26	15,88	17,48	19,82	22,03	24,12	50,05	27,98	33,08	37,51	17,48	18,08
Wobbe [MJ/mN ³]	53,3	45,16	39,83	39,31	31,35	26,15	22,46	19,7	17,55	13,24	10,64	40,61	38,67
Hustota [kg/mN ³]	0,738	0,85	0,898	0,942	1,088	1,198	1,283	1,351	1,407	1,526	1,603	0,883	0,898
ATP [°C]	1787	1775	1766	1757	1722	1689	1657	1627	1597	1516	1443	1764	1758
Složení spalin													
Oxid uhličitý	8,138	8,85	9,201	9,549	10,911	12,225	13,493	14,718	15,902	19,229	22,252	8,77	8,73
Kyslík	2,999	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Voda	16,957	16,802	16,727	16,65	16,355	16,07	15,794	15,528	15,271	14,549	13,894	16,65	16,575
Dusík	71,051	70,499	70,227	69,96	68,905	67,888	66,908	65,96	65,044	62,47	60,131	70,738	70,857
Argon	0,855	0,849	0,845	0,841	0,829	0,817	0,805	0,794	0,783	0,752	0,723	0,842	0,838

Tab. 11.14 – Vlastnosti a složení paliva po přidání dusíku

Průtok N₂ [mN³]	0	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	30	40	50	60	70	77,5	90	120
Složky paliva																
Vodík [% obj.]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metan [% obj.]	97,101	88,27	84,43	80,91	77,68	74,69	71,92	69,35	60,68	53,94	48,55	44,13	40,46	38,08	34,68	28,56
Etan [% obj.]	1,59	1,45	1,38	1,33	1,27	1,22	1,18	1,14	0,99	0,88	0,8	0,72	0,66	0,62	0,57	0,47
Propan [% obj.]	0,362	0,33	0,31	0,3	0,29	0,28	0,27	0,26	0,23	0,2	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11
n-Butan [% obj.]	0,057	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Isobutan [% obj.]	0,061	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Pentan [% obj.]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0
Hexan [% obj.]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxid uhelnatý [% obj.]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxid uhličitý [% obj.]	0,1	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
Dusík [% obj.]	0,709	9,74	13,66	17,26	20,57	23,62	26,45	29,08	37,94	44,84	50,35	54,87	58,63	61,04	64,54	70,8
Vlastnosti paliva																
LHV [MJ/mN ³]	36,3	33	31,56	30,25	29,04	27,92	26,89	25,93	22,69	20,16	18,15	16,5	15,12	14,23	12,96	10,68
HHV [MJ/mN ³]	40,3	36,62	33,21	33,57	32,23	30,99	29,84	28,77	25,18	22,38	20,14	18,31	16,79	15,8	14,39	11,85
LFL [%]	4,95	5,41	5,65	5,88	6,11	6,34	6,56	6,79	7,69	8,57	9,43	10,27	11,1	11,72	12,72	15,03
HFL [%]	15,01	16,26	16,88	17,48	18,08	18,67	19,25	19,82	22,03	24,12	26,1	27,98	29,76	31,04	33,08	37,51
Wobbe [MJ/mN ³]	53,3	45,16	44,38	42,05	39,96	38,07	36,35	34,78	29,68	25,89	22,97	20,64	18,74	17,53	15,83	12,85
Hustota [kg/mN ³]	0,738	0,785	0,805	0,823	0,841	0,856	0,871	0,884	0,93	0,966	0,994	1,017	1,037	1,049	1,067	1,099
ATP [°C]	1787	1798	1800	1794	1789	1783	1777	1772	1750	1729	1708	1668	1648	1634	1612	1560
Složení spalin																
Oxid uhličitý	8,138	8,063	8,026	7,99	7,953	7,917	7,881	7,846	7,708	7,575	7,446	7,322	7,202	7,114	6,972	6,655
Kyslík	2,999	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Voda	16,957	16,802	16,726	16,65	16,575	16,501	16,428	16,355	16,07	15,794	15,528	15,271	15,024	14,842	14,55	13,894
Dusík	71,051	71,287	71,403	71,519	71,633	71,746	71,858	71,97	72,405	72,825	73,232	73,624	74,003	74,28	74,726	75,728
Argon	0,855	0,849	0,845	0,841	0,839	0,836	0,833	0,829	0,817	0,806	0,794	0,783	0,771	0,764	0,752	0,723

12 Závěr

Problematika spalování nízko-výhřevných paliv je bezesporu komplexní téma. Z rešerše v oblasti spalování nízko-výhřevných paliva vyplynulo, že se výzkumem v této oblasti již několik let zabývá řada vědeckých týmů. Nároky na využití alternativních zdrojů paliv se budou neustále zvyšovat, a proto nutnost rozšíření databáze experimentálních dat bude stále aktuální. I přes neutuchající snahu se dosud nepodařilo některé z jevů dostatečně popsat.

Z dat získaných během experimentálních testů je možné vyvodit závěr, že nízko-výhřevná paliva nemohou být adekvátní náhradou ušlechtilého paliva na konvenčních typech hořáků. Tento závěr je možné učinit, protože namíchaná paliva prakticky měla stejné složení jako nízko-výhřevné palivo pocházející z bioplynových stanic. Pokud by ovšem byla připravena směs těchto paliv s palivem ušlechtilým, může se to pozitivně projevit na snížení emisí oxidů dusíků nebo zvýšením tepelného toku v určité vzdálenosti od ústí hořáku (toto závisí především na jeho geometrii). Alternativně je možné do paliva cíleně přidat inertní plyn za účelem ochlazení plamene a snížení teplotních špiček, nicméně tato varianta bude s největší pravděpodobností značně neekonomická.

Z analýzy dat vyplývá jasná závislost mezi množstvím inertních plynů v palivu a redukcí emisí oxidů dusíku (NO_x). Jakýkoliv balastní plyn v palivu, který se neúčastní spalování, ochlazuje plamen a snižuje teplotní špičky za současného snížení NO_x . Z dvojice testovaných inertních plynů byl účinnější oxid uhličitý. S rostoucím množstvím inertního plynu (bez ohledu na použitý hořák) v palivu dochází k poklesu produkovaných emisí NO_x , změně teplotního profilu – dochází ke zkrácení plamene, s čímž souvisí i další fenomén a tím je posun špičky tepelných toků blíže k ústí hořáku. Experimenty potvrdily, že využití alternativních paliv má smysl a že jejich použití může mít pozitivní nejenom ekonomický, ale také sociální efekt.

