VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI SPALOVÁNÍ NÍZKO-VÝHŘEVNÝCH PALIV
CHARACTERISTIC PARAMETERS OF COMBUSTION OF LOW CALORIFIC FUELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Matěj Kvapil**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Igor Hudák**
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	**Bc. Matěj Kvapil**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Igor Hudák**
Akademický rok:	2016/17

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

Charakteristické vlastnosti spalování nízko–výhřevných paliv

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jako nízko–výhřevná paliva je možné označit produkty pocházející z různých oblastí průmyslové výroby, kde dochází ke vzniku odpadních plynů (např. generátorový, kychtový či vodní plyn), které mají nízkou výhřevnost. Tyto plyny často obsahují inertní složky, jako jsou dusík nebo oxid uhličitý, které mohou v některých případech tvořit až 70 % z celkového složení směsi. Tlak na snižování ekonomické náročnosti procesu (někdy však také výhodné dotační podmínky) nutí výrobce používat i paliva z alternativních zdrojů jako jsou například bioplynové stanice, nemusí se tedy nutně jednat pouze o odpadní plyny.

Aplikace nízko–výhřevných paliv může být přínosná, nicméně přináší i různá úskalí. Velký obsah inertních plynů obsažených v chudých palivech může způsobit problémy při spalování, zejména může ovlivnit stabilitu plamene. Hořáky jsou většinou navrženy pro ušlechtilá paliva a není pravidlem, že hořák navržený pro spalování středně či vysoce výhřevných paliv, dokáže spalovat paliva nízko–výhřevná. Přítomnost inertních plynů v palivu má však pozitivní vliv na výsledné emise, zejména na oxidy dusíku (NOx).

Cílem práce je seznámit se s vlastnostmi chudých paliv a s jejich využitím. Student by měl uvést základní vztahy popisující spalování plynných paliv a měl by se zaměřit na charakteristiku hořáků a porovnat hořáky na ušlechtilá a chudá paliva. V praktické části bude úkolem studenta provést spalovací zkoušky hořáků s nízko–výhřevným palivem na zkušebně Ústavu procesního inženýrství. V průběhu experimentu budou sledovány emise NOx, CO, teplota spalin, rozložení teplot v horizontální rovině komory, tvar a barva plamene, případně tepelný tok do stěn spalovací komory.

Cíle diplomové práce:

1. Základní charakteristika chudých paliv a hořáků.
2. Přehled oblastí procesního průmyslu, kde jsou chudá paliva využívána.
3. Zásady bezpečné manipulace s vodíkem a inertními plyny.
4. Přehled důležitých vztahů pro výpočty spalovacích procesů.
5. Provedení zkoušek spalování.
6. Vyhodnocení zkoušek spalování.

Seznam doporučené literatury:

BAUKAL, Charles E. The John Zink combustion handbook. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-2337-1.

BAUKAL, Charles E. Industrial burners handbook. Boca Raton, FL. CRC Press, 2004. ISBN 0-849--1386-4.

BASU, Prabir. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 0-12-374988-3.

RYBÍN, Miroslav. Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1978.

KERMES, Vít, SKRYJA, Pavel a Stehlík, Petr. Up to date experimental facility for testing low-NOx burners, Chemical Engineering Transaction, 12, 549-554, 2007.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na spalování nízko-výhřevných plynných paliv. V první části je v práci popsáno zařazení, charakteristika a využití těchto paliv. Následně je věnován prostor teoretické oblasti spalování, a to hlavně emisím a tepelným pochodům. Dále práce pokračuje charakteristikou hořáků a jejich úpravami právě pro nízko-výhřevná paliva. Teoretická část je zakončena bezpečností práce s některými vybranými plyny.

Práce poté přechází do praktického směru a zaměřuje se na laboratorní experiment, který byl součástí této diplomové práce. Praktická část obsahuje popis experimentu, plán měření, výpočet a vyhodnocení emisí, spalného tepla, výhřevnosti, hustoty, teploty v plamenu a tepelných toků.

Experiment byl proveden s palivy o různém složení. Postupným navyšováním přídavku inertních plynů do zemního plynu bylo dosaženo hodnot výhřevnosti nízko-výhřevných plynů. Měření naznačilo, že přídavek měl pozitivní vliv na emise NO_x a CO. Měření teplot v plamenu potvrdilo, že po přidání inertního plynu do ušlechtilého paliva dochází k ochlazení plamene, což způsobuje snížení emisí. Tepelné toky a termická účinnost spalování zůstaly při všech konfiguracích takřka nezměněny.

Klíčová slova: spalování, emise, hořáky, dusík, zemní plyn, nízko-výhřevná paliva.

Abstract

The diploma thesis is focused on the combustion of the low calorific gaseous fuels. The first part is devoted to the characterization and usage of low calorific fuels. Then combustion theory focused mainly on emissions and thermodynamics. Next characterization of burners and their modifications for low calorific value fuels is described. Safe storage and handling of chosen gases is also included in the last chapter of the theoretical part.

Practical part includes the description of the laboratory experiment, which was a part of this thesis. It consists of the experiment description, experimental plan, calculation and evaluation of emissions, high and low heating value, density, flame temperatures and heat flux.

Laboratory experiment was carried out with different fuels. Low calorific fuels were simulated by gradual increase of the concentration of inert gasses in the natural gas. Increased concentration of inert gasses had positive effect on the emissions. Measurement of the flame temperatures confirmed that the decrease of emissions corresponds to the inert gas addition to the noble fuel. Heat flux and thermal efficiency of the combustion was almost identical for each configuration.

Keywords: combustion, emissions, burners, nitrogen, natural gas, low calorific fuels.

Bibliografická citace

KVAPIL, M. Charakteristické vlastnosti spalování nízko-výhřevných paliv. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Igor Hudák.

Prohlášení o původnosti

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a s vedením vedoucího diplomové práce.

v Brně dne: ……..

Bc. Matěj Kvapil

Poděkování

Zde bych se chtěl pozastavit nad tím, kdo mi pomohl k dokončení této práce a během celého studia jak bakalářského, tak magisterského. Rád bych tedy poděkoval hlavně svým rodičům Mgr. Zuzaně Kvapilové a Ing. Jaroslavu Kvapilovi, kteří mi vždy pomáhali při studiu, ať už se jednalo o vědy technické nebo jiné. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Bc. Veronice Kolčářové, která mi byla během studia na vysoké škole vždy oporou. Nakonec bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Igoru Hudákovi za jeho důležité připomínky a vedení.

Obsah

1 ÚVOD 11
1.1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ 11
1.2 ZAMĚŘENÍ PRÁCE 12
2 ZAŘAZENÍ A CHARAKTERISTIKA PALIV 13
2.1 DĚLENÍ A SROVNÁNÍ PALIV 13
2.1.1 Tuhá paliva 13
2.1.2 Kapalná paliva 14
2.1.3 Plynná paliva 14
2.1.4 Srovnání paliv 14
2.2 PLYNNÁ PALIVA 15
2.2.1 Spalitelné a nespalitelné složky 15
2.2.2 Vlastnosti plynných paliv 16
2.2.3 Rozdělení plynných paliv dle výhřevnosti 17
2.3 NÍZKO-VÝHŘEVNÁ PLYNNÁ PALIVA 19
2.3.1 Generátorový plyn 19
2.3.2 Vodík 20
2.3.3 Směsný plyn 21
2.3.4 Vodní plyn 21
2.3.5 Kychtový plyn 22
2.3.6 Dvojplyn 23
2.3.7 Bioplyn 24
3 VYUŽITÍ NÍZKO – VÝHŘEVNÝCH PLYNNÝCH PALIV 26
3.1 SPALOVÁNÍ 26
3.2 VYUŽITÍ VODÍKU 26
3.2.1 Palivové články 27
3.2.2 Rafinérie 28
4 SPALOVACÍ PROCES 29
4.1 TEORIE SPALOVÁNÍ 29
4.1.1 Stechiometrické spalování 29
4.1.2 Spalování s přebytkem vzduchu 29
4.2 TERMOMECHANIKA SPALOVÁNÍ 30
4.2.1 Radiace 30
4.2.2 Konvekce 30
4.2.3 Kondukce 31
4.3 VZNIK NO SPALOVÁNÍM 32
4.3.1 Termický NO 32
4.3.2 Promptní NO 33
4.3.3 Palivový NO 33

4.4 SPALNÉ TEPLO A VÝHŘEVNOST 33
4.5 HUSTOTA PALIVA 34
5 PLYNOVÉ HOŘÁKY 35
5.1 VYUŽITÍ A POPIS 35
5.2 HISTORIE 35
5.3 DĚLENÍ 37
5.4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY HOŘÁKŮ 37
5.5 KONSTRUKCE 38
5.5.1 Ejekční hořáky 38
5.5.2 Hořáky s nuceným přívodem vzduchu 39
5.6 TECHNOLOGIE V OBLASTI HOŘÁKŮ NA NÍZKO-VÝHŘEVNÉ PLYNY 40
5.6.1 Ultra-Clean Low Swirl Combustion (UCLSC) 41
5.6.2 Porézní hořáky 41
5.6.3 Vícestupňové spalování 42
5.6.4 Spalování s katalyzátorem 43
6 BEZPEČNOST PRÁCE S VYBRANÝMI PLYNY 44
6.1 MANIPULACE S LAHVEMI A SVAZKY LAHVÍ 44
6.2 VODÍK 44
6.3 DUSÍK 46
6.4 OXID UHLIČITÝ 46
6.5 OXID UHELNATÝ 46
7 LABORATORNÍ EXPERIMENT 48
7.1 POPIS LABORATOŘE 48
7.2 PLÁN A PRŮBĚH EXPERIMENTU 51
8 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI PLAMENE 53
9 EMISE 57
9.1 MĚŘENÍ 57
9.2 VYHODNOCENÍ 58
10 TEPLOTY V PLAMENU 60
10.1 MĚŘENÍ 60
10.2 VYHODNOCENÍ 60
11 TEPELNÉ TOKY 64
11.1 CHYBOVÁ ANALÝZA 64
11.2 MĚŘENÍ 66
11.2.1 Paliva s přídavkem CO_2 66
11.2.2 Palivo s přídavkem N_2 68
12 ZÁVĚR 71

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 72
14 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 77
15 SEZNAM OBRÁZKŮ 80
16 SEZNAM TABULEK 81
17 OBSAH DVD 82

1 ÚVOD

Emise, ekologie a životní prostředí jsou dnes velmi diskutovaná témata, která s plynoucím časem nabývají na své důležitosti. Již od dob první průmyslové revoluce se vlivy a dopady průmyslových celků na faunu, floru a životní prostředí celkově přehlížely. Období dvou světových válek těmto problémům také nepomohlo, kvůli příliš velká poptávce po výrobě techniky a s tím spojených zdrojů (např. pitná voda, plyn či elektřina). Dnes ve 21. století se musíme dopady, které vyvolala neznalost našich předků, zabývat hlouběji. V roce 2015 proběhla v Paříži klimatická konference. Jednalo se o vůbec první konferenci, na které se zúčastněné strany shodly na snižování dopadů klimatických změn. [1]

Poptávka po teple či elektřině stále vzrůstá a spalování je stále jedním z hlavních zdrojů. Během spalovacího procesu vznikají skleníkové plyny, nebo dokonce jedovaté látky, které nejsou pro životní prostředí příznivé. Spalování lze také využít k řešení problematiky kumulujících se odpadů, což je důležité téma dnešní doby. Přestože má spalování jako takové negativní vliv na životní prostředí, poptávka po energii si žádá tento proces využívat, a je tedy potřeba věnovat pozornost jeho vlivům. Proto se diplomová práce věnuje spalování alternativních nízko-výhřevných paliv, jejichž potenciál nebyl dlouhou dobu plně využit.

1.1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Problematice spalování nízko-výhřevných plynných paliv (**NVPP)** a přidávání inertních plynů do plynných paliv se již věnovalo mnoho vědeckých týmů.

Spalování NVPP pomocí porézního hořáku, kdy plyn mohl vstupovat jak axiálně, tak radiálně, přineslo řadu poznatků. Během spalování byly zaznamenávány teplotní profily, emise CO a stabilita plamene. Výsledek měření značil, že použitím paliva s výhřevností pouhých 1,4 MJ/m^3 lze zlepšit stabilitu plamene. [2]

Další vědecký tým se zaměřil na spalování LPG s přídavkem N_2. Měření se skládalo ze sledování délky plamene, tvorby sazí a emisí NO_x, CO a CO_2. Přidáním N_2 došlo během experimentu ke snížení koncentrace NO_x, ale také k zvýšení koncentrace emisí CO, což značilo nedokonalé spalování. [3]

Zajímavým experimentem bylo zkoumání efektu přídavku vodní páry do plamene, kterému se věnovalo několik vědeckých týmů. Experiment byl napřed simulován numericky a poté proběhlo měření, kde se spaloval zvlášť zemní plyn a vodík. Přídavek vody měl pozitivní vliv (snížení) na emise NO_x, což bylo způsobeno ochlazením a naředěním plamene. [4]

Problematice spalování se ve světě věnuje mnoho lidí a tato oblast i přesto, že má dlouhou historii, se stále rozvíjí a je potřeba vyvíjet lepší technologie a postupy.

1.2 ZAMĚŘENÍ PRÁCE

Práce se zabývá spalováním NVPP a jejich vlastnostmi. NVPP jako takové jsou zdrojem alternativních paliv, neboť jde často o odpadní plyny průmyslových celků. Je důležité tuto oblast lépe zmapovat, protože alternativní zdroje tepla a energie jsou vítány obzvláště v dnešní době. Dále lze NVPP využít ke studii, kde ke klasickému palivu přidáváme inertní plyn, či plyn s nízkou výhřevností za účelem snížení emisí. Je samozřejmě možné dívat se na spalování NVPP z pohledu procesu a využít získané znalosti k rozšíření této oblasti.

Práce je zaměřena, jak již bylo zmíněno, na spalování NVPP a přesněji na jejich vlastnosti, využití, problematiku spalování, a hlavně na praktický experiment. Práce je rozdělena na praktickou a teoretickou část a věnuje se několika následujícím bodům:

- Zařazení a charakteristika nízko-výhřevných plynných paliv
- Využití nízko-výhřevných plynných paliv
- Spalovací procesy (termomechanika spalování, emise)
- Hořáky pro klasické a nízko-výhřevné plyny
- Bezpečnost práce
- Laboratorní experiment
- Zpracování dat z měření
- Vyhodnocení experimentu

Důležitým bodem této práce je seznámení se se spalovacími procesy obecně. Tedy se skutečností, jak tyto děje probíhají a jak je využíváme v praxi. Dále se jedná o praktické znalosti ze spalovacích zkoušek, které slouží k prohloubení znalostí o spalování a získáni povědomí o tom, co je u takového procesu možné a co je na denním pořádku. Dalším důležitým úkolem při praktické činnosti je bezpečnost práce, neboť jde o zcela zásadní znalost, jak při laboratorních zkouškách, tak v provozu. Pro získání odpovědí ohledně jakéhokoliv procesu je nutná práce s měřidly a naměřenými daty, a proto je i této činnosti věnován prostor.

2 ZAŘAZENÍ A CHARAKTERISTIKA PALIV

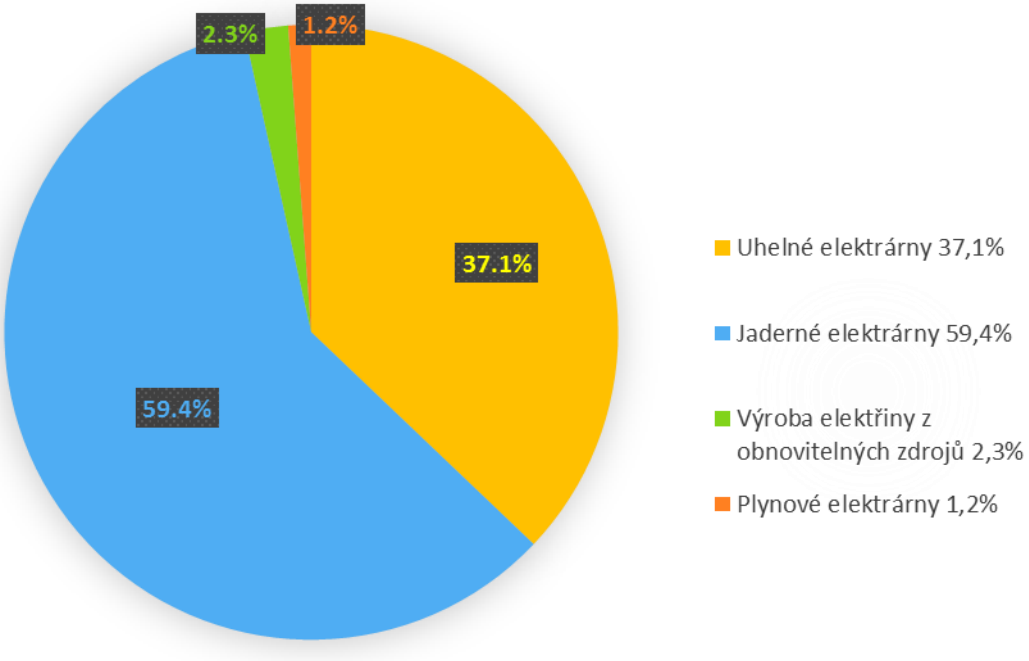
Kapitola věnuje pozornost jednoduchému rozdělení a popisu paliv určených ke spalování. Následně se zabývá vlastnostmi plynných a zařazením NVPP. Důležitá je podkapitola nízko-výhřevná plynná paliva, která obsahuje příklady plynů a jejich parametry.

2.1 DĚLENÍ A SROVNÁNÍ PALIV

Obecně se paliva dělí podle různých parametrů. Nejzákladnější dělení je na paliva tuhá, kapalná a plynná. Jednotlivé podkapitoly obsahují stručný popis těchto skupin se srovnáním dle výhřevnosti v podkapitole 2.1.4.

2.1.1 Tuhá paliva

Jedná se např. o hnědé uhlí, černé uhlí, koks a mnoho dalších. Tuhá paliva zastiňují všechna ostatní a v České republice tvoří tepelné elektrárny po jaderných nejdůležitější zdroj energie. [5]



Obrázek 2.1: Srovnání způsobů výroby elektřiny v ČR [5]

Tuhá paliva jsou tvořena organickou hmotou z odumřelých pravěkých rostlin a mrtvých živočichů, která prošla biologickými procesy (např. hnitím) a následně chemickými procesy (působením teploty a tlaku). Fosilní tuhá paliva se skládají zejména z uhlíku, vodíku a kyslíku, což je způsobeno původem materiálu, ze kterého vznikly.

Další příměsi jsou síra a dusík. Paliva skládající se z jiných prvků než z C, H, O, N s největší pravděpodobností nemají organický původ. [6]

U tuhých paliv jsou důležitými parametry obsah vody a popela v původním palivu, obsah popela v suchém palivu, **spalné teplo**, **výhřevnost**, obsah síry, spékavost, sypná hmotnost, výbušnost a další. [1] Spékavost je důležitá vlastnost uhlí a rozhoduje o tom, zda je uhlí koksovatelné, či ne. Sypná hmotnost (jednotka kg/m^3) je hmotnost (jednotka kg) 1 m^3 volně sypaného paliva. Sypná hmotnost tedy uvažuje volný objem mezi částicemi paliva, a proto je sypná hmotnost paliva menší než klasická hustota, i když má stejnou jednotku. Výbušnost je schopnost paliva rozšířit spalování z libovolného místa na celý objem. [6]

2.1.2 **Kapalná paliva**

Značná část kapalných paliv pochází z ropy, nicméně do této kategorie se řadí také různé oleje (např. palmový, řepkový aj.), či kaly. Složení kapalných paliv se liší podle typu suroviny u rostlinných olejů a kalů, a podle naleziště u ropných produktů. Ropa je směsí různých kapalných uhlovodíků, jako jsou parafíny, aromáty, naftény a asfaltény. Z ropy se dále pomocí destilace vyrábí topný benzín, petroleje, nafta, asfalt a také zemní plyn, který ovšem patří mezi plynná paliva. [6]

U kapalných paliv se sledují parametry jako obsah vody, obsah popela, **spalné teplo**, **výhřevnost**, obsah síry, obsahy uhlovodíků, bod vzplanutí, bod tuhnutí a jiné. [1]Bod vzplanutí je teplota, když se z paliva uvolňuje takové množství par, že při kontaktu s plamenem dojde ke vznícení. Bodem tuhnutí se rozumí nejvyšší teplota, kdy ochlazovaná kapalina ztratí veškerou tekutost a přestane téct. [6]

2.1.3 **Plynná paliva**

Plynná paliva bývají nejčastěji uměle vytvořena (generátorový, vodní či kychtový plyn) nebo je jejich původ přírodní (zemní plyn). Složení je plyn od plynu jiné, záleží na druhu suroviny u plynů umělého původu a na nalezišti u přírodních plynů. [6]

K rozlišení jednotlivých plynů je důležité chemické složení, kde se objevuje vzduch, oxid uhelnatý, uhlovodíky, dusík a další látky. Jako u ostatních paliv je důležitým parametrem **spalné teplo** a **výhřevnost**, spalovací rychlost či záměnnost plynů.[1]

2.1.4 **Srovnání paliv**

Při spalování různých paliv sledujeme nejčastěji výhřevnost, spalné teplo, chemické složení paliva a chemické složení spalin (emise). Pro srovnání tuhých, kapalných a plynných paliv z hlediska výhřevnosti slouží tabulka 2.1.

[1] Spalné teplo, výhřevnost a záměnnost plynů je blíže specifikována v podkapitole 2.2.2.

Tabulka 2.1: Srovnání paliv podle výhřevnosti [7]

Palivo	Výhřevnost [MJ/kg]
Tuhé	
Hnedé uhlí tříděné - Most	17,18
Černé uhlí energetické - Ostrava	29,21
Koks otopový	27,49
Kapalné	
Autobenzín	43,59
Nafta	42,61
Plynné	
Propan-butanový plyn	46,46
Generátorový plyn z koksu	3,09
Vodní plyn z koksu	14,03

Z tabulky 2.1 lze vidět, že u všech druhů paliv lze najít paliva s poměrně vysokou výhřevností, a paliva s velmi nízkou výhřevností jsou obsažena pouze v kategorii plynných paliv. Ve skutečnosti je možné najít paliva s poměrně nízkou výhřevností i u tuhých (drť po výrobě papíru s výhřevností 3,4 MJ/kg) a kapalných (olejové kaly s výhřevností 9,0 MJ/kg). [8]

2.2 PLYNNÁ PALIVA

Termín „plynná paliva“ představuje jakékoli hořlavé palivo, které je v plynném stádiu za normální teploty a tlaku.[2] Plynná paliva jsou obvykle tvořena řadou chemických látek. Patří mezi ně uhlovodíky, vodík, oxid uhelnatý a inertní plyny (dusík, oxid uhličitý a další). Tvoří tak celou škálu chemických látek typických pro plynná paliva. [9]

2.2.1 Spalitelné a nespalitelné složky

Všechna plynná paliva jsou směsí základních složek. Základní složky jsou jednak spalitelné (hořlavé) a jednak nespalitelné, které se hoření neúčastní. Tyto podíly plynných paliv jsou nežádoucí, protože jsou ředící složkou, která snižuje výslednou kalorickou hodnotu celé směsi a jednotlivých složek. Proto se jejich obsah snažíme při výrobě co nejvíce omezit. Na druhou stranu mohou snížit teplotu plamene a potlačit tak vznik termických NO. [10]

Spalitelné složky jsou zastoupeny vodíkem, oxidem uhelnatým a skupinou uhlovodíků.

[2] Normální teplota je 0 °C a normální tak je 101 325 Pa.

Vodík má výborné spalovací vlastnosti (dobrou spalovací rychlost a ostrý plamen) a jeho obsah ve směsích je proto vždy žádoucí. Ve značném procentu je obsažen zejména ve svítiplynu, vodním plynu a dvojplynu. [10]

Oxid uhelnatý je jednou z hlavních složek generátorových plynů. Jeho spalovací vlastnosti jsou vzhledem k vodíku horší a jeho přítomnost v topném plynu vytváří jedovatost. [10]

Uhlovodíky v plynných palivech jsou nasycené, nenasycené i aromatické. Přítomnost jednotlivých uhlovodíků je specifická pro každý druh plynného paliva. [10]

Nespalitelné složky jsou zastoupeny oxidem uhličitým a dusíkem.

Oxid uhličitý je v menší míře obsažen ve svítiplynu, v generátorových plynech a ve větší v bioplynu. Je produktem nedokonalého průběhu redukčních pochodů ($CO_2 + C = CO$). Je specificky těžký a je příčinou korozí. [10]

Dusík je typická složka plynů, nejvíce ho obsahují generátorové plyny, do nichž přechází ze vzduchu. Je přítomen i ve svítiplynu a zemních plynech. Zvyšuje specifickou váhu plynných směsí a kaloricky je ředí. [10]

2.2.2 **Vlastnosti plynných paliv**

Výhřevnost: Teplo uvolněné úplným spálením jednotkového množství plynu stechiometrickým množstvím kyslíku nebo vzduchu za konstantního tlaku a teploty, přičemž všechny produkty spalování ochlazené na výchozí teplotu jsou v plynném stavu. [11]

Spalné teplo: Teplo uvolněné úplným spálením jednotkového množství plynu stechiometrickým množstvím kyslíku nebo vzduchu za konstantního tlaku a teploty, přičemž všechny produkty spalování ochlazené na výchozí teplotu jsou v plynném stavu kromě vody, která při výchozí teplotě zkondenzuje. [11]

Spalovací rychlost: Každé plynné palivo zahřáté na zápalnou teplotu hoří plamenem, který postupuje určitou rychlostí. Tato rychlost dosahuje za určitých podmínek svého maxima – mluvíme potom o maximální spalovací rychlosti. Spalovací rychlost můžeme ovlivnit ubíráním nebo přidáváním vzduchu (kyslíku). Ve všech případech roste rychlost hoření se stoupající teplotou i se zvedajícím se tlakem, protože se zvyšující se teplotou se zrychluje pohyb molekul, s rostoucím tlakem se zmenšují jejich vzdálenosti. [10]

Teplota samovznícení: Představuje hranici mezi pomalou oxidací hořlavé směsi a spalováním s řetězovým průběhem. Stanovit teplotu samovznícení je složité, a proto se raději určuje zápalná teplota. [8]

Zápalná teplota: Je to nejnižší teplota okolí, při které za daných podmínek pro dané palivo dojde ke vznícení při zajištění minimálního teplotního spádu mezi okolím a směsí. [8]

Toxicita: Je zpravidla způsobena oxidem uhelnatým. Otrava lidského organismu vzniká nepříznivým účinkem oxidu uhelnatého na hemoglobin (barvivo červených krvinek). [8]

Záměnnost topných plynů: Záměnné plyny jsou charakterizovány tak, že je lze v plynových spotřebičích bezporuchově spalovat místo plynu původního, a to bez výměny hořáků nebo jejich částí a bez použití přídavných zařízení. Pro vyjádření podmínky zachování stálého tepelného příkonu se využívá tzv. Wobbeho číslo (W). [11]
To je definováno jako:

$$W = \frac{Q_s}{\sqrt{h}} \tag{1}$$

Kde Q_s je spalné teplo [MJ/m^3],
h relativní hustota [-].

Wobbeho číslo lze určit výpočtem nebo měřením na wobbemetrech.

2.2.3 **Rozdělení plynných paliv dle výhřevnosti**

Plynná paliva dělí podle výhřevnosti norma ČSN 38 5502, která už v dnešní době není platná, ale i přesto, že nemá náhradu se na ni řada publikací odkazuje a lze ji tedy pro základní rozdělení dle výhřevnosti využít.

Dělení dle ČSN 38 55 02:

- plyny nízko-výhřevné: výhřevnost do 16,8 MJ/m$_N^3$
- plyny středně výhřevné: výhřevnost od 16,8 MJ/m$_N^3$ do 20 MJ/m$_N^3$
- plyny velmi výhřevné: výhřevnost od 20 MJ/m$_N^3$ do 50 MJ/m$_N^3$
- plyny vysoce výhřevné: výhřevnost nad 80 MJ/m$_N^3$

Tabulka 2.2: Srovnání plynných paliv I. [8]

Palivo	Složení plynu (objem. %)						Spalné teplo	Výhřevnost
	CO	H_2	CH_4	C_nH_m	N_2	CO_2	[MJ/m^3]	
nízko-výhřevné								
generátorový plyn (z koksu)	29,6	1,0	0,2	-	66,2	3,0	4,0	3,9
zemní plyn (reformovaný vzduchem)	13,0	30,0	1,6	-	50,9	4,0	6,1	5,5
středně výhřevné								
svítiplyn (koksárenský)	6,6	47,9	23,1	2,4	16,4	3,4	18,4	16,8
karburovaný vodní plyn	31,0	42,5	11,0	7,0	4,0	4,5	18,4	16,9
velmi výhřevné								
zemní plyn (naftový)	95,5	-	-	-	2,9	1,6	38,0	34,1
vysoce výhřevné								
propan-butanový plyn	-	-	-	100,0	-	-	100,0	92,0

Tabulka 2.3: Srovnání plynných paliv II. [8]

Palivo	Složení spalin (objem. %)					Spalovací teplota [3]
	vlhkých			suchých		
	CO_2	N_2	H_2O	CO_2	N_2	[°C]
nízko-výhřevné						
generátorový plyn (z koksu)	20,5	78,6	0,9	20,7	79,3	1510,0
zemní plyn (reformovaný vzduchem)	9,2	74,3	10,5	11,0	89,0	1670,0
středně výhřevné						
svítiplyn (koksárenský)	8,3	64,0	27,7	11,4	88,6	2130,0
karburovaný vodní plyn	13,0	65,9	21,1	16,5	83,5	2125,0
velmi výhřevné						
zemní plyn (naftový)	9,6	71,6	18,8	11,8	88,2	2030,0
vysoce výhřevné						
propan-butanový plyn	11,4	73,2	15,4	13,5	86,5	2175,0

Z každé kategorie byli vybráni zástupci ke srovnání v tabulkách 2.2 a 2.3. Z těchto dat je patrná drobná odlišnost jednotlivých paliv. Nízko-výhřevná paliva neobsahují, nebo obsahují jen v malém množství, kromě metanu žádné uhlovodíky a jsou z velké části složeny z inertních plynů. Středně výhřevné plyny jsou velmi podobné nízko-výhřevným, ale obsahují více uhlovodíků, či vodíku, což způsobuje zvýšení jejich výhřevnosti. Velmi výhřevné mají vysoký podíl vodíku a drobný podíl uhlovodíků a vysoce výhřevné plyny jsou složeny v podstatě jen z uhlovodíků. Je tedy jasné, že obsah uhlovodíků jde ruku v ruce s výhřevností a uhlovodíky jsou po energetické stránce ke spalování nejvhodnější. Plyny se liší ve spalovací teplotě, která je u nízko-výhřevných paliv nižší než u ostatních,

[3] Uvedené spalovací teploty jsou teplotami adiabatickými (teoretickými).

což může být velmi přínosné pro konstrukci hořáků, neboť teploty 2000 °C [4] dosažené během spalování některých paliv, hořáky velmi namáhají a musíme tedy volit speciální materiály. Při použití takových materiálů samozřejmě roste cena, což je vždy nežádoucí. Toto ovšem není splněno u všech paliv ze skupiny nízko-výhřevných, kde patří například i vodík s výhřevností 12,7 MJ/m^3 a dosahuje spalovacích teplot 2110 °C. [4]

2.3 NÍZKO-VÝHŘEVNÁ PLYNNÁ PALIVA

Podkapitola se zaměřuje na bližší specifikaci jednotlivých plynů, a to generátorového, vodního, kychtového, dvojplynu, bioplynu a vodíku. U většiny z nich je popsána jejich výroba a stejně tak i průměrné chemické složení, které se může lišit v závislosti na vstupních podmínkách.

2.3.1 Generátorový plyn

Kdysi byl generátorový plyn využíván v provozech, jako jsou výrobny skla, porcelánů apod. Tyto průmyslové celky ovšem začaly využívat zemní plyn z distribuční sítě, proto se tento plyn přestal ve velké míře využívat. Většinou se vyrábí zplyňováním tříděného černého nebo hnědého uhlí, koksu či biomasy směsí vzduchu a malého množství vodní páry. Generátorový plyn obsahuje velké množství oxidu uhelnatého, což ho dělá prudce jedovatým. Navíc může obsahovat síru a dehet, to ovšem záleží na výchozí surovině při výrobě. [8]

Tabulka 2.4: Vlastnosti generátorového plynu z černého uhlí [8]

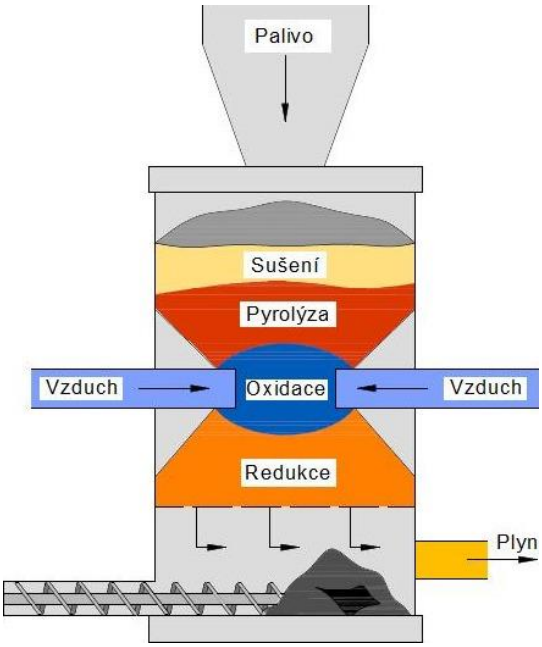
Vlastnosti	Jednotka	Hodnota
CO_2	[%]	3,5
C_nH_m	[%]	0,2
O_2	[%]	0,1
CO	[%]	27
H_2	[%]	12,5
CH_4	[%]	2,7
N_2	[%]	54
Výhřevnost při 20 °C, vlhký	[MJ/m^3]	6,5
Měrná hmotnost čištěného plynu, 20 °C, vlhký	[kg/m^3]	0,97

Výroba:

Zplyňování je průběh několika procesů, při kterých postupně dochází k oxidaci uhlovodíků s vodní párou (nebo se vzduchem) z paliva (nebo zplyňovacího média) a následně k redukci na hořlavé plyny, destilační produkty a minerální zbytky. Ve skutečnosti je zplyňování složitější a má několik fází. [12]

[4] Uvedené spalovací teploty jsou teplotami adiabatickými (teoretickými).