Jako součást práce vznikly dva původní návrhy technických řešení, ze kterých byly následně vyrobeny funkční vzorky zařízení. Zařízení vznikla po načerpání dostatečného množství poznatků v oblasti spalování nízko-výhřevných paliv. Zkonstruovaná zařízení odpovídají posledním trendům v této oblasti a umožňují pracovat s běžně dostupnými složkami průmyslově využívaných paliv. Prvním zařízením byla směšovací stanice plynů, která je uzpůsobena pro velké průtoky plynů a umožňuje připravit paliva o nízké výhřevnosti. Druhým ze zařízení je hořáková vestavba LPH, umožňující efektivně spalovat paliva s kolísajícím složením. Unikátní konstrukce hořákové vestavby byla patentována (číslo přihlášky 2017-33405).

I přesto, že bylo získáno množství experimentálních dat, stále je možné na některých oblastech pracovat. Proto by se mohla budoucí práce věnovat tématům jako:

- Porovnání jednotlivých hořákových hlav u vestavby na nízko-výhřevná paliva. Především zhodnocení rozdílů mezi jednotlivými geometriemi z pohledu emisí oxidů dusíku a stability plamene. Při dalším měření by bylo zajisté zajímavé použít metodu plánovaného experimentu.

- Pro další snížení výhřevnosti by bylo vhodné vyrobit směšovač, ke kterému by bylo možné připojit více svazků plynu, aby bylo eliminováno jejich zamrzání. V ideálním případě by bylo vhodné u oxidu uhličitého připojit alespoň tři svazky tak, aby odběr plynu nepřesáhl $60 \text{ m}_N^3/\text{hod}/\text{svazek}$.
- Proměření teplot v plamenu, emisí a tepelných toků u všech třech typů hořáků po přidání páry. Zároveň by bylo nutné vyjádřit přidané množství inertního plynu jako hmotnostní koncentraci, aby bylo možné naměřená data porovnat s novými daty.
- Vytvořit CFD model pro spalování nízko-výhřevných plynů a porovnat získaná numerická data s daty naměřenými experimentálně.
- Alternativně se nabízí možnost proměřit parametry nové hořákové vestavby s některým z paliv z reálného zdroje, které obsahuje vodík.

Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Vliv konstrukce hořáku na tvorbu NO _x	18
Obr. 2.2 – Závislost relativního poměru paliva a oxidantu na tvorbu NO _x	19
Obr. 2.3 – Závislost tvorby NO v závislosti na době zdržení v teplotních pásmech	20
Obr. 2.4 – Graf tvorby termických NO v závislosti na teplotě	20
Obr. 4.1 – Napětí generované jednotlivými typy termočlánků v závislosti na teplotě	28
Obr. 6.1 – Schéma procesu v software CHEMCAD.....	42
Obr. 7.1 – Molekula oxidu uhličitého	48
Obr. 7.2 – Fázový diagram oxidu uhličitého.....	49
Obr. 7.3 – Molekula dusíku.....	50
Obr. 7.4 – Fázový diagram dusíku	50
Obr. 7.5 – Molekula vodíku	52
Obr. 7.6 – Fázový diagram vodíku.....	52
Obr. 8.1 a,b – 3D model směšovací stanice – původní návrh	55
Obr. 8.2 a,b – 3D model směšovací stanice – finální řešení	56
Obr. 8.3 – PID schéma směšovací stanice	58
Obr. 11.1 – Zkušebna hořáků na VUT v Brně	72
Obr. 11.2 – Technologické schéma zkušebny hořáků.....	73
Obr. 11.3 – 3D model hořáku ZPH na zemní plyn	74
Obr. 11.4 – 3D model hořáku APH na zemní plyn	74
Obr. 11.5 – 3D model hořáku LPH na nízko-výhřevný plyn.....	75
Obr. 11.6 – Hořák ZPH – vliv inertních plynů na emise NO _x	81
Obr. 11.7 – Hořák ZPH – vliv inertních plynů na teplotu v plamenu.....	82
Obr. 11.8 – Hořák ZPH – primární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	84
Obr. 11.9 – Hořák ZPH – primární režim – 10 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	84
Obr. 11.10 – Hořák ZPH – primární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 10 m _N ³ /h CO ₂	84
Obr. 11.11 – Hořák ZPH – primární režim – 5 m _N ³ /h N ₂ , 5 m _N ³ /h CO ₂	84
Obr. 11.12 – Hořák ZPH – sekundární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	85
Obr. 11.13 – Hořák ZPH – sekundární režim – 10 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	85
Obr. 11.14 – Hořák ZPH – sekundární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 10 m _N ³ /h CO ₂	85
Obr. 11.15 – Hořák ZPH – sekundární režim – 5 m _N ³ /h N ₂ , 5 m _N ³ /h CO ₂	86
Obr. 11.16 – Hořák ZPH – tepelné toky	87
Obr. 11.17 – Hořák APH – vliv inertních plynů na emise NO _x	88
Obr. 11.18 – Hořák APH – vliv inertních plynů na teplotu spalin.....	89
Obr. 11.19 – Hořák APH – primární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	91
Obr. 11.20 – Hořák APH – primární režim – 30 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	91
Obr. 11.21 – Hořák APH – primární režim – 60 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	91
Obr. 11.22 – Hořák APH – primární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 30 m _N ³ /h CO ₂	91
Obr. 11.23 – Hořák APH – primární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 60 m _N ³ /h CO ₂	91
Obr. 11.24 – Hořák APH – sekundární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	92
Obr. 11.25 – Hořák APH – sekundární režim – 30 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	92
Obr. 11.26 – Hořák APH – sekundární režim – 60 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	93
Obr. 11.27 – Hořák APH – sekundární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 30 m _N ³ /h CO ₂	93
Obr. 11.28 – Hořák APH – sekundární režim – 0 m _N ³ /h N ₂ , 60 m _N ³ /h CO ₂	93