1) Sušení: Ve zplynovači probíhá za částečného spalování paliva sušení, přičemž hlavním cílem je ohřev paliva na teplotu, kdy dojde k vypaření přebytečného množství vody.
2) Pyrolýza: Jedná se o tepelný rozklad paliva na jednodušší látky bez přístupu vzduchu, či jiného oxidačního činidla. Palivo se štěpí na pevné, kapalné i plynné látky. Při teplotách 300 až 500 °C dochází k suché destilaci, při které se palivo štěpí na plynné látky (tzv. prchavá hořlavina) a látky kapalné. Při dalším zvýšení teplot se produkty dále dělí a vznikají látky plynné, a to hlavně vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a metan.
3) Oxidace: Jde o jedinou exotermickou reakci zplyňování, teplo musí být tedy dodáno. Dochází k oxidaci uhlíku, oxidu uhelnatého, vodíku a metanu.
4) Redukce: Pro získání spalitelných složek plynu je potřeba redukovat oxid uhličitý na uhelnatý a vodní páry na vodík. [12]



Obrázek 2.2: Průběh procesů v reaktoru [12]

2.3.2 **Vodík**

Podle normy ČSN 38 55 02 aj. publikací je vodík považován za nízko-výhřevné palivo, které dosahuje výhřevnosti 12,7 MJ/m^3 při 20 °C a atmosférickém tlaku.

Vodík je pokládán za alternativní palivo, která má potenciál časem nahradit paliva získána z těžby ropy. Teoreticky je to možné, neboť výhody spalování vodíku jsou jednoznačné. Vodík je chemický prvek a neobsahuje jiné sloučeniny a produktem spalování vodíku je především vodní pára. Problém ovšem je, jak samotný vodík získat. Existuje několik způsobů, jak vodík vyrobit, mezi 2 nejznámější způsoby patří parní reforming zemního plynu a elektrolýza vody. [11]

Výroba:

- parní reforming zemního plynu: Jedná se o nejlevnější a nejrozšířenější způsob, jak vodík vyrobit a jeho účinnost dosahuje 80 %. Tento proces se skládá ze 2 fází. V první fázi se v reformeru do vodní páry přivádí metan. V druhé fázi se navyšuje množství produkovaného vodíku konverzí oxidu uhelnatého z reformeru a další dodanou vodní párou. Obě fáze jsou popsány rovnicemi (2) a (3). [13]

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (2)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (3)$$

- elektrolýza vody: V tomto procesu jde o štěpení vazby mezi vodíkem a kyslíkem ve vodě. Tento postup potřebuje pouze elektrickou energii a vodu, jako výchozí surovinu. Výstupem elektrolýzy je velmi čistý vodíkový plyn a kyslík. Elektrolýza je tedy velmi jednoduchý a bezemisní způsob, jak vodík vyrobit. Účinnost tohoto procesu se pohybuje v rozmezí 80 až 92 %. Elektrolýza je popsána rovnicí (4). [13]

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (4)$$

Vodík jako palivo je sice velmi čistý a jeho spalováním se neuvolňují emise, ale pro jeho výrobu je zapotřebí výchozích surovin a energie. Vodík a jeho „čistota“ je přímo závislá na čistotě výroby jeho zdrojů energie a surovin. [13]

2.3.3 **Směsný plyn**

Používá se často v hutních provozech a vzniká smísením nízko-výhřevného a velmi-výhřevného plynu, např. smísením vysokopecního nebo generátorového s koksárenským plynem. Výsledné složení a vlastnosti je tedy přímo závislé na výchozích surovinách a obvykle bývá kolem 6,90 MJ/m^3 při 20 °C a atmosférickém tlaku. [8]

2.3.4 **Vodní plyn**

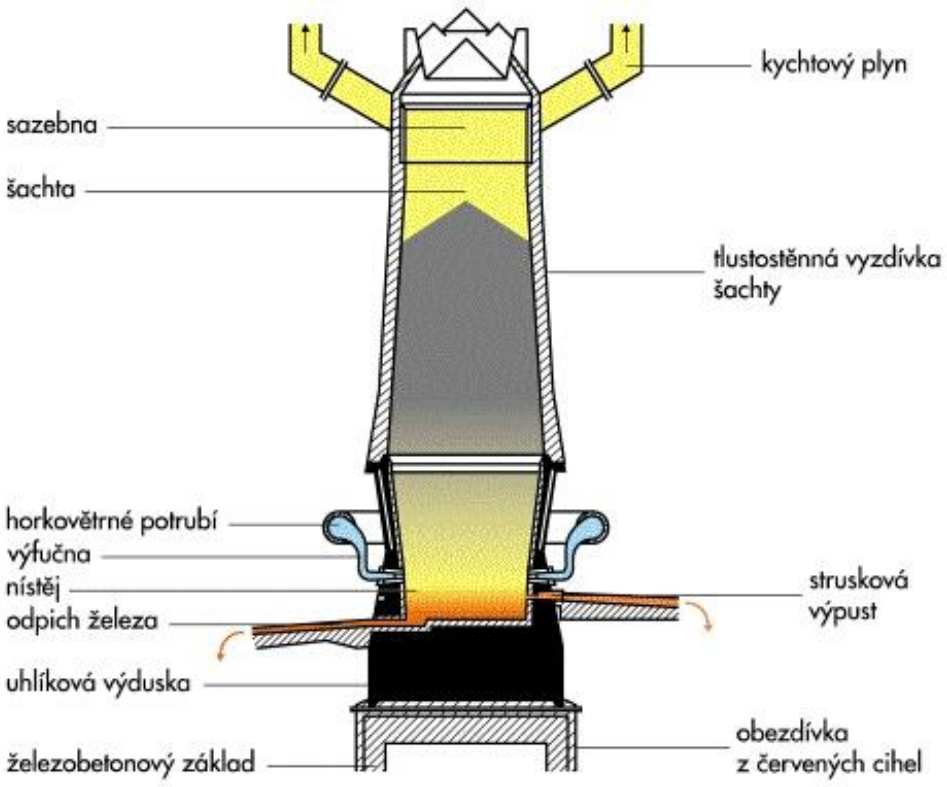
Vodní plyn vzniká rozkladem vodní páry na rozžhaveném palivu (koksu) na vodík a oxid uhelnatý. Vyrábí se cyklicky tak, že se žhavým ložem paliva v generátoru prohání střídavě vzduch a vodní pára. Zprvu tedy vznikne plyn s 15 až 17% obsahem CO a v druhé periodě vzniká vodní plyn. Výhřevnost vodního plynu lze zvýšit vstřikováním oleje do žhavé komory (karburováním vodního plynu). [8]

Tabulka 2.5: Vlastnosti Vodního plynu [8]

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota
CO_2	[%]	5
O_2	[%]	0,3
CO	[%]	40
H_2	[%]	49
CH_4	[%]	0,7
N_2	[%]	5
Výhřevnost při 20 °C, vlhký, čištěný	[MJ/m^3]	9,7
Výhřevnost plynu karburovaného při 20 °C, vlhký	[MJ/m^3]	12,5
Měrná hmotnost	[kg/m^3]	0,64

2.3.5 **Kychtový plyn**

Kychtový plyn známý také jako vysokopecní vzniká při výrobě železa a jeho používání se datuje od r. 1837. Kdysi býval vypouštěn do vzduchu, ale v dnešní době se stal žádaným vedlejším výrobkem při výrobě železa ve vysokých pecích. [14]



Obrázek 2.3: Vysoká pec [15]

Výroba:

Do spodní části vysoké pece se dmýchá výfučnami pod tlakem vzduch předehřátý na 700 – 1000 °C, Tím v peci vzniká oxid uhličitý, který se dále redukuje na oxid uhelnatý.

Vzduch s sebou nese malé množství vody v podobě vodní páry, což způsobuje přítomnost vodíku v plynu. Další složkou je kyanovodík, který vzniká spojením vodíku a dusíku z koksu nebo vzduchu. Když plyn prostupuje vsázkou, tak se ochlazuje a přibývá CO_2. Poslední složkou je velmi malé množství metanu, neboť z koksu se uvolňují zbytky prchavé hořlaviny. Takto vzniklý plyn je vlhký a značně znečištěný, protože při průchodu pecí nasbírá prach vsázky. Z 1 tuny koksu, lze vyrobit až 3900 m^3 plynu, který obsahuje více než polovinu kalorií obsažených v použitém koksu. [14]

Tabulka 2.6: Vlastnosti Kychtového plynu [8]

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota
CO_2	[%]	10,2
CO	[%]	30,2
H_2	[%]	1,9
CH_4	[%]	0,1
N_2	[%]	57,6
Výhřevnost při 20 °C, vlhký	[MJ/m^3]	3,81
Měrná hmotnost čištěného plynu, 20 °C, vlhký	[kg/m^3]	1,16

Vzhledem k vysokému obsahu oxidu uhelnatého je kychtový plyn prudce jedovatý a nebezpečný hlavně tím, že je bez zápachu. Práce s takovým plynem tedy vyžaduje znalost a opatrnost. [14]

2.3.6 **Dvojplyn**

Dvojplyn je směsí karbonizačního a vodního plynu a vyrábí se v generátorech, kde se v horní části palivo odplyňuje za současného vzniku polokoksu, který se pak v dolní části zplyní vodní párou. Vyrábí se z hnědého nebo černého uhlí. [8]

Tabulka 2.7: Vlastnosti Dvojplynu [8]

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota
CO_2	[%]	5,5
C_nH_m	[%]	0,4
O_2	[%]	0,1
CO	[%]	37
H_2	[%]	47
CH_4	[%]	4
N_2	[%]	6
Výhřevnost při 20 °C, vlhký	[MJ/m^3]	11,5
Měrná hmotnost čištěného plynu, 20 °C, vlhký	[kg/m^3]	0,66

2.3.7 Bioplyn

V České republice se nachází přibližně 500 bioplynových stanic. Většinou se nové bioplynové stanice staví poblíž objektů, které produkují biomasu vhodnou k výrobě bioplynu. Výhodou bioplynové stanice je snížení skládkování, využití zbytků z potravinářských řetězců a fakt, že nenarušují krajinu. Nevýhodou je, že se biomasa musí svážet a tím se využívá fosilních paliv v nákladních automobilech. Dále mohou tyto stanice zapáchat a vadit lidem v okolí. [16]

Tabulka 2.8: Vlastnosti Bioplynu [17]

Vlastnosti	Jednotka	BP ze skládky odpadů	Bioplyn (ČOV)	BP (prasečí kejda)
CO_2	[%]	46	38	31
CH_4	[%]	49	61	69
O_2	[%]	3	-	-
CO	[%]	1	-	-
H_2	[%]	1	1	-
H_2S	[mg/m^3]	350	1000	2300
Výhřevnost při 15 °C, vlhký	[MJ/m^3]	16,9	21,1	24

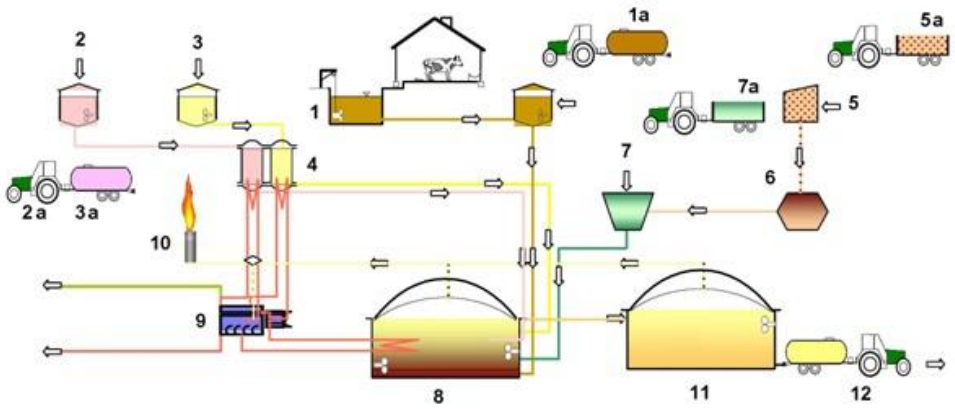
Bioplyn vzniká anaerobní fermentací organických látek. Jeho hlavní složky jsou metan a oxid uhličitý. Lze jej získávat z různých organických odpadů, a to jak rostlinného, tak živočišného původu. Vlastnosti bioplynu se liší podle toho, z jaké suroviny byl vyroben.

Anaerobní fermentace [18]

Jedná se o biochemický proces, který probíhá ve čtyřech základních fázích.

1. Hydrolýza: Pro nastartování této fáze je nutný 50 % podíl vlhkosti. Hydrolytické mikroorganizmy nevyžadují zcela bezkyslíkaté prostředí a postupně rozkládají polymery na jednodušší organické látky (monomery).
2. Acidogeneze: V této fázi dochází k vytvoření zcela bezkyslíkatého prostředí. Tvoří se vodík, oxid uhličitý, kyseliny a alkoholy.
3. Acetogeneze: Acidogenní bakterie transformují vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý.
4. Metanogeneze: Metanogenní acetotrofní bakterie rozkládají hlavně kyselinu octovou na metan a oxid uhličitý.

Po získání bioplynu fermentací ve fermentoru se využívá plyn k výrobě elektrické energie v kogenerační jednotce a tepla pomocí spalování v hořácích. Schéma bioplynové stanice i s popisem jednotlivých stanovišť a procesů je na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Schéma bioplynové stanice [19]

Legenda: *1 – kejda ze stáje, 1a – kejda přivážená z okolních zemědělských podniků, 2 - příjem jatečních odpadů, 3 – příjem kuchyňských odpadů, 4 – tepelná úprava rizikových substrátů 2 a 3, 5 - příjmové místo zrnin, 6 – mechanická úprava zrnin (mačkání, drcení, šrotování), 7 – příjem a úprava zelené biomasy, 8 – fermentor se střešním plynojemem, 9 - kogenerační jednotka, 10 – hořák zbytkového plynu, 11 – zásobní jímka na digestát, 12 – odvoz digestátu jako hnojiva [19]*

Bioplyn se také získává v čistírnách odpadních vod, kde dochází během technologického procesu čištění k produkci bioplynu, který je jímán a následně využit k vytápění reakčních nádrží („vyhnívaček“). V případě přebytku tohoto plynu je možné jej využít k vyhřívání jiných objektů, či k výrobě elektrické energie v kogeneračních jednotkách. [20]

V poslední řadě se bioplyn jímá na skládkách komunálního odpadu, kde může tvořit problém v podobě různých požárů, a proto je důležité, jak z bezpečnostního, tak z ekonomického hlediska, plyn ze skládky odvádět a využívat. Plyn je na skládkách jímán pomocí odběrných sond, kde se dále vede sběrným potrubím a využívá se k výrobě tepla či elektrické energie. Problém nastává, pokud je odběratel od skládky odpadů daleko. Proto je při budování skládky vhodné umisťovat tento objekt poblíž různých zemědělských sušáren, skleníků apod. [20]

3 VYUŽITÍ NÍZKO – VÝHŘEVNÝCH PLYNNÝCH PALIV

Tato kapitola slouží ke shrnutí využití NVPP hlavně v procesním a energetickém průmyslu. Paliva lze z velké části využít k výrobě tepla spalováním, ale i při různých chemických reakcích v chemickém a petrochemickém průmyslu. Vzhledem k tomu, že vodík je palivo svým využitím specifické, tak mu byla věnována zvláštní kapitola.

3.1 SPALOVÁNÍ

Většinou se hovoří o nízko-výhřevných plynech, jako o topných plynech, a tím je tedy myšleno, že tato paliva jsou určena ke spálení a získání tepelné energie případně energie elektrické. Tato paliva se spalují buď v hořákovém plamenu, ve spalovací turbíně či spalovacím motoru automobilů.

- **Spalovací motory**

Na automobilovém průmyslu je postavena většina ostatních odvětví průmyslu a vlastně i celá ekonomika zemí světa, a ani tomuto odvětví nízko-výhřevné plyny neunikly. Ve spalovacích motorech lze některé využít, a to hlavně vodík a bioplyn.

- **Spalování hořákem**

V hořácích lze spalovat v podstatě jakékoli palivo, pokud je takovému palivu hořák uzpůsoben a hoření je ustálené a bezpečné. Lze je použít k vytápění průmyslových tepelných zařízení a pecí.

Hořáky se využívají v energetickém, procesním a spotřebním průmyslu. Bližšímu popisu hořáků je věnovaná samostatná kapitola 5.