Obr. 11.29 – Hořák APH – primární režim – vliv přidání N ₂ na tepelné toky	94
Obr. 11.30 – Hořák APH – sekundární režim – vliv přidání N ₂ na tepelné toky	94
Obr. 11.31 – Hořák APH – primární režim – vliv přidání CO ₂ na tepelné toky	95
Obr. 11.32 – Hořák APH – sekundární režim – vliv přidání CO ₂ na tepelné toky	95
Obr. 11.33 – Hořák APH – vliv přidání 30 m _N ³ /h N ₂ a CO ₂ na tepelné toky	95
Obr. 11.34 – Hořák APH – vliv přidání 60 m _N ³ /h N ₂ a CO ₂ na tepelné toky	96
Obr. 11.35 – Hořák APH – vliv přidání N ₂ a CO ₂ na termickou účinnost spalování	96
Obr. 11.36 – Hořák LPH – vliv inertních plynů na emise NO _x	98
Obr. 11.37 – Hořák APH – vliv inertních plynů na teplotu spalin	99
Obr. 11.38 – Hořák LPH – 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	100
Obr. 11.39 – Hořák LPH – 0 m _N ³ /h N ₂ , 30 m _N ³ /h CO ₂	100
Obr. 11.40 – Hořák LPH – 0 m _N ³ /h N ₂ , 60 m _N ³ /h CO ₂	100
Obr. 11.41 – Hořák LPH – 0 m _N ³ /h N ₂ , 90 m _N ³ /h CO ₂	101
Obr. 11.42 – Hořák LPH – 0 m _N ³ /h N ₂ , 120 m _N ³ /h CO ₂	101
Obr. 11.43 – Hořák LPH – 30 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	101
Obr. 11.44 – Hořák LPH – 60 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	101
Obr. 11.45 – Hořák LPH – 90 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	101
Obr. 11.46 – Hořák LPH – 120 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	102
Obr. 11.47 – Hořák LPH – vliv přidání CO ₂ na tepelné toky	103
Obr. 11.48 – Hořák LPH – vliv přidání N ₂ na tepelné toky	103
Obr. 11.49 – Hořák APH – vliv přidání 30 m _N ³ /h a 60 m _N ³ /h N ₂ a CO ₂ na tepelné toky	103
Obr. 11.50 – Hořák APH – vliv přidání 90 m _N ³ /h a 120 m _N ³ /h N ₂ a CO ₂ na tepelné toky	103
Obr. 11.51 – Hořák LPH – vliv přidání N ₂ a CO ₂ na termickou účinnost spalování	104
Obr. 11.52 – Vliv přidání N ₂ a CO ₂ na emise NO _x – hořák APH primární vs. LPH	105
Obr. 11.53 – Vliv přidání N ₂ a CO ₂ na emise NO _x – hořák APH sekundární vs. LPH	105
Obr. 11.54 – Vliv přidání N ₂ a CO ₂ na emise NO _x – APH sekundární vs. LPH	106
Obr. 11.55 a,b – Teploty v plamenu po přidání 60 m _N ³ /h N ₂ – APH sekundární vs. LPH	107
Obr. 11.56 a,b – Teploty v plamenu po přidání 60 m _N ³ /h CO ₂ – APH sekundární vs. LPH	107
Obr. 11.57 – Vliv přidání CO ₂ a N ₂ na tepelné toky – APH vs. LPH	108
Obr. 11.58 – Vliv přidání CO ₂ a N ₂ na termickou účinnost – APH vs. LPH	108

Seznam tabulek

Tab. 2.1 – Parametry ovlivňující tvorbu NO.....	21
Tab. 2.2 – Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné do 31. prosince 2017.....	24
Tab. 2.3 – Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné od 1. ledna 2018	24
Tab. 4.1 – Rozdělení jednotlivých typů termočlánků	28
Tab. 4.2 – Průměrné složení zemních plynů dostupných v Evropě	32
Tab. 5.1 – Vlastnosti spalitelných plynů vyskytujících se v palivech.....	33
Tab. 5.2 – Složení různých druhů bioplynu	34
Tab. 5.3 – Suroviny běžně používané pro výrobu bioplynu	35
Tab. 5.4 – Složení různých druhů koksárenských plynů.....	37
Tab. 5.5 – Složení a výhřevnosti různých druhů vodních plynů.....	38
Tab. 5.6 – Složení a výhřevnosti různých druhů vysokopecních plynů.....	39
Tab. 5.7 – Složení a výhřevnosti různých druhů generátorových plynů.....	40
Tab. 5.8 – Složení konvertorového plynu	40
Tab. 5.9 – Složení feroslitinového plynu	41
Tab. 6.1 – Rozdělení do tříd podle Wobbeho čísel	44
Tab. 6.2 – Složení vybraných nízko-výhřevných plynů a jejich vlastnosti.....	46
Tab. 7.1 – Vlastnosti inertních plynů a vodíku	47
Tab. 10.1 – Zadávací parametry pro návrhový výpočet hořáku.....	66
Tab. 11.1 – Plán měření TEST A – N ₂	76
Tab. 11.2 – Plán měření TEST A – CO ₂	76
Tab. 11.3 – Plán měření TEST A – CO ₂ /N ₂	76
Tab. 11.4 – Plán měření TEST B – N ₂ a CO ₂	77
Tab. 11.5 – Plán měření (●označuje nastavení, při kterém bylo provedeno měření)	79
Tab. 11.6 – Průměrná relativní chyba v jednotlivých sekcích	80
Tab. 11.7 – Výsledky měření na hořáku ZPH TEST A	83
Tab. 11.8 – Výsledky měření na hořáku ZPH TEST C.....	86
Tab. 11.9 – Výsledky měření na hořáku APH TEST A.....	90
Tab. 11.10 – Výsledky měření na hořáku APH TEST C	96
Tab. 11.11 – Výsledky měření na hořáku LPH TEST A	99
Tab. 11.12 – Výsledky měření na hořáku LPH TEST C.....	104
Tab. 11.13 – Vlastnosti a složení paliva po přidání oxidu uhličitého	110
Tab. 11.14 – Vlastnosti a složení paliva po přidání dusíku.....	111

Obsah DVD

Název	Cesta k dokumentu
Dizertační práce	..\Dizertacni.prace.pdf
Teze	..\Teze.pdf
Přílohy	..\Přílohy\

Seznam použitých zdrojů

- [1] HUDÁK, I. *Charakteristické parametry procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 44 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D., 2013. 44 s.
- [2] BĚLOHRADSKÝ, Petr, Pavel SKRYJA a Igor HUDÁK. Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics. *Energy* [online]. 2014, **75**, 116–126. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.04.026
- [3] LI, S. C. a F. A. WILLIAMS. NO_x formation in two-stage methane-air flames. *Combustion and Flame* [online]. 1999, **118**(3). ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/S0010-2180(99)00002-4
- [4] ZHAO, D., H. YAMASHITA, K. KITAGAWA, N. ARAI a T. FURUHATA. Behavior and effect on NO_x formation of OH radical in methane-air diffusion flame with steam addition. *Combustion and Flame* [online]. 2002, **130**(4), 352–360. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/S0010-2180(02)00385-1
- [5] FUSS, S. Paul, Ezra F. CHEN, Wenhua YANG, Robert J. KEE, Bradley A. WILLIAMS a James W. FLEMING. Inhibition of premixed methane/air flames by water mist. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2002, **29**(1), Proceedings of the Combustion Institute, 361–368. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/S1540-7489(02)80048-7
- [6] LIU, Fengsham, Hongsheng GUO a Gregory J. SMALLWOOD. The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames. *Combustion and Flame* [online]. 2003, **133**(4), 495–497. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/S0010-2180(03)00019-1
- [7] KOBAYASHI, Hideaki, Soichiro YATA, Yasuhisa ICHIKAWA a Yasuhiro OGAMI. Dilution effects of superheated water vapor on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2009, **32**(2), 2607–2614. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2008.05.078
- [8] KOBAYASHI, Hideaki a Hirokazu HAGIWARA. Effects of CO₂ dilution on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature. *Proceedings of The Combustion Institute* [online]. 2007, **31**(1), 1451–1458. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2006.07.159
- [9] COHÉ, Cécile, Christian CHAUVEAU, Iskender GÖKALP a Dilek Funda KURTULUŞ. CO₂ addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH₄ air flames. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2009, **32**(2), 1803–1810. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2008.06.181
- [10] MITU, Maria, Maria PRODAN, Venera GIURCAN, Domnina RAZUS a Dumitru OANCEA. Influence of inert gas addition on propagation indices of methane–air deflagrations. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2016, **102**, 513–522. ISSN 0957-5820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2016.05.007