- **Spalování turbínou**

Ve své podstatě jsou plynové turbíny motorem, který využívá tepelnou energii ze spalovacího procesu, míchání a spalování paliva se vzduchem, k vytvoření mechanické energie na hřídeli. Plynové turbíny se využívají v průmyslových aplikacích a také v letectví. Většinou jsou tyto stroje projektovány pro práci s určitým plynem, nejčastěji zemním. Nicméně paliva s nízkou výhřevností (kychtový plyn, bioplyn aj.) mohou být v blízkosti elektráren a jiných provozů, a proto je vhodné je využít. V dnešní době se dříve přehlížena odpadní paliva začínají v turbínách využívat kvůli svým ekonomickým výhodám. [21]

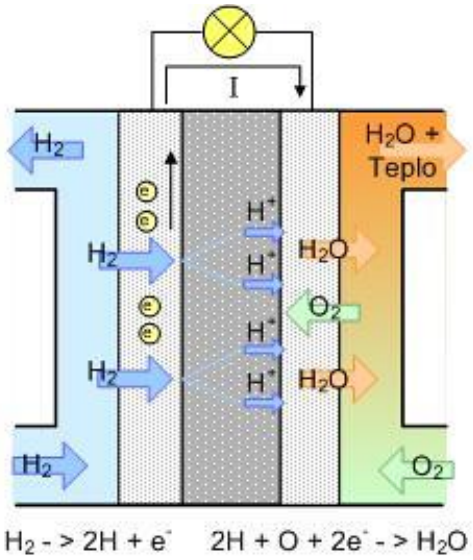
3.2 VYUŽITÍ VODÍKU

Vodík se využívá různými způsoby. Chemickou energii lze uvolnit spalováním ve spalovacím motoru, hořáku či plynové turbíně. Dále je možné využít vodík k přeměně chemické energie na elektrickou formou palivových článků a posledním využitím jsou chemické a metalurgické provozy, jako rafinérie, kde se využívá vodík, jako redukční činidlo. Vodík se dále používá pro výrobu metanolu během parního reformování a amoniaku, který se využívá k výrobě hnojiv, chladiv, či jako součást čistících prostředků.

Velmi zajímavým využitím je zařízení Tokamak, které využívá vodík k napodobení reakcí na slunci a získání tepelné energie pomocí jaderné fúze. [22]

3.2.1 **Palivové články**

Palivové články jsou zařízení, které elektrochemickou reakcí přeměňují chemickou energii na energii elektrickou. Palivové články dosahují účinnosti až 60 % v laboratorních podmínkách a v reálném využití 35-50 %. Poměrně velká účinnost je způsobena přímou přeměnou chemické energie na elektrickou bez mezistupňů přeměny jako u konvenčních způsobů získání elektrické energie. [23]



Obrázek 3.1: Schéma membránového palivového článku [23]

Princip palivového článku lze nejsnadněji vysvětlit na palivovém článku s polymerní membránou, který je na obrázku 3.1. Článek je složen ze dvou elektrod, na jejichž povrchu je slabá vrstva uhlíku, která obsahuje malé množství platiny. Obě elektrody jsou odděleny tenkou polymerní membránou, která propouští jen kladně nabité ionty (protony). Vodík je přiváděn na anodu, kde na vrstvě platiny dochází k jeho rozkladu na elektrony a protony. Protony putují skrze membránu a elektrony jsou nuceny procházet externím okruhem a konají tedy požadovanou práci. Na katodě vzniká sloučením 2 protonů vodíku a kyslíku voda, která je obvykle v podobě páry. [23]

3.2.2 **Rafinérie**

Vodík se v rafinériích používá v různých procesech. [24]

- konverze těžkých ropných uhlovodíků na lehké – hydrokrakování
- odstranění heterosloučenin a kovů – hydrogenační rafinace
- strukturní přeměna uhlovodíků – dearomatizace
- kontrola tvorby koksu na katalyzátorech
- kontrola tepelného průběhu reakcí
- při regeneraci katalyzátoru
- jako palivo

4 SPALOVACÍ PROCES

Vzhledem k složitosti procesu spalování bylo potřeba získat teoretické znalosti z této oblasti procesního inženýrství. V této kapitole je teoretický základ pro laboratorní experiment a následné vyhodnocení dat.

4.1 TEORIE SPALOVÁNÍ

Spalovací proces je popsán rovnicí (5), což je naprosto obecná rovnice pro různá paliva. Oxidační činidlo je nejčastěji zastoupeno vzduchem. Ostatními prvky mohou být inertní plyny, jako např. dusík. [25]

$$Palivo + oxidační\ činidlo \rightarrow\ H_2O + ostatní\ prvky + teplo \tag{5}$$

4.1.1 Stechiometrické spalování

Jedná se o klasické spalování s přísunem vzduchu z ovzduší, kde je obsaženo přibližně 21 % O_2. Jednoduše se dá tato reakce popsat rovnicí (6), což je rovnice spalování metanu. Pokud budeme chtít uvažovat jako oxidační činidlo vzduch, tak lze tento děj popsat rovnicí (7), kde je zahrnut i dusík, který je ve vzduchu ve velké míře. Pro vyčíslení rovnice je potřeba uvažovat, že potřebujeme 2 moly kyslíku, aby reakce proběhla stejně jako v rovnici (6). Pokud používáme vzduch o objemové koncentraci kyslíku 21 %, tak po vyčíslení dostaneme rovnici (8). V rovnici (8) se objevuje hodnota 9,524, kterou lze získat pomocí vyčíslení. Na 1 mol metanu budou potřeba 2 moly kyslíku, podělením 2 molů kyslíku koncentrací 0,21 kyslíku ve vzduchu je hodnota 9,524 nalezena. Takto vyčíslená rovnice nám říká, že při stechiometrickém spalování je potřeba na 1 mol metanu přibližně 10 molů vzduchu. [25]

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow\ CO_2 + 2H_2O + teplo \tag{6}$$

$$CH_4 + vzduch(O_2 + N_2) \rightarrow\ CO_2 + 2H_2O + N_2 + teplo \tag{7}$$

$$CH_4 + 9{,}524 vzduchu(0{,}21O_2 + 0{,}79N_2) \rightarrow\ CO_2 + 2H_2O + 7{,}524N_2 + teplo \tag{8}$$

4.1.2 Spalování s přebytkem vzduchu

Využití přebytku vzduchu během spalování nese řadu výhod, jako je snížení emisí, vyšší účinnost zařízení a lepší stabilita plamene. Pro popis reakce lze použít obecnou rovnici (9). Pokud využijeme jako palivo metan a přebytek vzduchu bude 15 %, tak obdržíme rovnici (10). [25]

$$C_xH_y + (1 + XSO)\left(x + \frac{y}{4}\right)(0_2 + aN_2) \rightarrow xCO_2 + \left(\frac{y}{2}\right)H_2O + XSOO_2 + \left(x + \frac{y}{4}\right)(1 + XSO)aN_2 + teplo \quad (9)$$

XSO je přebytek vzduchu, a= 3,78 (počet molů dusíku na 1 mol kyslíku)

$$CH_4 + 2{,}30_2 + 8{,}69N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 0{,}150_2 + 8{,}69N_2 + teplo \quad (10)$$

4.2 TERMOMECHANIKA SPALOVÁNÍ

Tepelný tok vyvolaný spalováním je mezi plamenem a spalovací komorou ve směru od plamene ke stěnám komory. Tepelný tok je závislý na rozdílu teplot plamene a stěn komory a může být vyvolán třemi mechanizmy, což jsou radiace, konvekce (přestup tepla) a kondukce (vedení tepla). Ve většině případů je přenos tepla tvořen kombinací více mechanizmů.

4.2.1 Radiace

Kvůli své závislosti na teplotě vyjádřené rovnicí (11) je radiace hlavním mechanizmem přenosu tepla během spalování. Během hoření vznikají molekuly CO_2 a H_2O, což jsou účinné zářiče a z velké části se účastní přenosu tepla radiací. Přenos tepla radiací popisuje Stefan-Boltzmannův zákon vyjádřený rovnicí (11). [26] [27]

$$\dot{Q} = \sigma \cdot S \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (11)$$

Kde $\dot{Q}$ je tepelný tok [W],
ε emisivita (nabývá hodnot 0 až 1) [-],
σ Stefan-Boltzmannova konstanta (σ = 5,6704·10^{-8}) [W/(m^2·K^4)],
S povrch stěny [m^2],
T teplota [K].

4.2.2 Konvekce

Jedná se o přenos tepla vyvolaný přemisťováním částic hmoty (prouděním), nejčastěji u povrchu stěny. Přenos tepla u povrchu stěny je poměrně těžko popsatelný, neboť zde dochází z části ke kondukci, a pokud má tekutina určitou hybnost, je přenos ovlivněn hydromechanickými ději. Změna teploty konvekcí při proudění probíhá skrze velmi tenkou vrstvu tekutiny. Konvekce je závislá na součiniteli přestupu tepla a je popsána rovnicí (12). [27]

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot (T - T_w) \tag{12}$$

Kde $\dot{Q}$ je tepelný tok [W],
S povrch stěny [m^2],
α součinitel přestupu tepla [$W/(m^2 \cdot K)$],
T teplota tekutiny [K],
T_w teplota povrchu stěny [K].

4.2.3 **Kondukce**

Kondukce či vedení tepla je nejběžnější mechanizmus, který probíhá mezi 2 místy rozdílných teplot na jednom tělese. Pokud na tělese vzniknou 2 místa s různou teplotou, tak se teplo šíří podle druhého zákona termodynamiky, který říká, že teplo samo o sobě přechází z teploty vyšší na teplotu nižší. Množství přeneseného tepla za jednotku času je označeno jako tepelný tok. Kondukci lze popsat pomocí rovnice (13). [27]

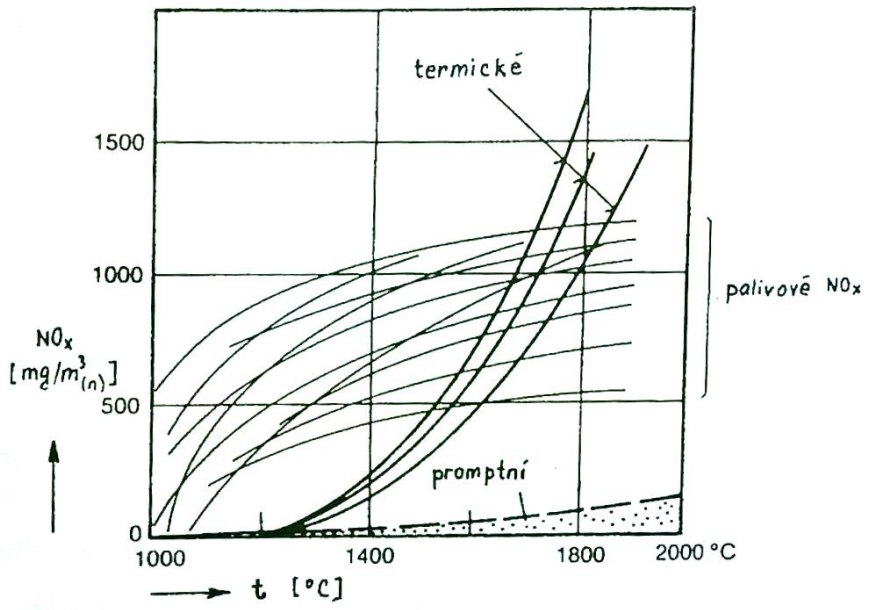
$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \tag{13}$$

Kde $\dot{q}$ je měrný tepelný tok [W/m^2],
λ tepelná vodivost [W/(m·K)],
dT rozdíl teplot mezi dvěma místy [K],
dx vzdálenost mezi dvěma místy [m].

4.3 VZNIK NO SPALOVÁNÍM

Oxid dusnatý vzniká oxidací dusíku z paliva a vzduchu jako vedlejší produkt spalování. Množství NO je malé, ale není zanedbatelné. Oxid dusnatý může způsobovat např. astmatické problémy, a proto je potřeba jej regulovat. Momentálně jsou známé tři mechanizmy vzniku: vznik termického NO, promptního (okamžitého) NO a palivového NO. [25]

Obrázek 4.1 popisuje závislost teploty na vzniku NO_x.



Obrázek 4.1: Vznik NO v závislosti na teplotě [28]

4.3.1 Termický NO

Tento druh oxidu dusnatého je ovlivněn hlavně teplotou, což popisuje obrázek 4.1, kde od teploty přibližně 1300 °C dochází k exponenciálnímu nárůstu množství termických NO. Mechanizmus vzniku termického NO se skládá z několika kroků, které lze zjednodušit na rovnice (14), (15) a (16). [25]

$$N + O_2 = NO + O \tag{14}$$

$$O + N_2 = NO + N \tag{15}$$

Obě reakce probíhají za velmi vysokých teplot, kterých ovšem průmyslové spalování dosahuje, a jsou velmi citlivé na přebytek O_2. Rovnice (15) popisuje rozpad molekuly dusíku při reakci s kyslíkem na atom dusíku a molekulu oxidu dusnatého. Takto osamocený dusík ovšem opět reaguje s kyslíkem podle rovnice (14) a vzniká více molekul NO.

Molekula kyslíku (O_2) má dvojnou vazbu (O=O) a molekula dusíku (N_2) vazbu trojnou (N ≡ N). Proto je jednodušší rozbít vazbu molekuly kyslíku podle rovnice (14). [25] [28]

$$N + OH = NO + H \tag{16}$$

Rovnice (16) nemá velký vliv na výslednou koncentraci NO při stechiometrickém spalování, či při spalování s přebytkem vzduchu. Nicméně při přebytku paliva se začne projevovat a oxidy dusnaté vznikají ve větším množství než v případě spalování stechiometrického, či s přebytkem vzduchu. Rovnice (16) tvoří společně s rovnicemi (14) a (15) tzv. rozšířený Zeldovičův mechanizmus. [28]

4.3.2 **Promptní NO**

Vzniká poměrně rychlou reakcí (okamžitý NO) mezi dusíkem, kyslíkem a uhlovodíkovými radikály. Vznik promptního NO je popsán rovnicí (17), kterou definoval C.P. Fenimore. [25]

$$CH_4 + O_2 + N_2 -> NO, NO_2, CO_2, H_2O \tag{17}$$

Mechanizmus vzniku je ovšem mnohem komplikovanější a skládá se ze stovek reakcí. Promptní NO je tvořeno na okraji plamene a závisí na přebytku vzduchu a teplotě. Tento mechanizmus je ve většině spalovacích zařízeních zanedbatelný, neboť vzniká ve větších koncentracích až od 2000 °C. [25] [28]

4.3.3 **Palivový NO**

Vzniká přímou oxidací dusíku, který je chemicky vázán na spalované palivo. Tuto reakci lze obecně popsat rovnicí (18).

$$R_xN + O_2 -> NO, NO_2, CO_2, H_2O, \text{ostatní sloučeniny} \tag{18}$$

Ve skutečnosti je však reakce složitější a obsahuje mnoho mezikroků. Palivový NO není pro většinu plynných paliv jako je zemní plyn, propan aj. příliš důležitý, neboť neobsahují velké množství chemicky vázaného dusíku. Ovšem paliva jako oleje, uhlí, či kaly obsahují velké množství dusíku a koncentrace palivového NO může způsobovat problémy.

4.4 SPALNÉ TEPLO A VÝHŘEVNOST

Při výpočtu výhřevnosti a spalného tepla se daný plyn uvažoval jako ideální a rovnice popisující výpočet je tedy zvolena pro ideální plyn.

Rovnice (19) slouží k výpočtu spalného tepla (výhřevnosti) paliva na objemovém základě pro ideální plyn. [29]

$$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{j=1}^{N} x_j \, \tilde{H}_j^0[t_1, V(t_2, p_2)] \tag{19}$$

Kde $\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)]$ je ideální spalné teplo (výhřevnost) směsi na objemovém základě [MJ/m_N^3],
x_j objemová koncentrace j-té složky [-],
$\tilde{H}_j^0[t_1, V(t_2, p_2)]$ ideální spalné teplo (výhřevnost) j-té složky směsi [MJ/m_N^3].

4.5 HUSTOTA PALIVA

Při výpočtu hustoty paliva se daný plyn uvažoval jako ideální a rovnice popisující výpočet je tedy zvolena pro ideální plyn.

Rovnice (20) slouží k výpočtu hustoty paliva ideálního plynu. [29]

$$\rho^0(t, p) = \left(\frac{p}{R \cdot T}\right) \sum_{j=1}^{N} x_j \cdot M_j \tag{20}$$

Kde $\rho^0(t, p)$ je hustota ideálního plynu [kg/m^3],
x_j molární plynová konstanta (8,314510 J.mol^{-1}.K^{-1}),
$T_2 (= t_2 + 273{,}15)$ absolutní teplota v Kelvinech [K].

5 PLYNOVÉ HOŘÁKY

Tato kapitola obsahuje historický vývoj plynových hořáků a poukazuje na jejich široké využití, jak v domácnosti, tak v průmyslu. Jako další je zde uvedeno základní rozdělení a charakteristické parametry. Práce také popisuje různé konstrukční uspořádání a v poslední podkapitole je uvedeno několik technologií a metod, které se využívají při spalování NVPP a pro konstrukci hořáků.