- [11] SALVADOR, S., Y. KARA a J. -M. COMMANDRÉ. Reduction of NO emissions from a VOC recuperative incinerator by dilution of the fuel supply. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2004, **24**(2–3), 245–254. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.08.007
- [12] GILES, Daniel E., Sibendu SOM a Suresh K. AGGARWAL. NO_x emission characteristics of counterflow syngas diffusion flames with airstream dilution. *Fuel* [online]. 2006, **85**(12–13), 1729–1742. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2006.01.027
- [13] PARK, Jeong, Sang In KEEL a Jin Han YUN. Addition Effects of H₂ and H₂O on Flame Structure and Pollutant Emissions in Methane–Air Diffusion Flame. *Energy & Fuels* [online]. 2007, **21**(6), 3216–3224. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/ef700211m
- [14] GLARBORG, Peter a Line L. B. BENTZEN. Chemical Effects of a High CO₂ Concentration in Oxy-Fuel Combustion of Methane. *Energy & Fuels* [online]. 2007, **22**(1). ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/ef7005854
- [15] CHUN, Kang Woo, Hun-Jik CHUNG, Suk Ho CHUNG a Jae Hyuk CHOI. A numerical study on extinction and NO_x formation in nonpremixed flames with syngas fuel. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2011, **25**(11), 2943–2949. ISSN 1738-494X, 1976-3824. Dostupné z: doi:10.1007/s12206-011-0810-4
- [16] SMITH, G.P., D.M. GOLDEN, M. FRENKLACH, N.W. MORIARTY, B. EITENEER, M. GOLDENBERG, C.T. BOWMAN, R.K. HANSON, S. SONG, W.C. GARDINER, V.V. LISSIANSKI a Z. QIN. *GRI-Mech project* [online]. nedatováno [vid. 2015-02-18]. Dostupné z: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
- [17] BOUSHAKI, T., Y. DHUÉ, L. SELLE, B. FERRET a T. POINSOT. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane–air premixed flame: Experimental and numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2012, **37**(11), 9412–9422. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2012.03.037
- [18] HINTON, Nathan a Richard STONE. Laminar burning velocity measurements of methane and carbon dioxide mixtures (biogas) over wide ranging temperatures and pressures. *Fuel* [online]. 2014, **116**, 743–750. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2013.08.069
- [19] RASMUSSEN, Christian Lund, Anja Egede RASMUSSEN, Peter GLARBORG, Christian Lund RASMUSSEN, Anja Egede RASMUSSEN a Peter GLARBORG. Sensitizing effects of NO_x on CH₄ oxidation at high pressure. *Combustion and Flame* [online]. 2008, **154**(3), 529–545. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/j.combustflame.2008.01.012
- [20] SONG, Fuqiang, Zhi WEN, Zhiyong DONG, Enyu WANG a Xunliang LIU. Ultra-low calorific gas combustion in a gradually-varied porous burner with annular heat recirculation. *Energy* [online]. 2017, **119**, 497–503. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2016.12.077

- [21] KUMAR, P. a D. P. MISHRA. Characterization of bluff-body stabilized LPG jet diffusion flame with N₂ dilution. *Energy Conversion and Management* [online]. 2008, **49**(10), 2698–2703. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2008.04.007
- [22] LE CONG, Tanh a Philippe DAGAUT. Experimental and Detailed Modeling Study of the Effect of Water Vapor on the Kinetics of Combustion of Hydrogen and Natural Gas, Impact on NO_x. *Energy & Fuels* [online]. 2009, **23**(2), 725–734. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/ef800832q
- [23] MAZAS, A. N., B. FIORINA, D. A. LACOSTE a T. SCHULLER. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames. *Combustion and Flame* [online]. 2011, **158**(12), 2428–2440. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/j.combustflame.2011.05.014
- [24] GÖKE, Sebastian, Marc FÜRI, Gilles BOURQUE, Bernhard BOBUSCH, Katharina GÖCKELER, Oliver KRÜGER, Sebastian SCHIMEK, Steffen TERHAAR a Christian Oliver PASCHEREIT. Influence of steam dilution on the combustion of natural gas and hydrogen in premixed and rich-quench-lean combustors. *Fuel Processing Technology* [online]. 2013, **107**, Selected Papers from the Eleventh International Conference on Combustion and Energy Utilization (11th ICCEU), 14–22. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2012.06.019
- [25] ALBIN, Eric, Holger NAWROTH, Sebastian GÖKE, Yves D'ANGELO a Christian Oliver PASCHEREIT. Experimental investigation of burning velocities of ultra-wet methane–air–steam mixtures. *Fuel Processing Technology* [online]. 2013, **107**, Selected Papers from the Eleventh International Conference on Combustion and Energy Utilization (11th ICCEU), 27–35. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2012.06.027
- [26] DE FERRIÈRES, S., A. EL BAKALI, L. GASNOT, M. MONTERO a J. F. PAUWELS. Kinetic effect of hydrogen addition on natural gas premixed flames. *Fuel* [online]. 2013, **106**, 88–97. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.06.045
- [27] RANGRAZI, Abdolrasoul, Hamid NIAZMAND a Hamid Momahedi HERAVI. Experimental study of argon dilution effects on NO_x emission in a non-premixed flame in comparison with nitrogen. *Korean Journal of Chemical Engineering* [online]. 2013, **30**(8), 1588–1593. ISSN 0256-1115, 1975-7220. Dostupné z: doi:10.1007/s11814-013-0088-6
- [28] SHIMOKURI, Daisuke, Yuuji KARATSU a Satoru ISHIZUKA. Effects of inert gases on the vortex bursting in small diameter tubes. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2013, **34**(2), 3403–3410. ISSN 1540-7489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2012.05.038
- [29] ZHEN, H. S., C. W. LEUNG a C. S. CHEUNG. A comparison of the heat transfer behaviors of biogas–H₂ diffusion and premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2014, **39**(2), 1137–1144. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.10.100
- [30] ZHEN, H. S. a C. W. LEUNG. Effects of hydrogen addition on the characteristics of a biogas diffusion flame. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, **38**(16), 6874–6881. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.02.046

- [31] ZHEN, H. S., C. W. LEUNG, C. S. CHEUNG a Z. H. HUANG. Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using Bunsen burner. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2014, **39**(25), 13292–13299. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2014.06.126
- [32] HOSSEINI, Seyed Ehsan a Mazlan Abdul WAHID. Biogas Utilization: Experimental Investigation on Biogas Flameless Combustion in Lab-Scale Furnace. *Energy Conversion and Management* [online]. 2013, **74**, 426–432. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2013.06.026
- [33] HOSSEINI, Seyed Ehsan, Ghobad BAGHERI a Mazlan Abdul WAHID. Numerical investigation of biogas flameless combustion. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, **81**, 41–50. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2014.02.006
- [34] COLORADO, A. F., B. A. HERRERA a A. A. AMELL. Performance of a flameless combustion furnace using biogas and natural gas. *Bioresource Technology* [online]. 2010, **101**(7), 2443–2449. ISSN 1873-2976. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2009.11.003
- [35] WANNENG DAI, Chaokui Qin. Experimental studies of flame stability limits of biogas flame. *Energy Conversion and Management* [online]. 2012, **63**, 157–161. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2012.03.021
- [36] SAEDIAMIRI, Meghdad a Madjid BIROUK. On the stability of a turbulent non-premixed biogas flame: Effect of low swirl strength. *Combustion and Flame* [online]. 2014, **161**(5), 1326–1336. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/j.combustflame.2013.11.002
- [37] BAUKAL, Charles E., Jr. *Industrial Combustion Pollution and Control*. B.m.: CRC Press, 2004. 920 s. ISBN 978-0-203-91278-2.
- [38] CONNOR, Steve. Nitric oxide is „molecule of the year". *The Independent* [online]. [vid. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.independent.co.uk/news/uk/nitric-oxide-is-molecule-of-the-year-1564427.html>
- [39] BAUKAL, Charles E., Jr. *The John Zink Combustion Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. 800 s. ISBN 978-0-8493-2337-9.
- [40] SVOBODA, K., J. CERMÁK a V. VESELÝ. NO_x Chemistry and Emissions - II. In: Christian VOVELLE, ed. *Pollutants from Combustion* [online]. B.m.: Springer Netherlands, 2000 [vid. 2015-03-11], NATO Science Series, 547, s. 165–182. ISBN 978-0-7923-6135-0. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-4249-6_9
- [41] WARK, Kenneth, Cecil F. WARNER a Wayne T. DAVIS. *Air Pollution: Its Origin and Control*. 3 edition. Menlo Park, Calif: Prentice Hall, 1997. 560 s. ISBN 978-0-673-99416-5.
- [42] BAUKAL, Charles E., Jr, ed. *Industrial Burners Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2003. 808 s. ISBN 978-0-8493-1386-8.
- [43] INNOVATIVE COMBUSTION TECHNOLOGIES, PELHAM. PULVERIZER PERFORMANCE AND NOX EMISSIONS. *PULVERIZER PERFORMANCE AND NOX*

- EMISSIONS* [online]. 2015 [vid. 2015-03-12]. Dostupné z: http://www.innovativecombustion.com/pulv_nox.html
- [44] ZELDOVICH, Yakov Borisovich. *Selected Works of Yakov Borisovich Zeldovich, Volume I: Chemical Physics and Hydrodynamics*. B.m.: Princeton University Press, 2014. 490 s. ISBN 978-1-4008-6297-9.
- [45] BAUKAL, Charles E., Jr, ed. *Oxygen-Enhanced Combustion*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2013. 792 s. ISBN 978-1-4398-6228-5.
- [46] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany prostředí, 2003. 226 s. ISBN 80-7080-517-X.
- [47] MALTE, Philip C. a Dee P. REES. Mechanisms and Kinetics of Pollutant Formation during Reaction of Pulverized Coal. In: L. Douglas SMOOT a David T. PRATT, ed. *Pulverized-Coal Combustion and Gasification* [online]. B.m.: Springer US, 1979 [vid. 2015-03-12], s. 183–215. ISBN 978-1-4757-1698-6. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-1696-2_11
- [48] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Control Techniques for Nitrogen Oxides Emissions from Stationary Sources, Revised, 2nd Edition, EPA-450/3-83-002* [online]. B.m.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air, Noise and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards. leden 1983. Dostupné z: <http://bit.ly/2n19sXi>
- [49] LAXA, Václav. *Technická ekologie: Stanovení emisních koncentrací ve spalínách plynového hořáku*. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2006. 5 s.
- [50] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Zákon o ochraně ovzduší* [online]. 5. únor 2012 [vid. 2017-03-13]. Dostupné z: http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/Z%20201_2012.pdf
- [51] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Vyhláška 415/2012 Sb.* 2012
- [52] EVROPSKÁ UNIE. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/75/EU*. 24. říjen 2010
- [53] KERLIN, Thomas W. a Mitchell JOHNSON. *Practical Thermocouple Thermometry* [online]. 2nd Edition. B.m.: International Society of Automation, 2012 [vid. 2017-03-02]. 181 s. ISBN 978-1-937560-27-0. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPTTE0002/practical-thermocouple/practical-thermocouple>
- [54] LONGE, Jacqueline L. *How Products Are Made: An Illustrated Guide to Product Manufacturing (How Products Are Made) Volume 6*. B.m.: Gale, 2001. ISBN 978-0-7876-3642-5.