5.1 VYUŽITÍ A POPIS

Hořák je zařízení, které slouží ke smísení vzduchu (kyslíku) s palivem, za cílem podání směsi k výstupnímu otvoru a uvolnění chemicky vázané energie paliva na energii tepelnou. [30]
Hořáky se využívají v řadě průmyslových oblastí, a to [11]:

a) **Domácí a komunální spotřebiče**
   - domácí (plynové sporáky, kotle)
   - restaurace (plynové varné kotle, smažící pánve)
   - zdravotní zařízení (laboratorní kahany, plynové pračky, žehlící stroje)
   - rekreace (kempingové vařiče, opalovací hořáky, pájecí soupravy)

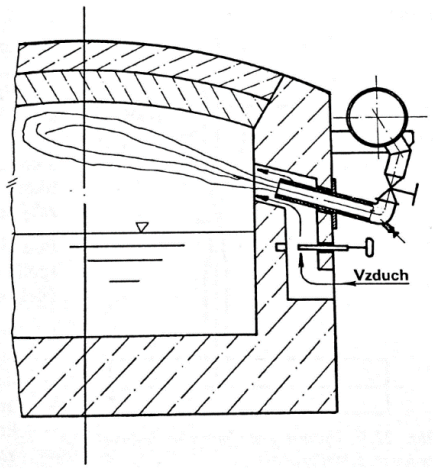
b) **Průmyslové spotřebiče**
   - strojírenství a hutnictví (pece ohřívací, tavící, pro tepelné zpracování kovů)
   - keramický průmysl (pece pro výpal kameniny, dlaždic, izolátorů)
   - sklářský průmysl (pece tavící, chladící, stroje na výrobu brýlových skel)
   - stavebnictví (pece pro výrobu vápna, cementu, cihel)
   - chemický průmysl (fluidní sušárny, odparky, ohřevy chemických lázní)
   - potravinářský průmysl (pečení chleba, varny piva, pražírny oříšků a kávy)
   - zemědělství (sušárny obilí, chmele, ovoce, zeleniny, vytápění skleníků)

Z tohoto seznamu využití lze vidět, že hořáky našly využití v téměř každém odvětví průmyslu. Vytápění a využití tepla je tedy zcela zásadní a tato problematika je neustále aktuální. Hořáky stále prochází vývojem a dochází k jejich optimalizaci, aby mohly spalovat i různá alternativní paliva a aby splňovaly platné emisní požadavky.

5.2 HISTORIE

Mezi první plynové hořáky, které byly využívány v mnoha spotřebičích patří Bunsenův hořák, sestrojen Wilhelmem Robertem Bunsenem v 19. století. Jedná se o velmi jednoduchou konstrukci, kde je vzduch je nasáván ejekčním účinkem plynu, vytékajícího z trysky. Tento typ se dodnes používá u plynových sporáků, ohřívačů vody, či laboratorních kahanů. Pro technologické ohřevy ve sklářském, hutním či keramickém průmyslu se

nejčastěji používal surový generátorový plyn, a to až do r. 1996, kdy byl nahrazen zemním plynem. Hořáky pro spalování generátorového plynu byly nedokonalé. Jednalo se o trubku opatřenou uzávěrem, která byla namířena do pece. Spalovací vzduch byl předehříván v regenerátorech a nasáván tahem komína do plamene. Hořák sloužící ke spalování generátorového plynu je na obrázku 5.1. [11]



Obrázek 5.1: Hořák pro spalování generátorového plynu [11]

První blokové hořáky pro otop kotlů se u nás začaly vyrábět v šedesátých letech dvacátého století. Jako hlavní plyn se v té době využíval svítiplyn, a to jak v průmyslu, tak pro běžné spotřebitele v domácnosti. Vzhledem k tomu, že se k nám během sedmdesátých let začal dovážet zemní plyn, tak se věnovala pozornost vývoji hořáku pro spalování právě zemního plynu. Snaha využít osvědčené hořáky dříve spalující svítiplyn pro spalování zemního plynu přinesla řadu problémů, a to hlavně u kuchyňských sporáků. Pro průmyslové aplikace se hořáky na svítiplyn při spalování zemního plynu také nedaly použít a musely být upraveny. Celkově se, jak většina průmyslu, tak běžné kuchyňské spotřebiče přesunuly k využití zemního plynu, jakožto hlavního zdroje pro spalování. V dnešní době se v České republice využívá zemní plyn, směsi propan-butanu, propan, bioplyn, skládkové plyny a kalové plyny. [11]

5.3 DĚLENÍ

Hořáky se dělí podle různých kritérií, která jsou uvedena zde. [11]

Podle oblasti použití:

- Speciální hořáky
- Univerzální zařízení, která se dají připevnit na většinu pecí

Podle způsobu přivádění spalovacího vzduchu:

- S nuceným přívodem vzduchu (vzduch je přiváděn ventilátorem)
- Ejekční (vzduch je přiváděn ejekčním účinkem paliva)
  - Atmosférické
  - Injektorové

Podle přetlaku:

- Vysokotlaké (více než 300 kPa)
- Středotlaké (od 5 do 300 kPa)
- Nízkotlaké (do 5 kPa)

Podle výhřevnosti paliva:

- Vysoce-výhřevné hořáky (výhřevnost od 20 MJ/m_N^3)
- Středně-výhřevné hořáky (výhřevnost od 16,8 do 20 MJ/m_N^3)
- Nízko-výhřevné hořáky (výhřevnost do 16,8 MJ/m_N^3)

5.4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY HOŘÁKŮ

Přetlak plynu u spalovacího vzduchu před hořákem

K překonání odporu při proudění plynu a spalovacího vzduchu hořákem a k získání potřebných výtokových rychlostí je nutné plynné palivo a vzduch přivést do hořáku s určitým přetlakem. Hořáky jsou konstruovány tak, aby jmenovitý přetlak plynu byl menší než přetlak plynu v rozvodném potrubí. Tím je plyn z potrubí vtažen do hořáku a má tah. [11]

Výkon hořáku

Je to množství tepla, které hořák vyvine spálením paliva za jednotku času. [11]

$$P_H = \frac{V_{ph} \cdot Q_n}{3600} \tag{21}$$

Kde P_H je výkon hořáku [kW],
V_{ph} množství paliva [m^3/h],
Q_n výhřevnost paliva [kJ/m^3].

Spalovací poměr

Jedná se o poměr spalovacího vzduchu $\mathbf{V_{vh}}$ a plynného paliva $\mathbf{V_{ph}}$ přivedeného do hořáku. V průmyslu se využívá spalování s přebytkem vzduchu, které je blíže popsáno v podkapitole 4.1.2. [11]

$$S = \frac{V_{vh}}{V_{ph}} \tag{22}$$

Kde S je spalovací poměr [-],
V_{vh} množství spalovacího vzduchu [m^3/h],
V_{ph} množství paliva [m^3/h].

Hluk

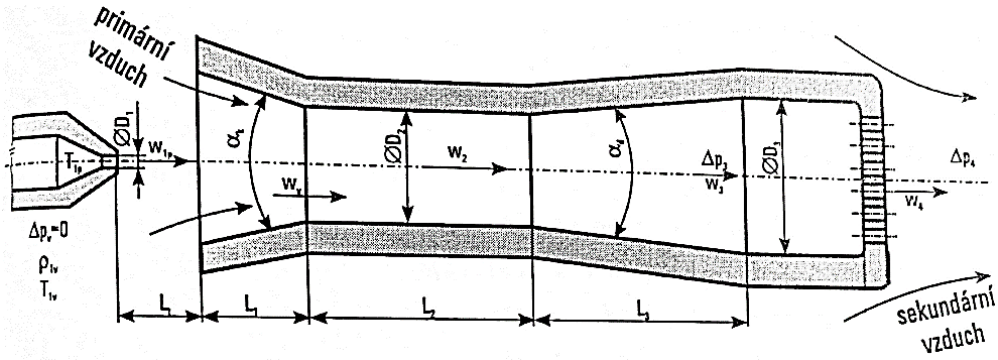
Během spalování plynu v hořácích vzniká hluk, který je způsoben prouděním plyn a vzduchu hořákem a prouděním spalin spalinovým potrubím. Při posuzování hluku hořáku tedy nezáleží jen na samotném zdroji hluku, kterým je hořák, ale na celém spotřebiči, což je většinou pec. Nejvyšší dovolená hladina zvuku ve vzdálenosti 1 m od hořáku a ve výšce 1,5 m je 85 dB. [11]

5.5 KONSTRUKCE

V této podkapitole jsou jednoduchá schémata a konstrukční řešení hořáků s nuceným přívodem vzduchu, ejekčních a blokových.

5.5.1 Ejekční hořáky

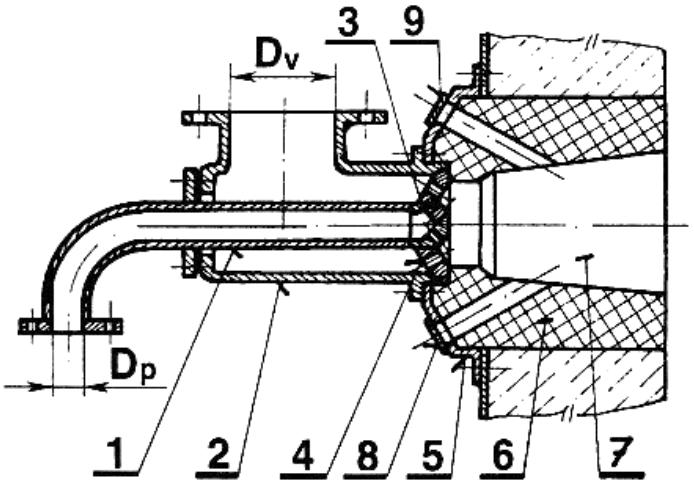
Princip a konstrukci lze vidět na obrázku 5.2, kde jde vidět, jakým způsobem si hořák „bere“ spalovací vzduch. Plynné palivo s přetlakem vytéká z trysky a vytváří ve směšovači podtlak. Spalovací vzduch je vlivem tohoto podtlaku nasáván z okolí do směšovače. [11]



Obrázek 5.2: Schéma ejekčního hořáku [11]

5.5.2 **Hořáky s nuceným přívodem vzduchu**

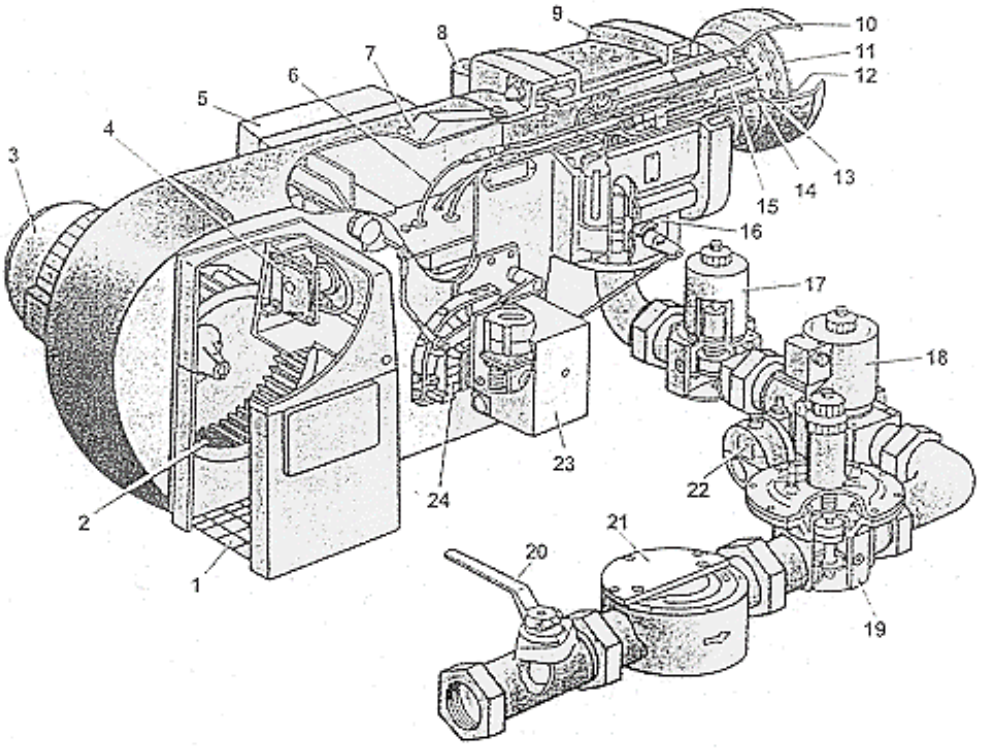
Spalovací vzduch je do hořáku přiváděn studený nebo předehřátý. Na obrázku 5.3 je schéma vířivého hořáku, který patří mezi hořáky s nuceným přívodem vzduchu. Plynné palivo je do hořáku přivedeno plynovým potrubím (pozice 1), které je zakončené plynovou tryskou (pozice 3) s velkým počtem otvorů. Spalovací vzduch je přiveden potrubím (pozice 2) k přírubě hořáku, odkud prochází tělem hořáku až ke vzduchové trysce (pozice 4), která má dvě řady otvorů. Spalovací vzduch proudí tělesem hořáku rychlostí přibližně 6 m/s a vstupuje do spalovacího kanálu rychlostí až 60 m/s. [11]



Obrázek 5.3: Schéma vířivého hořáku [31]

Legenda: *1 – plynové potrubí, 2 – potrubí spalovacího vzduchu, 3 – plynová tryska, 4 –vzduchová tryska, 5 – hořáková deska, 6 – tvarovka, 7 – spalovací kanál, 8 – zapalovací otvor, 9 – pozorovací otvor* [31]

Na obrázku 5.4 je schéma blokového hořáku, který také patří k hořákům s nuceným přívodem vzduchu. Jeho konstrukce je od ostatních odlišná tím, že jeho tělo obsahuje ventilátor (pozice 2). Dále lze na tomto schématu vidět řadu armatur a dalších prvků, které jsou nezbytné k dobrému chodu, bezpečnosti a ovladatelnosti hořáku.



Obrázek 5.4: Schéma blokového hořáku [31]

Legenda: *1 – přívod vzduchu, 2 – ventilátor, 3 – el. motor, 4 – vzduchový termostat, 5 – skříň automatiky hořáku, 6 – kabel zapalovací elektrody, 7 – pozorovací otvor, 8 – příruba hlídače plamene, 9 – příruba hořáku, 10 – ústí hořáku, 11 – stabilizátor plamene, 12 – hlídací elektroda, 13 – plynová tryska, 14 – směšovač, 15 – zapalovací elektroda, 16 – plynová regulační klapka, 17 a 18 – plynový magnetický ventil, 19 – regulátor tlaku plynu, 20 – uzávěr plynu, 21 – plynový filtr, 22 – plynový termostat, 23 – pohon regulačních klapek, 24 – ústrojí pro seřizování spalovacího poměru [31]*

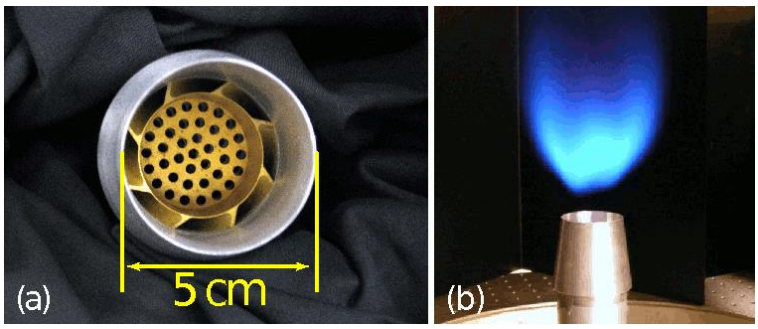
5.6 TECHNOLOGIE V OBLASTI HOŘÁKŮ NA NÍZKO-VÝHŘEVNÉ PLYNY

Nízko-výhřevná paliva hoří pomaleji a při nižších teplotách. Proto je nutné představit konstrukční a technologické úpravy. Tlak paliva je snížen tak, aby dávkovací rychlost odpovídala spalovací rychlosti. Další úpravy musí zohlednit množství vlhkosti, které způsobuje kondenzaci, a tím pádem korozi a zahlcení důležitých součástí a systémů. Dobře navržený systém obsahuje filtr, který odvádí vlhkost a pevné částice. Součástí by měla být izolace, aby se zabránilo kondenzaci, a odvaděč kondenzátu.

Tyto metody jsou využívány při spalování různých paliv, jiných než NVPP, za účelem snižování emisí a zvýšení účinnosti. Spalování NVPP by bez některých těchto postupů bylo skoro nemožné, a proto je můžeme uvažovat jako nutné modifikace hořáků a technologie spalování právě pro tato paliva.

5.6.1 **Ultra-Clean Low Swirl Combustion (UCLSC)**

Jedná se o spalování za pomocí speciálně upraveného hořáku, který využívá vířící trysku. Využívá se ke snížení emisí a také při spalování NVPP. Tuto úpravu vynalezl Robert Cheng v roce 1991. Hořáky využívající tuto technologii produkují 10 až 100krát méně emisí NO_x. Tento vynález by měl napomoci při spalování zemního plynu, bioplynu a odpadních plynů z průmyslu. [32] [33]

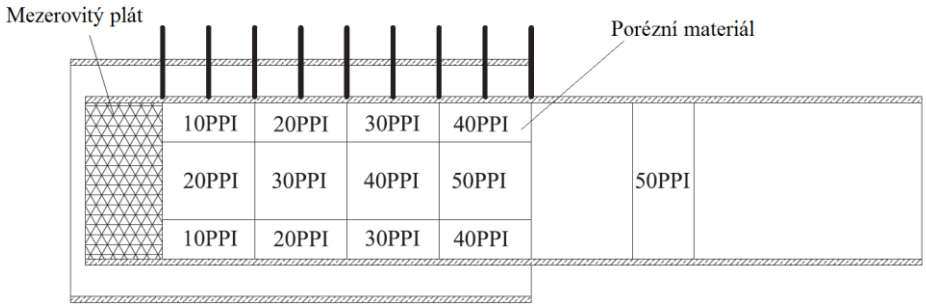


Obrázek 5.5: a) Vířivá tryska UCLSC, b) Vyvýšený plamen [34]

Charakteristickým znakem hořáku, využívající technologii UCLSC, je vyvýšený plamen, jehož kořen nezačíná u hořáku, ale v mírné vzdálenosti od něj. Inženýři se vždy vyhýbali tomuto znaku u hořáků, neboť to znamenalo nestabilitu plamene a hořák byl v průmyslu považován za nepoužitelný. Ovšem s UCLSC technologií mohou hořáky s tímto charakterem pracovat bez potíží a dokonce efektivněji. [33]

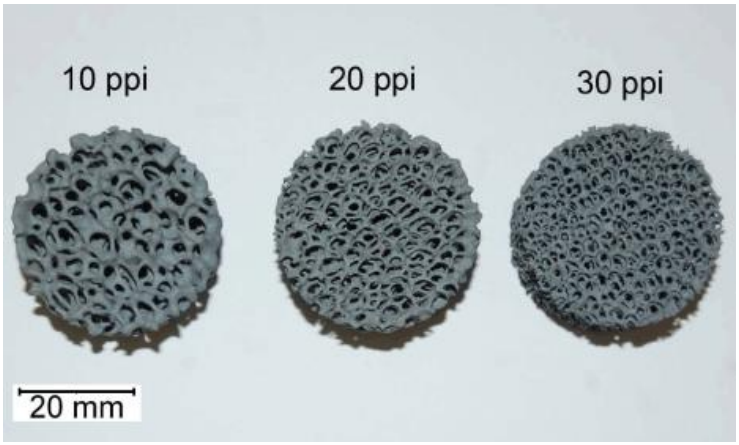
5.6.2 **Porézní hořáky**

Spalování v porézním médiu je efektivní metoda získávání energie. Existuje několik zajímavých vlastností této technologie oproti konvenčním typům hořáků, jako např. dobrá stabilita plamene, kompaktnost, nízké emise a další. Porézní hořáky jsou schopny spalovat plyny při nízkém poměru palivo/vzduch a také nízko-výhřevné plyny. [2]



Obrázek 5.6: Schématické zobrazení porézního hořáku [2]

Takovýto hořák se skládá z kruhové trubky, která je složena ze dvou soustředných trubek z nerezové oceli. V trubce s menším průměrem je obsažen porézní materiál tak, jak lze vidět na obrázku 5.6. Porézní materiál je z karbidu křemíku (SiC) a je uspořádán podle mezerovitosti porézní vrstvy. Na obrázku 5.7 lze vidět porézní materiál SiC s různými mezerovitostmi, která je udávána v ppi (parts per inch), což znamená počet částic na palec. [2]



Obrázek 5.7: Porézní vrstva SiC [35]

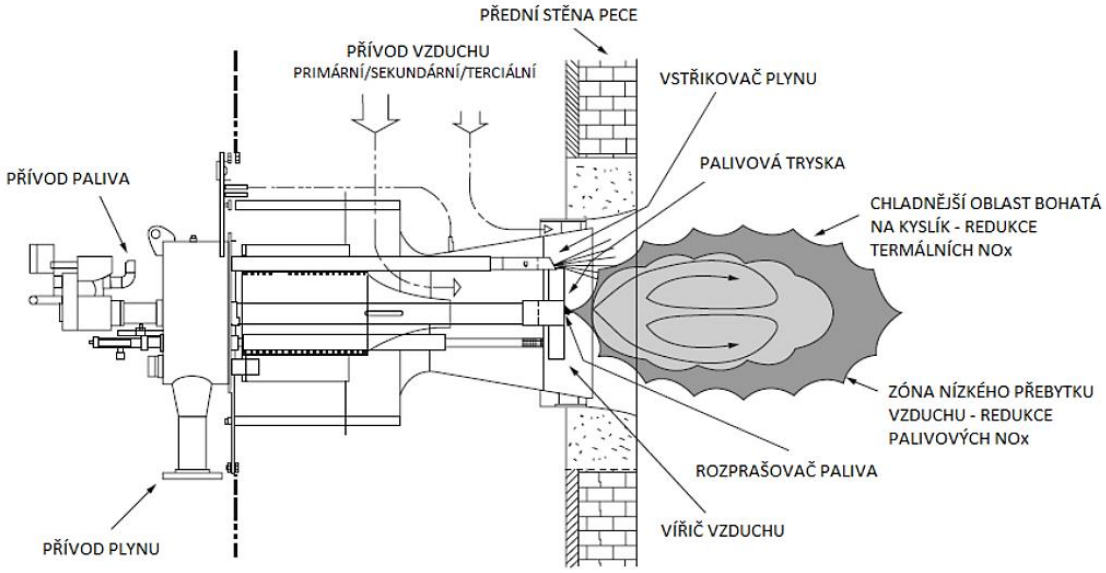
K samotnému hoření dochází přímo v porézní vrstvě, která je hořením nahřátá a předává teplo příchozím surovinám (plynu a vzduchu), což vyústí ve vyšší rychlosti plamene a „bezplamenné“ hoření. Takovýto zdroj tepla lze využít klasickými způsoby, aniž by se plamen dostal do kontaktu s produktem. [2]

5.6.3 **Vícestupňové spalování**

Jde o spalování s postupným přívodem spalovacího vzduchu. Princip vícestupňového spalování je ve snížení teploty plamene. Snížení můžeme dosáhnout přivedením části paliva do primárního stupně, kde vznikne podstechiometrická oblast spalování.

Zbytek paliva je přiveden mimo jádro plamene, kde dochází k dokončení spalování za snížených teplot. Snížení spalovací teploty lze uskutečnit i pomocí postupného přívodu vzduchu buďto samostatně, nebo kombinovaně se stupňovitým přívodem paliva. Tento mechanizmus je zobrazen na obrázku 5.8. [36]

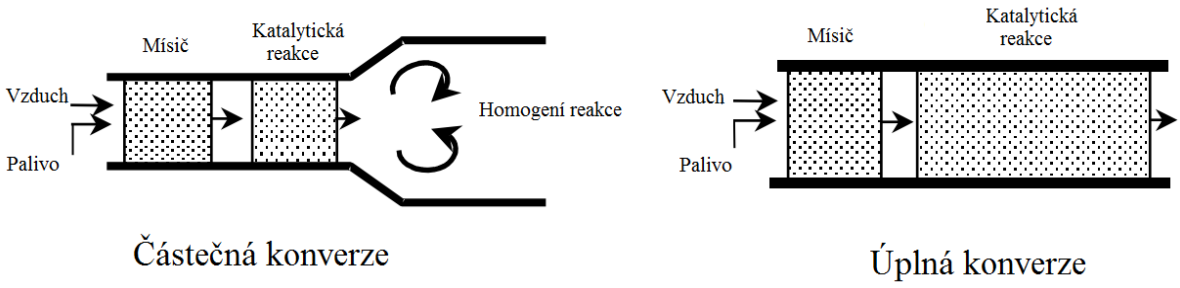
Tato metoda spalování vykazuje velký potenciál pro spalování NVPP. Spalovací proces je stabilní a hodnoty NO_x jsou velmi nízké. [37]



Obrázek 5.8: Vícestupňové spalování [36]

5.6.4 Spalování s katalyzátorem

Jedná se o chemický proces, který využívá katalyzátor k urychlení požadované oxidační reakce paliva a tím redukuje nežádoucí vedlejší produkty, jako jsou především částice NO_x, jejichž množství je velmi sníženo oproti spalování bez katalyzátoru. Díky přítomnosti katalyzátoru je spalovací teplota nižší, což je využito při spalování NVPP. Katalyzátory mohou být z kovu či keramiky, ale musí odolat náhlým teplotním výkyvům při spalování. Vybrané typy katalyzátoru jsou platinové kovy, perovskit či zeolit. [38]



Obrázek 5.9: Schématické znázornění spalování s katalyzátorem [38]

6 BEZPEČNOST PRÁCE S VYBRANÝMI PLYNY

Během praktické části bylo jako palivo zastupující NVPP využito zemního plynu s přídavkem oxidu uhličitého a zemního plynu s přídavkem dusíku. Vzhledem k tomu, že se v NVPP objevují různé složky, tak je v této kapitole věnována pozornost bezpečné manipulaci právě s těmito plyny. Jako nejzásadnější plyny byly vybrány vodík, dusík, oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Plyny použité při laboratorním experimentu byly dodány ve svazcích lahví, a proto je první podkapitola věnována manipulaci právě s lahvemi a jejich svazky.

Jako nejvhodnější zdroj pro tuto kapitolu byly zvoleny bezpečnostní listy jednotlivých látek od společností Linde gas a.s. a Messer Technogas s.r.o. a v celém rozsahu kapitoly se objevují odkazy na věty o nebezpečnosti a pokyny pro bezpečné zacházení v závorkách ve tvaru HXXX pro věty o nebezpečnosti nebo PXXX pro pokyny prevence, reakce či skladování.

6.1 MANIPULACE S LAHVEMI A SVAZKY LAHVÍ

ČSN 07 8304 se zabývá tlakovými nádobami na plyny. Pokud manipulujeme s tlakovou lahví, tak musí mít lahvový klobouček nebo trvalý kryt, který chrání ventil lahve před poškozením při případném pádu. Pro přepravu lahví se využije speciálního manipulačního vozíku a pokud přepravujeme svazky lahví, tak využijeme vozík vysokozdvižný. Lahve nesmí být přemisťovány odvalováním po plášti, smýkáním po spodním okraji, shazováním volným pádem a nesmí být zvedány za ochranný klobouček. Pokud se na lahvi najde viditelné poškození je potřeba jej patřičně označit a ihned ji vyřadit. Během odebírání plynu by lahev měla být ve svislé poloze a zajištěna proti pádu. [39]

6.2 VODÍK

Vodík je bezbarvý plyn bez zápachu, který má velký rozsah meze výbušnosti, a proto je jeho únik velmi nebezpečný. S kyslíkem je rozsah výbušnosti od 4 do 95 %, se vzduchem od 4 do 77 %. Proto je při práci s vodíkem základním pravidlem bezpečnosti zamezit tvorbě směsi vodíku a vzduchu. Vodík je 14,4krát lehčí než vzduch a při úniku může být jeho koncentrace u stropu vyšší. Vodík má velmi malé molekuly, a proto nejmenší netěsnosti mohou způsobit únik. Je tedy důležité věnovat při práci s vodíkem tomuto faktu zvýšenou pozornost a zajistit dokonalou těsnost všech armatur, nádob atd. Vodík je skladován v tlakových lahvích či tancích, které jsou k tomuto účelu určeny. Místa, kde jsou lahve, či tanky uloženy, by měla být dobře větraná (P403). Při zahřátí nádob může dojít k explozi. [40] [41]

Obrázek 6.1: Označení extrémně hořlavých látek [42]

Vodík je podle ES č. 1272/2008 kategorizován jako „Extrémně hořlavý plyn“ (H220), který může při zahřívání explodovat (H280). Pro bezpečnou manipulaci musí být plyn chráněn před teplem, horkými povrchy, jiskrami, otevřeným ohněm a jinými zdroji zapálení. Taktéž platí přísný zákaz kouření (P210). Při požáru unikajícího plynu by se požár měl hasit jen v případě, kdy nejde únik bezpečně zastavit (P337). [40]

Zasažené osoby by měly být co nejrychleji přesunuty a měly by dostat přísun kyslíku pomocí dýchacího přístroje. Samozřejmě je nutné zavolat odbornou lékařskou pomoc. Vodík nemá škodlivé účinky při kontaktu s očima, či kůží, ale vysoké koncentrace mohou způsobit udušení. Dalšími příznaky může být ztráta pohyblivosti, či vědomí. [40]

Vhodnými hasivy jsou voda, suchý prášek a pěnový hasicí přístroj. Jako nevhodné hasivo je považován oxid uhličitý. Hašení je nutné provádět nepřetržitou dodávkou vody z dostatečné vzdálenosti, neboť může dojít k opakovanému vznícení. [40]

V případě náhodného úniku v budově je nutno vyklidit prostor a nechat budovy vyvětrat. Je také potřeba zamezit úniku do kanalizace, sklepů, či šachet, kde by mohlo dojít k nashromáždění plynu v kritických koncentracích. Dalším faktorem je nebezpečí výbuchu, které je potřeba eliminovat odstraněním všech zdrojů zapálení. [40]

Se stlačenými plyny smí nakládat pouze zkušené a řádně proškolené osoby. Je potřeba zhodnotit míru nebezpečí výbušného prostředí a použít vhodnou ochranu proti výbuchu. Před použitím je důležité provést kontrolu těsnosti systému a chránit lahve před fyzickým poškozením. Dále je nezbytné dbát na řádné označení všech lahví a tlakových nádob. Při používání plynu se nesmí pít, jíst ani kouřit. Dále musíme dbát na čistotu prostředí a kontrolovat správný chod ventilů tlakových nádob. [40]

Veškeré vybavení ve skladovacích prostorech by mělo být řádně certifikováno pro použití ve výbušném prostředí. Lahve by měly být uchovávány odděleně od okysličujících plynů. Prostředí skladu by nemělo být vlhké, neboť by to mohlo způsobit případnou korozi nádob. Lahve musí být uchovávány mimo dosah hořlavých materiálů, mimo zdroje tepla a vzplanutí. [40]

6.3 DUSÍK

Tak jako vodík, je dusík bezbarvý a bez zápachu. Vzhledem k tomu, že vzduch obsahuje přibližně 78 % dusíku, tak tento plyn není příliš nebezpečný. Nicméně při práci se stlačeným dusíkem musíme zajistit dostatečnou ventilaci v místnosti, aby nedošlo k poklesu koncentrace kyslíku pod 16 %. Pokud pracujeme s lahvemi, kde je dusík pod tlakem, musíme stále dodržovat základní pravidla bezpečnosti. Při spalování NVPP ovšem tyto problémy není potřeba řešit, neboť dusík je inertní plyn a je nehořlavý. Pro skladování, manipulaci, náhodný únik i první pomoc platí v podstatě stejná pravidla jako při práci s vodíkem, s tím rozdílem, že není nutné zohledňovat hořlavost a tím vyvolané nebezpečné situace. [43] [39]

Dusík je podle ES č. 1272/2008 klasifikován jako plyn pod tlakem, kde při zahřívání může dojít k explozi (H280). Z hlediska bezpečnosti je potřeba skladovat dusíkové lahve na větraných místech (P403). [43]

Dusík jako takový nehoří a není tedy nutné jej hasit. Pokud vypukne požár v okolí, tak musí být použit vhodný hasící prostředek. [43]

6.4 OXID UHLIČITÝ

Jedná se o bezbarvý plyn, bez zápachu, nehořlavý, který ovšem ve vysokých koncentracích může být dusivý a způsobit i smrt. Pro manipulaci, skladování a náhodný únik platí stejné pokyny jako pro dusík. [44]

Oxid uhličitý je stejně jako dusík považován nařízením ES č. 1272/2008 za plyn, který může při zahřívání explodovat, pokud je pod tlakem (H280). Musí být skladován na dobře větraném místě (P403). [44]

Postiženého oxidem uhličitým je důležité dostat z účinku látky a využít dýchacího přístroje. Pokud se postiženému zastaví dech, je aplikováno umělé dýchání a přivolán lékař. Nízké koncentrace CO_2 způsobují zvýšenou dýchavičnost a bolest hlavy. Při kontaktu s očima je důležité oči okamžitě vypláchnout, vyjmout kontaktní čočky jsou-li nasazeny, a vyhledat lékařskou pomoc. Styk kůže s kapalným CO_2 může způsobit omrzliny nebo zmrznutí pokožky. Pokud k tomuto dojde, tak je nutné vyhledat lékařskou pomoc. [44]

Oxid uhličitý je nehořlavý a nemusíme se tedy hasit. Často je ve skutečnosti používán jako hasivo. Pokud vypukne požár v okolí, tak musí být použit vhodný hasící prostředek. [44]

6.5 OXID UHELNATÝ

Bezbarvý plyn, bez zápachu, extrémně hořlavý a toxický. To jsou hlavní problémy, které CO přináší. NVPP často obsahují vysoké koncentrace oxidu uhelnatého, a to hlavně u generátorového, vodního či kychtové plynu. Pro skladování a manipulaci platí stejná pravidla jako pro vodík. [45]

Jedná se o extrémně hořlavý plyn (H220), který je pod tlakem a může vybuchnout (H280). Při vdechnutí je toxický (H331), může poškodit plod v těle matky (H360D) a při dlouhodobé expozici způsobuje poškození vnitřních orgánů (H372). [45]

Příznaky vdechnutí mohou zahrnovat ospalost, bolest hlavy, nevolnost, či ztrátu rovnováhy. Postiženou osobu je potřeba přesunout do nekontaminované oblasti a nasadit ji dýchací přístroj. Při styku s kůží musí být odstraněn kontaminovaný oděv a obuv. Při kontaktu CO s očima platí stejná pravidla, jako při styku s oxidem uhličitým, tedy vyplachovat oči a odstranit oční čočky. Ve všech případech voláme odbornou lékařskou pomoc. [45]

Pro hašení je možné použít všech možných hasících prostředků. Je nezbytné dát si pozor na možnou explozi tlakových lahví. [45]

Při náhodném úniku musí dojít k evakuaci celé oblasti či budovy, a zajistit dostatečné větrání. Dále je potřeba jako u jiných látek zabránit úniku do sklepních prostor a kanalizací. Při vysokých koncentracích hrozí výbuch. [45]

7 LABORATORNÍ EXPERIMENT

Pro provedení a vyhodnocení laboratorního experimentu byly využity poznatky popsané v předchozích kapitolách. V následující kapitole je popsána laboratoř, kde probíhalo měření, včetně popisu jejího vybavení a použitého hořáku. Režimu zkoušek, podmínkám měření a vyhodnocení naměřených dat jsou věnovány vlastní podkapitoly.