- [55] KOHL, Arthur L. a Richard NIELSEN. *Gas Purification, Fifth Edition*. 5th edition. Houston, Tex: Gulf Professional Publishing, 1997. 900 s. ISBN 978-0-88415-220-0.
- [56] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. 858 s. ISBN 04-224-83.
- [57] FÍK, Josef. Složení zemních plynů. *TZB-Info* [online]. 2004 [vid. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/89-slozeni-zemnich-plynu>
- [58] SVOBODA, Alexandr. *Plynárenská příručka: Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*. Praha: GAS s.r.o., 1997. 1192 s. ISBN 80-902339-6-1.
- [59] SVATOŠOVÁ, Irena. *TZB I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. 203 s. ISBN 978-80-248-1479-7.
- [60] STRAKA, F. *Bioplyn - příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. 2. vydání. Praha: Gas, 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.
- [61] HOSSEINI, Seyed Ehsan a Mazlan Abdul WAHID. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **40**, 868–875. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.07.204
- [62] JELÍNEK, Antonín. *Hospodaření a manipulace s odpady ze zemědělství a venkovských sídel*. Praha: Agrospoj, 2001. 236 s. ISBN 80-239-4234-4.
- [63] BIOPROFIT. Anaerobní technologie. *BIOPLYN Popis anaerobní technologie* [online]. 2007. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [64] AL SEADI, Teodorita, Dominik RUTZ, Heinz PRASSL, Michael KÖTTNER, Tobias FINSTERWALDER, Silke VOLK a Rainer JANSEN. *Biogas Handbook*. B.m.: University of Southern Denmark Esbjerg, nedatováno. 126 s. ISBN 978-87-992962-0-0.
- [65] MIČA, Martin. *Kogenerace z bioplynu*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil Ph.D., 2011. 130 s.
- [66] ČEKANOVÁ, A. *Chemické složení bioplynu*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2008
- [67] JENÍČEK, P., J. ZÁBRANSKÁ, M. DOHÁNYOS a F. STRAKA. Síra v bioplynu - zdroje a příčiny problémů. *Mezinárodní konference Bioplyn, České Budějovice*. 2007.
- [68] KONVIČKA, Vladislav. *Hornická skripta* [online]. 2015 [vid. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/prirucka/prirucka.htm>
- [69] OCHRANA, Ladislav. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: VUT Brno, nedatováno. 85 s. ISBN 80-214-2847-3.
- [70] *Water gas* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [vid. 2015-02-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Water_gas

- [71] MĚCHURA, Petr. Voda jako palivo. *Biom.cz [online]* [online]. 2006 [vid. 2015-03-09]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/voda-jako-palivo>
- [72] ŠENOVSKÝ, P. *Parní kotel s přehříváním páry na spalování vysokopecního plynu* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D., 2014. 130 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/34340>
- [73] *Vysokopecní plyn* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [vid. 2015-02-18]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vysokopecní_plyn
- [74] *Gichtgas* [online]. 2015 [vid. 2015-02-18]. Dostupné z: http://de.swewe.net/word_show.htm/?79163_1
- [75] MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Druhotné energetické zdroje* [online]. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2008 [vid. 2015-10-03]. 97 s. Dostupné z: <http://www.fmfi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fmfi/cs/okruhy/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/635-Machackova-Druhotne-energeticke-zdroje.pdf>
- [76] POHOŘELÝ, Michael, Michal JEREMIÁŠ, Petra KAMENÍKOVÁ, Sjarhei SKOBLIA, Karel SVOBODA a Miroslav PUNČOCHÁŘ. Zplynování biomasy. *Chemické listy*. 2012, (106), 264–274. ISSN 1213-7103.
- [77] *Zdroje tepla a tepelné sítě - podklady pro studenty*. B.m.: Žilinská univerzita v Žilině, Strojnícka fakulta, Katedra energetickej techniky, 2011.
- [78] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN ISO 6976. Natural gas - Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition*. B.m.: Český normalizační institut. 2006
- [79] FÍK, Josef. Spalovací vlastnosti ZP (II). *TZB-Info* [online]. 2004 [vid. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1980-spalovaci-vlastnosti-zp-ii>
- [80] GREEN, Don a Robert PERRY. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th edition. Edinburgh: McGraw-Hill Professional, 2007. 2400 s. ISBN 978-0-07-142294-9.
- [81] AIR LIQUIDE. Gas Encyclopedia Air Liquide. *Gas Encyclopedia Air Liquide* [online]. 2016 [vid. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://encyclopedia.airliquide.com/>
- [82] KUTĚJ, Petr a Jiří HANZAL. *Oxid uhličitý - Řada: informace, normy, předpisy* [online]. Praha: Česká asociace technických plynů, 2002 [vid. 2017-03-16]. 21 s. Dostupné z: http://www.catp.cz/publikace2.php?download=catp_01-02-cz.pdf
- [83] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila, Zdena POJEZNÁ, Jan HAMERNÍK, Miroslav HOLUB, Daniel KRÁTKÝ, Radek KŘEPELKA, Pavel ROHAN a Vít TUČEK. *Dusík - Řada: informace, normy, předpisy* [online]. Praha: Česká asociace technických plynů, 2014 [vid. 2017-03-16]. 261 s. Dostupné z: http://www.catp.cz/publikace2.php?download=CATP_1_14_dusik.pdf

- [84] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila, Vít TUČEK a Jiří HANZAL. *Vodík - Řada: informace, normy, předpisy* [online]. Praha: Česká asociace technických plynů, 2004 [vid. 2017-03-16]. 27 s. Dostupné z: http://www.catp.cz/publikace2.php?download=catp_01-02-cz.pdf
- [85] METELKA, L a R TOLASZ. *Klimatické změny: fakta bez mýtů* [online]. Praha: Centrum pro otázky životního prostředí, UK, 2009 [vid. 2017-03-15]. 36 s. ISBN 978-80-87076-13-2. Dostupné z: http://amper.ped.muni.cz/gw/jev/dobre/Klima_zmeny_fakta.pdf
- [86] BUŠTA, Karel a Zdeněk WAGNER. Oxid uhličitý a možnosti jeho využití I: fyzikální a chemické vlastnosti a jejich využití v praxi [online]. 2012 [vid. 2017-03-15]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/8492-oxid-uhlicity-a-moznosti-jeho-vyuziti-i>
- [87] Earth's CO2 Home Page. *CO2.Earth* [online]. únor 2017 [vid. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://www.co2.earth/>
- [88] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN 1089-3 Lahve na přepravu plynů - Označování lahví na plyny (vyjma LPG) - Část 3: Barevné značení*. B.m.: Český normalizační institut. březen 2013
- [89] VINZANT, Alisa. Astrocamp School: Chemistry Archives. *What does Liquid Nitrogen do to Balloons* [online]. 13. květen 2015 [vid. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://astrocampschool.org/tag/chemistry/>
- [90] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN 07 8304 Tlakové nádoby na plyny - provozní pravidla*. B.m.: Český normalizační institut. leden 2011
- [91] HOŘČÍK, Jan a Petr SOUKUP. Hybrid.cz. *Čistá výroba vodíku - z vody a obnovitelné energie* [online]. [vid. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/cista-vyroba-vodiku-z-vody-obnovitelne-energie>
- [92] *Steam reforming* [online]. 2017 [vid. 2017-03-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Steam_reforming&oldid=761144858
- [93] ZÜTTEL, Andreas. Hydrogen storage methods. *The Science of Nature*. 2004, **91**(4), 157–172. ISSN 0028-1042.
- [94] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. *ČSN EN 13480-3 Kovová průmyslová potrubí - Část 3: Konstrukce a výpočet*. B.m.: Český normalizační institut. listopad 2013
- [95] *Bolzano | X6CrNi18-10 (1.4301) austenitické* [online]. [vid. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [96] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 4. vydání. Úvaly: Albra - pedagogické nakladatelství, 2008. 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [97] PŘEHLED TEORIE A VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ. *SMĚSI IDEÁLNÍCH PLYNŮ* [online]. [vid. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/teorie/T02-01.htm>

- [98] ŠKORPÍK, Jiří. Proudění plynů a par tryskami. *Transformační technologie* [online]. 2016 [vid. 2017-03-13]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/40.html#menu>
- [99] Type R Thermocouple. *Thermocouple Info* [online]. 2011 [vid. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.thermocoupleinfo.com/type-r-thermocouple.htm>
- [100] BAŠTA, Jiří. *Otopné plochy*. B.m.: Ediční středisko ČVUT, 2001. 328 s. ISBN 80-01-02365-6.
- [101] ARTS, T. a Von Karman Institute for Fluid DYNAMICS. *Measurement Techniques in Fluid Dynamics: An Introduction* [online]. B.m.: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2001. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=G3EnnQEACAAJ>

Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
a	podíl dusíku a kyslíku ve spalovacím vzduchu	–
A	plocha přestupu tepla	m^2
α_τ	součinitel přestupu tepla	$W/(m^2 \cdot K)$
α	přebytek vzduchu	–
β	kritický poměr plynů	–
C_i	objemová koncentrace i -té složky paliva	%
$c_{p,i}$	měrná tepelná kapacita	$J/kg \cdot K$
d_{ekv}	ekvivalentní průměr trysky	m
D_o	vnější průměr trubky	mm
dT	rozdíl teplot mezi dvěma místy	K
dx	vzdálenost mezi dvěma místy	m
ε	emisivita	–
E	vypočtená tloušťka stěny	mm
f	dovolené namáhání materiálu	MPa
HHV	spalné teplo	MJ/m_N^3
inert	součet koncentrací inertních složek plynu	–
φ	rychlostní součinitel trysky	–
κ	adiabatická konstanta	–
k	tepelná vodivost	$W/(m \cdot K)$
l	délkový rozměr	μm
L_d	spodní mez zápalnosti paliva ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem	%
L_h	horní mez zápalnosti paliva ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem	%
LHV	výhřevnost	MJ/m_N^3
m	hmotnost	mg; t
MW_i	molekulární hmotnost i -té molekuly	$kg/kmol$
N	Normální podmínky (101,315 kPa; 0 °C)	–
n^{PH}	počet primárních hlav	–
n^{PO}	počet otvorů v primární hlavě	–
P	tlak	bar; Pa, kPa, atm
p_1	tlak plynu na vstupu do trysky	Pa
p_2	tlak plynu na výstupu z trysky	Pa
p_c	výpočtový přetlak	MPa
pH	vodíkový exponent	–
p_k	kritický tlak	Pa
P_w	výkon	kW, MW
Q_H	přenos tepla	Ws
Q_i	průtok i -té složky paliva	m_N^3/hod
q_x	měrný tepelný tok	W/m^2
R	vnější poloměr vnějšího potrubí	m
r	vnitřní poloměr vnitřního potrubí	m
ρ	hustota	kg/m_N^3
ρ_1	hustota plynu na vstupu do trysky	kg/m_N^3
ρ_2	hustota plynu na výstupu z trysky	kg/m_N^3
$R_{p1,0t}$	minimální smluvní mez kluzu 1% při výpočtové teplotě	MPa

<i>RPS</i>	poměr paliva mezi v primárním a sekundárním stupněm	–
<i>S</i>	Seebeckův koeficient	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
<i>S₁, S₂</i>	Stechiometrický poměr	–
<i>SG</i>	relativní hustota	–
σ	Stefan–Boltzmannova konstanta	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
$\sigma_{\text{P,A,B}}$	rozptyl produktu a proměnných A, B	–
<i>T</i>	čas	ms; hod
<i>T</i>	teplota	$^\circ\text{C}, \text{K}$
<i>T₀</i>	absolutní teplota za normálních podmínek	K
<i>T₂</i>	absolutní teplota plynu na výstupu z trysky	K
<i>T_w</i>	teplota povrchu tělesa	K
<i>U</i>	napětí	mV
<i>v</i>	rychlost proudění	m/s
<i>V_{plyn,N}</i>	průtok plynu za normálních podmínek	$\text{m}_\text{N}^3/\text{hod}$
<i>W</i>	Wobbeho číslo	$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$
<i>X</i>	naměřená koncentrace emisí	ppm
<i>x_i</i>	hmotnostní podíl i-té molekuly	–
<i>XSO</i>	přebytek vzduchu a faktor pro výpočet koncentrace dusíku ve vzduchu	–
<i>Y</i>	přepočtená koncentrace	$\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$
<i>Z</i>	kompresibilitní faktor	–
<i>z</i>	součinitel hodnoty podélného svarového spoje	–
η	viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
3D	Tří rozměrný
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
APH	Hořák se stupňovitým přívodem vzduchu
ATP	Adiabatická teplota plamene
CFD	Computational Fluid Dynamics
ČOV	Čistírna odpadních vod
ČSN	Česká státní norma
ČSN EN	Převzatá Evropská norma
HFL	Higher flammable limit (horní mez zápalnosti)
HiTAC	High Temperature Air Combustion
LFL	Lower flammable limit (dolní mez zápalnosti)
LHV	Lower heating value (výhřevnost)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (kapalná směs propanu a butanu)
LPH	Hořák na nízko-výhřevná paliva
LTO	Lehký topný olej
obj	objemový
OEC	Oxygen Enhanced Combustion (kyslíkem obohacené spalování)
OS	Organická sušina
ppm	parts per million (počet částic na jeden milion)
RAL	Vzorník barev
Sb.	Sbírkový
TTO	Těžký topný olej
ZPH	Hořák se stupňovitým přívodem vzduchu

Chemické sloučeniny

Sumární vzorec	Název
Ar	Argon
C ₂ H ₆	Etan
C ₃ H ₈	Propan
CF ₄	Tetrafluormetan
CN	Radikál dikyanu
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
C _x H _y	Sumární vzorec pro uhlovodíky
Fe	Železo
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý
FeO	Oxid železnatý
H ₂	Vodík
H ₂ O	Voda
H ₂ O	Voda
H ₂ S	Sulfan
HCN	Kyanid
He	Helium
HNO ₂	Kyselina dusitá
HNO ₃	Kyselina dusičná
HO ₂	Radikál peroxidu
CH ₃ Br	Bromotrifluormetan
CH ₄	Metan
i-C ₄ H ₁₀	iso-butan
i-C ₅ H ₁₂	iso-pentan
Mn	Mangan
N ₂	Dusík
N ₂ O	Oxid dusný
N ₂ O ₄ (NO ₂)	Oxid dusičitý
N ₂ O ₅	Oxid dusičný
n-C ₄ H ₁₀	n-butan
n-C ₅ H ₁₂	n-pentan
n-C ₆ H ₁₄	n-hexan
neo-C ₅ H ₁₂	neo-pentan
NH ₃	Čpavek
NO	Oxid dusnatý
NO _x	Sumární vzorec pro oxidy dusíku
O ₂	Kyslík
OH	Hydroxylová skupina
P	Fosfor
Si	Křemík
SO _x	Sumární vzorec pro oxidy síry

Publikace autora

Články v časopise s impakt faktorem

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics. *Energy*, 2014, roč. 2014, č. 75, s. 116–126. ISSN: 0360–5442.