7.1 POPIS LABORATOŘE

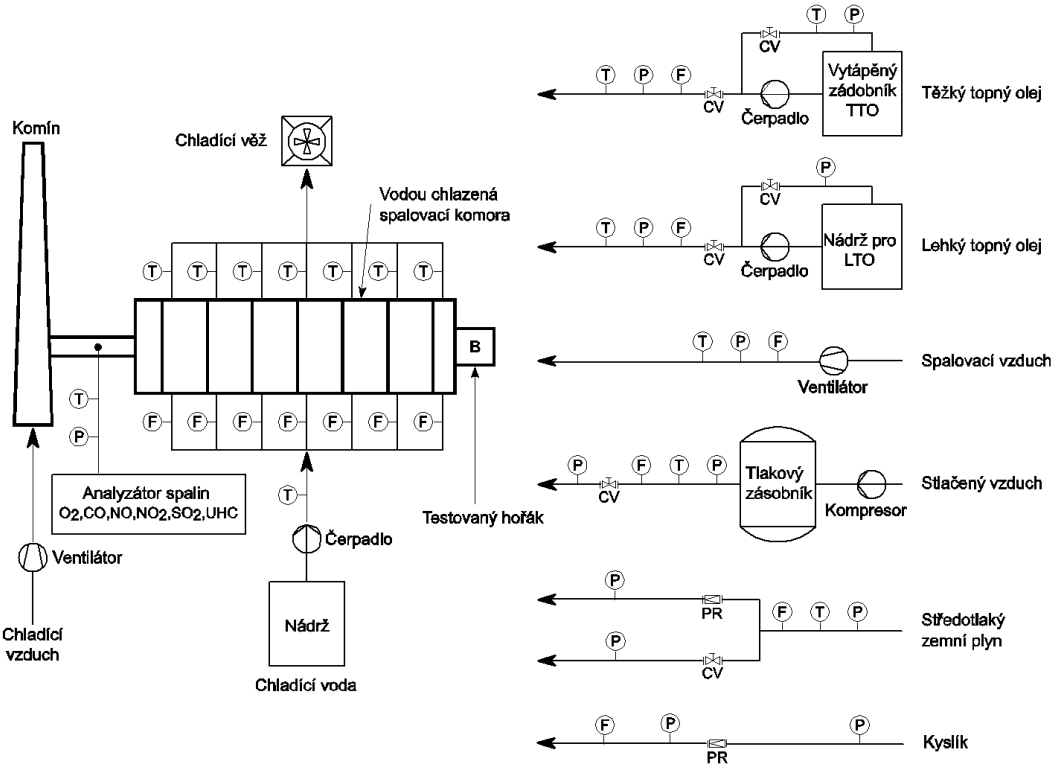
Nejdůležitějším zařízením zkušebny je dvouplášťová horizontální vodou chlazená pec o vnitřním průměru 1 metr a délce 4 metry. Přední a zadní strana komory jsou vyplněny izolací o celkové tloušťce 100 mm. Samotná komora je rozdělena do sedmi sekcí, a to z důvodu lepšího chlazení. Každá sekce má vlastní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

Obrázek 7.1: Zkušebna hořáků VUT

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 chladící voda. Délka prvních šesti sekcí je 0,5 m, poslední sekce má délku 1 m. Pro usměrnění toku chladící 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. 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 štěrbina (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 měřící techniky, např. termočlánky, radiační sondy aj.



Obrázek 7.2: Technologické schéma zkušebny hořáků.

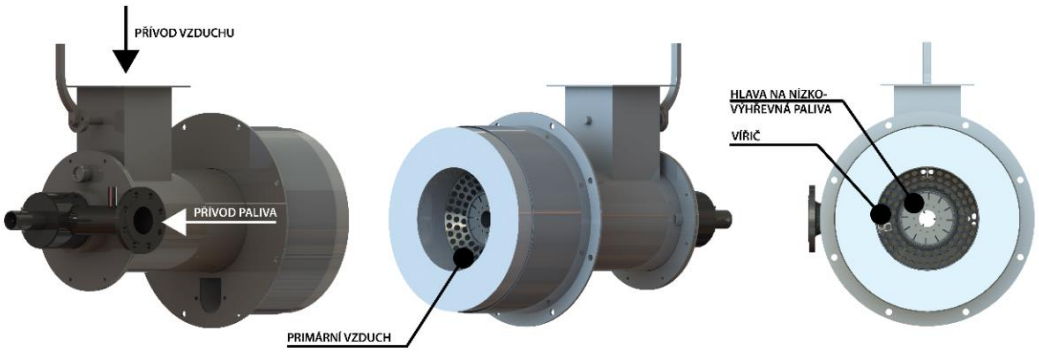
Spaliny ze spalovací komory vystupují skrz kouřovod, který je osazen třemi jímkami. Ty slouží pro odběr vzorku ze spalin, pro měření teploty spalin nebo tlaku v komoře a také samotnému složení spalin. Teplota spalin je měřena termočlánkem typu K. Ve spalovací komoře může být udržován trvalý podtlak 400 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 m_N^3/h při maximálním přetlaku 4 kPa.

Systém pro sběr dat umožňuje jednak automatický sběr dat po vteřině nebo po dvou minutách, anebo zápis dat na povel operátora. Systém sbírá data všech měřených veličin

zahrnující průtoky spalovacího vzduchu, paliva a chladící vody, teploty spalovacího vzduchu, paliva a chladící vody, tlaky v přívodních potrubích a složení a teplotu spalin na výstupu ze spalovací komory. Všechny měřené a dopočítané veličiny řídící 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 chladící 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. jednoelektrodový systém). Souprava je umístěna ve skříni, ovládací a signalizační prvky jsou na dveřích skříně. V případě utržení plamene nebo jeho vzdálení se od elektrody dojde k zániku ionizovaného prostředí a relé hlídače plamene se rozepne.

Hořák LPH-1000



Obrázek 7.3: Model hořáku LPH-1000

Hořák je navržen na maximální výkon 1500 kW, v průběhu zkoušek však byla použita varianta s výkonem 750 kW. Srdcem hořáku je centrální potrubí, které je zaslepeno přírubou tak, aby středem mohla být vložena trubka pro dodatečnou instalaci atomizéru nebo trysky distribuující oxidační médium. Toto mezikruží vymezuje prostor, kudy proudí palivo směrem k hořákové hlavě. Hořáková hlava má k dispozici dvě sady trysek, lze tedy o nich mluvit jako o primárním a sekundárním stupni. Primární stupeň (blíže k ose souměrnosti hořáku), kterým protéká menší podíl paliva, je navržen tak, aby stabilizoval plamen. Jedná se o kruhové pole děr vyvrtaných souose s hlavní osou hořáku. Sekundární stupeň tvoří kruhové pole drážek skloněných o úhel 45° vůči ose. Natočení má za úkol změnit směr hybnosti paliva, aby došlo ke generaci vířivého proudění. Díky turbulentnímu proudění se palivo snáze promíchá s atomizačním médiem. Dokonalé promíchání hořlavé směsi se vzduchem je pro správné spálení nesmírně důležité, jedině tak dojde k minimalizaci vzniku emisí (zejména NO_x). Na centrálním potrubí je uchycen vířič konické geometrie, což má pozitivní efekt na proudění. Ve třech kruhových polích jsou rozmístěny díry, kterými proudí spalovací vzduch. Po průchodu jednotlivými dírami dojde ke změně v toku vzduchu, konkrétně bude vytvořeno silně turbulentní proudění, díky kterému se bude palivo v tangenciální rotaci se spalovacím vzduchem ještě lépe promíchávat. Úhel naklonění vířiče

má důležitou roli a díky sklonu je možné částečně nasměrovat proud vzduchu tak, aby směřoval do středu plamene a došlo tak k ideálnímu spálení.

7.2 PLÁN A PRŮBĚH EXPERIMENTU

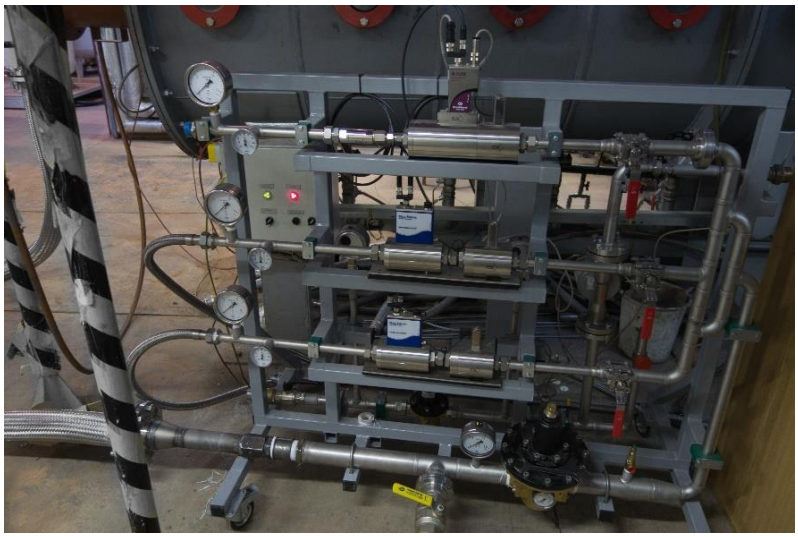
Během experimentu bylo využito několik plynů, a to zemní plyn, oxid uhličitý a dusík. Oxid uhličitý a dusík byl dodán dodavatelskou firmou ve svazku tlakových lahví a zemní plyn byl odebírán z distribuční sítě. Během experimentu bylo palivo spalováno s přebytkem kyslíku 3 % (přebytek vzduchu α = 1,15). Podrobný plán měření lze vidět v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Plán měření

Číslo měření	Průtok Zemního plynu	Průtok CO_2	Průtok N_2	Celkový průtok	Hustota	Spalné teplo	Výhřevnost
	[m_N^3/h]	[m_N^3/h]	[m_N^3/h]	[m_N^3/h]	kg/m_N^3	[MJ/m_N^3]	[MJ/m_N^3]
68	50,7	0,0	0,0	50,7	0,74	40,51	36,51
63	50,6	30,0	0,0	80,6	1,20	25,43	22,92
62	50,3	60,0	0,0	110,3	1,41	18,47	16,65
69	50,4	90,0	0,0	140,4	1,53	14,54	13,10
70	50,5	120,0	0,0	170,5	1,60	12,00	10,81
68	50,7	0,0	0,0	50,7	0,74	40,51	36,51
64	50,4	0,0	30,0	80,4	0,93	25,39	22,88
65	50,3	0,0	60,0	110,3	1,02	18,47	16,65
66	50,3	0,0	90,0	140,3	1,07	14,52	13,09
67	50,4	0,0	120,0	170,4	1,60	11,98	10,80

Laboratorní experiment byl naplánován tak, aby výhřevnost byla uměle snižována přídavkem dusíku k zemnímu plynu a oxidu uhličitého k zemnímu plynu. Nejnižší dosažená výhřevnost s přídavkem oxidu uhličitého byla 10,81 MJ/m_N^3 a s přídavkem dusíku 10,80 MJ/m_N^3. Postupným snižováním bylo tedy dosaženo hodnot pod pomyslnou hranicí 16,8 MJ/m_N^3 pro nízko-výhřevné plyny. V průmyslu samozřejmě existují i plyny, které dosahují mnohem nižších výhřevností, ale pro srovnání spalování klasického zemního plynu a plynů nízko-výhřevných jsou data získaná tímto experimentem dostačující.

Před samotným experimentem bylo nutné nachystat zkušebnu hořáků a zapojit do zkušební soustavy aparaturu na směšování paliv (obrázek 7.4), která byla pro tento experiment speciálně navržena. Poté došlo k zapálení plamene v peci a jejímu najetí. Aby naměřená data byla relevantní, musela se pec dostatečně vyhřát. Po ustálení měřených veličin bylo započato měření, které mělo 9 konfigurací průtoků paliv, viz. tabulka 7.1.



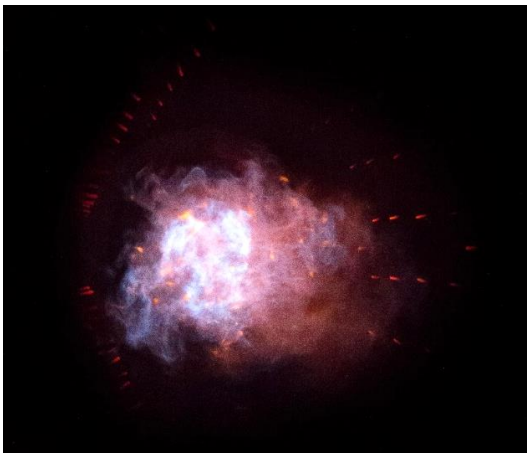
Obrázek 7.4: Směšovací aparatura

Do zemního plynu byly postupně přimíchány inertní plyny za vzniku nového typu paliva. Při každém nastavení bylo provedeno měření a záznam emisí ve spalinách, teploty spalin, teplot v plamenu v horizontální rovině souměrnosti a tepelných toků. Zároveň byly vyhodnoceny charakteristické vlastnosti plamene – tvar, barva a jeho stabilita. Při pokusu zvýšit průtok CO_2 na 120 m_N3/h po měření č. 69 došlo k zamrznutí lahví CO_2, experiment byl přerušen a měření č. 70 bylo dokončeno další den po rozmrznutí svazku lahví. K zamrznutí došlo kvůli Joule-Thomsonovu efektu, který nastává při expanzi plynu. Inverzní teplota CO_2 je 1500 K (1227 °C), což znamená, že CO_2 se bude vždy během expanze ochlazovat, pokud má teplotu nižší než inverzní. V tomto případě během expanze CO_2 z tlakové láhve do potrubí, kde změna tlaku vyvolala pokles teploty a došlo tak k výraznému snížení teploty až CO_2 v tlakové láhvi zamrzlo. [46]

Obrázek 7.5: Svazek zamrzlých lahví CO_2

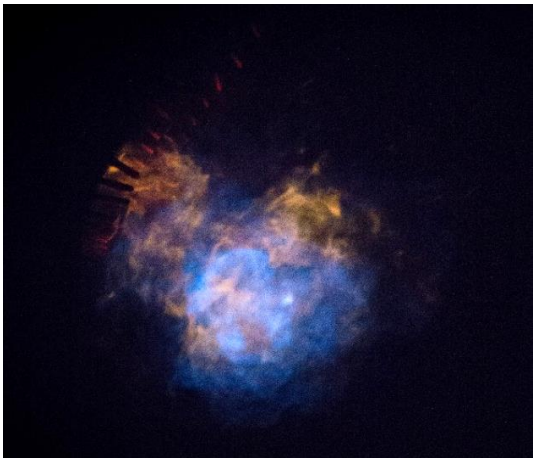
8 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI PLAMENE

Při pohledu na data pořízená během experimentu lze sledovat, že se plamen zvyšováním přídavku zkracoval a zmenšoval se jeho průměr. Při spalování čistého zemního plynu byla délka plamene 3 m a jeho průměr měl 1 m, při přidání 120 m_N3/h oxidu uhličitého se délka snížila na 1 m a průměr plamene klesl na 0,6 m. Podle fotografií pořízených během experimentu je možné sledovat tvar a barvu plamene. Žlutý plamen naznačoval spíše nestabilní hoření paliva (především z důvodu nízké výstupní rychlosti paliva), kdežto modrý plamen byl stabilnější a vířivý (přídavkem inertního plynu do paliva došlo ke zvětšení objemu paliva, což přispělo k navýšení výstupní rychlosti). Všechny tyto závěry jsou ovšem ovlivněny konkrétním nastavením hořáku a při použití jiné konfigurace by plameny i naměřená data pravděpodobně vypadaly odlišně. Lze ovšem konstatovat, že hořák byl konfigurován na spalování NVPP a spalování zemního plynu mu naopak dělalo problémy. Charakteristické vlastnosti plamene pro jednotlivá měření jsou popsány vedle následujících obrázků.