Články ostatní

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Posouzení vlivu vyšší koncentrace kyslíku ve spalovacím vzduchu ($> 21\%$) na charakteristické parametry spalování zemního plynu. In *Sborník CHISA 2013, Plné texty příspěvků*. Praha: ČSCHI, 2013. s. 1–7. ISBN: 978–80–02–02500–9.

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Experimental Investigation of Characteristic Parameters of Combustion of Natural Gas with Oxygen–Enriched Air. In *Abstract Book*. Lund: Congrex Sweden AB/Informationsbolaget Nyberg & Co., 2013. s. 90–90. ISBN: 978–91–637–2150–2.

HUDÁK, I.; BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P. Investigation of oxygen–enhanced combustion method on combustion characteristics in non–premixed gaseous flames. In *Joint Meeting – Franch and Italian Section IFRF and The Combustion Institute*. Napoli: Associazione Sezione Italiana del Combustion Institut, 2014. s. 86–864. ISBN: 978–88–88104–16–4.

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. The influence of oxygen–enhanced combustion methods on NO_x emissions, in– flame temperatures and heat flux distribution. In *Proceedings of 35th International Symposium on Combustion*. San Francisco: 2014.

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Experimental Study of Oxygen–enhanced Combustion on NO_x emission, In– flame Temperatures and Heat Flux Distribution. In *Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. Milan, Italy: Aidic Servizi S.r.l., 2014. s. 787–792. ISBN: 978–88–95608–30–3. ISSN: 2283–9216.

HUDÁK, I.; BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P. Effects of inert gases on NO_x formation in the conventional burner. In *Proceedings of the 7th European Combustion Meeting*. Budapest: 2015. s. 187–188. ISBN: 978–963–12–1257–0.

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Intenzifikace spalovacího procesu vysoce čistým kyslíkem. *All for Power*, 2015, roč. 9, č. 5, s. 92–95. ISSN: 1802–8535.

BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. The influence of oxygen–enhanced combustion methods on NO_x emissions, in– flame temperatures and heat flux distribution. In *Proceedings of the 10th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*. Porto: 2015. s. 1–11. ISBN: 978–972–99309–7–3.

SKRYJA, P.; BĚLOHRADSKÝ, P.; HUDÁK, I.; JUŘENA, T. *Experimental Study on NO_x Formation in Gas– staged Burner. In Proceedings of the 18th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2015). CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milan, Italy: Aidic Servizi S.r.l., 2015. s. 997–1002. ISBN: 978–88–95608–36– 5. ISSN: 2283–9216.*

BRUMMER, V.; JECHA, D.; LEŠTINSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Pilot plant long-term test of particulate matter (PM) removal from air stream emerging from granulated fertilizers production (stationary source). In *Air Pollution XXIII*. Southampton, UK: WIT Press, 2015. s. 419–430. ISBN: 978–1–84564–964–7.

JUŘENA, T.; BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P.; HUDÁK, I. Numerical Modelling of Combustion in 1.5 MW Low- nox Burner. In *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. Milan, Italy: Aidic Servizi, S.r.l., 2016. s. 1261-1266. ISBN: 978-88-95608-42-6. ISSN: 2283-9216.

HUDÁK, I.; BERANOVÁ, D.; SKRYJA, P.; BĚLOHRADSKÝ, P. DEHYDRATAČE ENERGOSÁDROVCE V POLOPROVOZU. In *Recenzovaný sborník příspěvků mezinárodní vědecké konference MMK 2016*. Hradec Králové, Česká republika: MAGNANIMITAS, 2016. s. 1377-1383. ISBN: 978-80-87952-17-7.

BERANOVÁ, D.; HUDÁK, I. Příprava sádry v poloprovozních podmínkách na VUT v Brně. In *Sborník Juniorstav 2017*. 2017. s. 223-223. ISBN: 978-80-214-5473-6.

HUDÁK, I.; BĚLOHRADSKÝ, P.; SKRYJA, P. The effect of inert fuel compounds on flame characteristics. In *Proceedings of the 8th European Combustion Meeting*. Zagreb: 2017. s. 457-462. ISBN: 978-953-59504-1-7.

Patenty

SKRYJA, P., HUDÁK I., BĚLOHRADSKÝ P. a STEHLÍK P.. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, BRNO, CZ. Olejový hořák pro spalování suspenzí kapalného paliva. 2016. CZ. 2016–32331 Užitený vzor. Zapsáno 06.09.2016.

SKRYJA, P., HUDÁK I., BĚLOHRADSKÝ P. a STEHLÍK P.. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, BRNO, CZ. Hořáková hlava na nízkovýhřevná paliva. 2017. CZ. 2017-33405 Užitený vzor. Zapsáno 18.04. 2017.

Přílohy – Technická dokumentace

Označení přílohy	Název	Název dokumentu
P01	Kalibrační protokol průtokoměru na vodík	Kalibracni.protokol.01
P02	Kalibrační protokol průtokoměru na oxid uhličitý	Kalibracni.protokol.02
P03	Kalibrační protokol průtokoměru na dusík	Kalibracni.protokol.03
P04	Výkres sestavy – směšovací stanice	Redukcni.panel.00
P05	Nosná konstrukce	Redukcni.panel.00.01
P06	Držák průtokoměru	Redukcni.panel.00.01.01
P07	Uchycení potrubí 1	Redukcni.panel.00.01.02
P08	Uchycení potrubí 2	Redukcni.panel.00.01.03
P09	Směšovací stanice	Redukcni.panel.00.03
P10	Trubka DN20 450 mm	Redukcni.panel.00.03.01
P11	Trubka DN50 250 mm	Redukcni.panel.00.03.02
P12	Trubka DN50 175 mm	Redukcni.panel.00.03.03
P13	Návrh patentu hořáku – Popis	Navrh.patent.01
P14	Návrh patentu hořáku – Nákresy	Navrh.patent.02
P15	Chyby měření tepelných toků	Chyby.mereni