Obrázek 8.1: Plamen při konfiguraci 60 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.62

průtok zemního plynu: 50,3 m_N^3/h
průtok CO_2: 60,0 m_N^3/h
průtok N_2: 0,0 m_N^3/h
délka plamene: 1,5 m
průměr plamene: 0,7 m
tvar plamene: jádro je stabilní, obálka vířivá, v plamenu je vidět víření
barva plamene: celý modrý
stabilita plamene: stabilní



průtok zemního plynu: 50,6 m_N^3/h
průtok CO_2: 30,0 m_N^3/h
průtok N_2: 0,0 m_N^3/h
délka plamene: 2,0 m
průměr plamene: 0,9 m
tvar plamene: plamen je měkký, vířivý
barva plamene: jádro je modré, konce jsou zbarveny do žluta
stabilita plamene: nestabilní

Obrázek 8.2: Plamen při konfiguraci 30 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.63

průtok zemního plynu: 50,4 m_N^3/h
průtok CO_2: 0,0 m_N^3/h
průtok N_2: 30,0 m_N^3/h
délka plamene: 2,5 m
průměr plamene: 1,0 m
tvar plamene: plamen je měkký
barva plamene: jádro je modré, konec má velký rozptyl a je zbarven do žluta
stabilita plamene: nestabilní

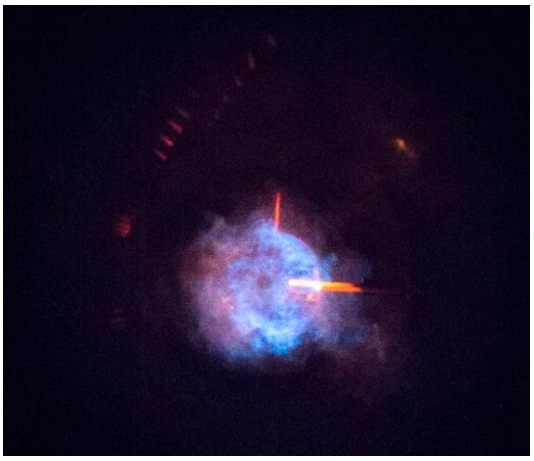
Obrázek 8.3: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 30 m_N^3/h N_2 měření č.64

průtok zemního plynu: 50,3 m_N^3/h
průtok CO_2: 60,0 m_N^3/h
průtok N_2: 0,0 m_N^3/h
délka plamene: 1,5 m
průměr plamene: 0,7 m
tvar plamene: jádro je stabilní, obálka vířivá, v plamenu je vidět víření
barva plamene: celý modrý
stabilita plamene: stabilní

Obrázek 8.4: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 60 m_N^3/h N_2 měření č.65

průtok zemního plynu: 50,3 m_N^3/h
průtok CO_2: 0,0 m_N^3/h
průtok N_2: 90,0 m_N^3/h
délka plamene: 1,5 m
průměr plamene: 0,7 m
tvar plamene: vířivý, ostrý
barva plamene: skoro úplně modrý
stabilita plamene: stabilní

Obrázek 8.5: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 90 m_N^3/h N_2 měření č.66

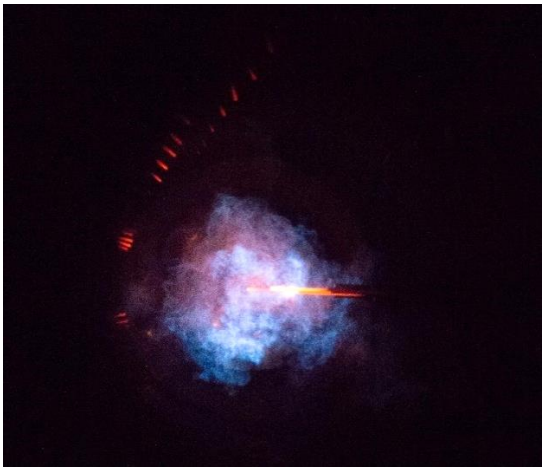


průtok zemního plynu: 50,4 m_N^3/h
průtok CO_2: 0,0 m_N^3/h
průtok N_2: 120,0 m_N^3/h
délka plamene: 1,5 m
průměr plamene: 0,7 m
tvar plamene: vířivý, ostrý
barva plamene: úplně modrý
stabilita plamene: stabilní

Obrázek 8.6: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 120 m_N^3/h N_2 měření č.67

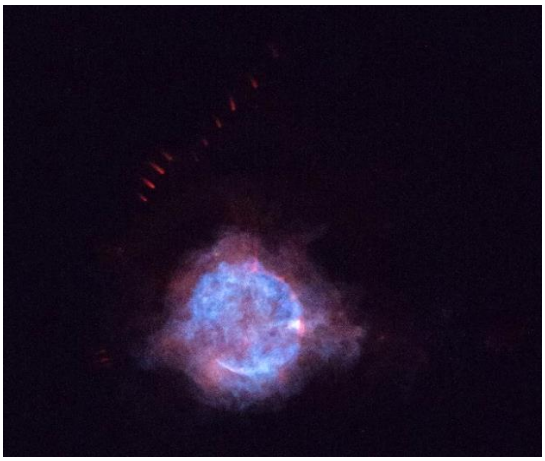
průtok zemního plynu: 50,7 m_N^3/h
průtok CO_2: 0,0 m_N^3/h
průtok N_2: 0,0 m_N^3/h
délka plamene: 3,0 m
průměr plamene: 1,0 m
tvar plamene: rozvířený
barva plamene: žlutý plamen s malým modrým jádrem
stabilita plamene: spíše nestabilní

Obrázek 8.7: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.68



průtok zemního plynu: 50,4 m_N^3/h
průtok CO_2: 90,0 m_N^3/h
průtok N_2: 0,0 m_N^3/h
délka plamene: 1,0 m
průměr plamene: 0,7 m
tvar plamene: ostrý, prudký
barva plamene: celý modrý
stabilita plamene: stabilní

Obrázek 8.8: Plamen při konfiguraci 90 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.69



průtok zemního plynu: 50,5 m_N^3/h
průtok CO_2: 120,0 m_N^3/h
průtok N_2: 0,0 m_N^3/h
délka plamene: 1,0 m
průměr plamene: 0,6 m
tvar plamene: vířivý
barva plamene: celý výrazně modrý
stabilita plamene: stabilní

Obrázek 8.9: Plamen při konfiguraci 120 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.70

9 EMISE

Podmínky pro měření emisí jsou dané vyhláškou 415/2012 Sb., která je stanovuje. Pro plynná paliva se hodnota naměřených emisí vyjadřuje při aktuálním tlaku a teplotě a přebytku kyslíku ve spalinách 3 %.

Pro přepočet byla využita rovnice (23), která slouží k výpočtu emisí NO_2. Výpočet emisí NO_2 bylo nutné provést, neboť používaný analyzátor měří pouze hodnoty NO. [47]

$$[NO_2]\ \frac{mg}{m^3} = [NO]\ \frac{mg}{m^3} \cdot \frac{M_{NO_2}}{M_{NO}} = [NO]\ \frac{mg}{m^3} \cdot \frac{46}{30} = [NO]\ \frac{mg}{m^3} \cdot 1{,}533 \qquad (23)$$

Kde M_{NO_2} je molekulová hmotnost NO_2 [kg/kmol],
M_{NO} molekulová hmotnost NO [kg/kmol].

Mnoho druhů analyzátorů měří emise v jednotkách ppm (parts per million) a pro převedení na mg/m^3 slouží rovnice (24). Rovnice při výpočtu nebyla použita. [47]

$$Y = X \cdot \frac{\sum x_i \cdot MW_i}{22{,}414} \qquad (24)$$

Kde Y je přepočítaná koncentrace NO nebo NO_2 [mg/m$_N^3$],
X naměřená koncentrace NO nebo NO_2 [ppm],
x_i hmotnostní podíl i-té složky [kg/kg],
MW_i molekulová hmotnost i-té složky [kg/kmol].

Například přepočty 1 ppm NO a 1 ppm NO_2 na [mg/m$_N^3$] jsou následující:

$$1\ ppm\ NO = \frac{14+16}{22{,}414} = 1{,}34\ mg/m^3 \qquad (25)$$

$$1\ ppm\ NO_2 = \frac{14+2\cdot16}{22{,}414} = 2{,}05\ mg/m^3 \qquad (26)$$

9.1 MĚŘENÍ

Emise byly měřeny spalinovým analyzátorem ABB EL 3020. Analyzátor umožňuje měření NO v rozsahu 0 – 1250 mg/m^3, SO_2 v rozsahu 0 – 3000 mg/m^3, CO v rozsahu 0 – 1250 mg/m^3, CO_2 v rozsahu 0 – 20 % obj. a O_2 v rozsahu 0 – 25 % obj. Kyslík je měřen elektrochemicky, ostatní složky na základě infračervené absorpce. Výstupní signál je 0/4 – 20 mA, doba náběhu je minimálně 30 min. s nejvyšší přesností po 2 hodinách. Průtok plynu 60 – 120 l/h. Pro odběr vzorků je analyzátor vybaven otápěnou sondou s filtrem 0,1 mm (připojení na přírubu DN 65), otápěným vedením (6 m) s termoregulací (50 – 200 °C),

chladícím modulem pro vykondenzování vlhkosti z plynu, kyselinovým filtrem a membránovým čerpadlem.

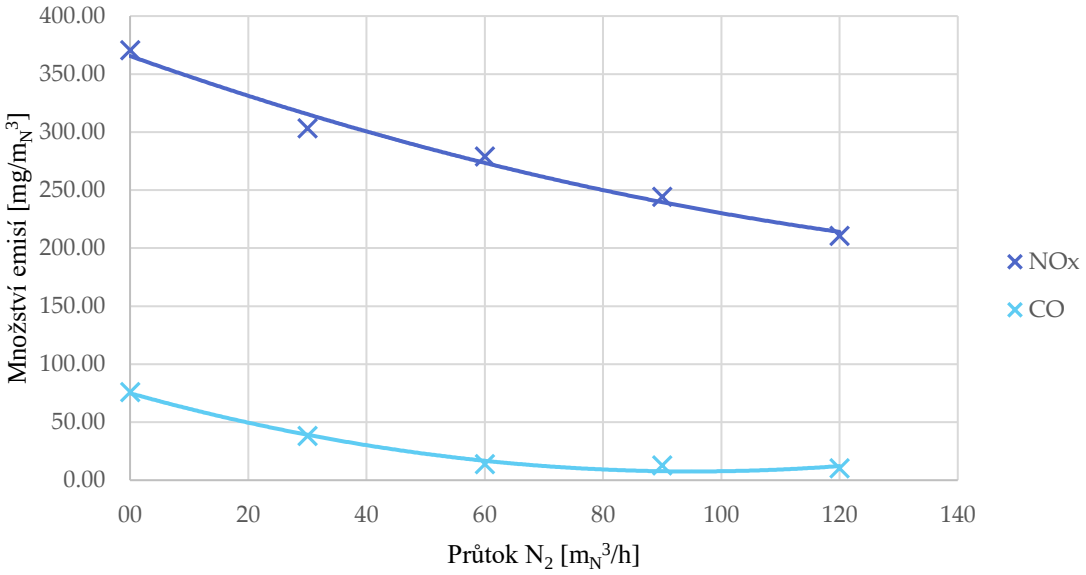
Tabulka 9.1: Naměřená data emisí

Číslo měření	Průtok Zemního plynu	Průtok CO_2	Průtok N_2	Teplota spalin	Emise CO	Emise NO	Emise NO_2	Emise NOx
	[m_N^3/h]	[m_N^3/h]	[m_N^3/h]	[°C]	[mg/m^3]	[mg/m^3]	[mg/m^3]	[mg/m^3]
68	51	0	0	701	76	259	111	371
63	51	30	0	653	33	153	69	222
62	50	60	0	629	27	118	55	173
69	50	90	0	648	0	94	43	137
70	51	120	0	620	0	64	30	95
68	51	0	0	701	76	259	111	371
64	50	0	30	673	38	210	93	303
65	50	0	60	669	14	193	86	279
66	50	0	90	662	13	169	76	244
67	50	0	120	656	10	145	65	211

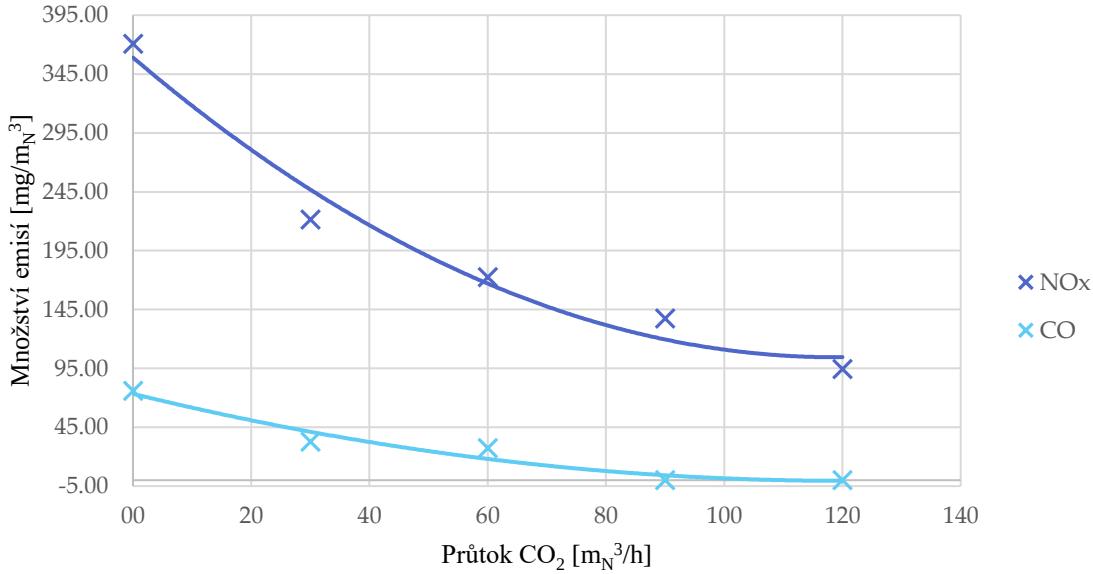
9.2 VYHODNOCENÍ

Při spalování pouze zemního plynu byly emise CO na hodnotě 76 mg/m^3 a NO_x na 370 mg/m^3, při navýšení průtoku o 30 m_N^3/h CO_2 se emise CO snížily o 57 % a NO_x o 40 %. Při navýšení průtoku CO_2 na 120 m_N^3/h se emise CO snížily na 0 mg/m^3 a NO_x kleslo na hodnotu 95 mg/m^3, což značí pokles o 75 % oproti spalování čistého zemního plynu. Po navýšení průtoku dusíku na 120 m_N^3/h se emise CO snížily o 87 % a NO_x o 43 %. Z výsledků lze konstatovat, že i malý přídavek CO_2 či N_2 může velmi ovlivnit výsledné množství emisí.

Trend na obrázcích 9.1 a 9.2 ukazuje, že zvýšením průtoku N_2 či CO_2 se emise NO_x i CO snižují poměrně pravidelně. To značí, že paliva s vysokým obsahem dusíku a oxidu uhličitého, tedy i nízko-výhřevná, budou mít pozitivní vliv na vznikající emise. Tím, že byl přidán k zemnímu plynu dusík, či oxid uhličitý, což jsou inertní molekuly, došlo k ochlazení plamene a snížení teplot. Při nižších teplotách bude vznikat méně emisí tak, jak je vysvětleno v podkapitole 4.3. Přítomnost emisí CO ve spalinách značí nedokonalé spalování. Pro srovnání teplot plamene slouží kapitola 10, která obsahuje jednotlivá měření a vykreslení grafů plamene se zaznačenými teplotami.



Obrázek 9.1: Graf – vliv množství N_2 na emise



Obrázek 9.2: Graf – vliv množství CO_2 na emise

10 TEPLOTY V PLAMENU

Pro měření teploty v plamenu byl použit termočlánek typu R, který je složen ze dvou drátů, jeden je z čisté platiny a druhý ze slitiny platina-rhodium. Tento typ je možné použít při krátkodobých teplotách až 1600 °C. Termočlánky obecně pracují na principu tzv. Seebeckova jevu, který vzniká při působení různých teplot na elektrický obvod. Díky rozdílným teplotám a různému složení vodičů vzniká termoelektrické napětí, které je možné změřit. Termočlánky mohou být vyrobeny z rozdílných kombinací kovů s odlišnými vlastnostmi. Podle použitých materiálů se pak liší i jejich pracovní podmínky a teplotní rozsahy.

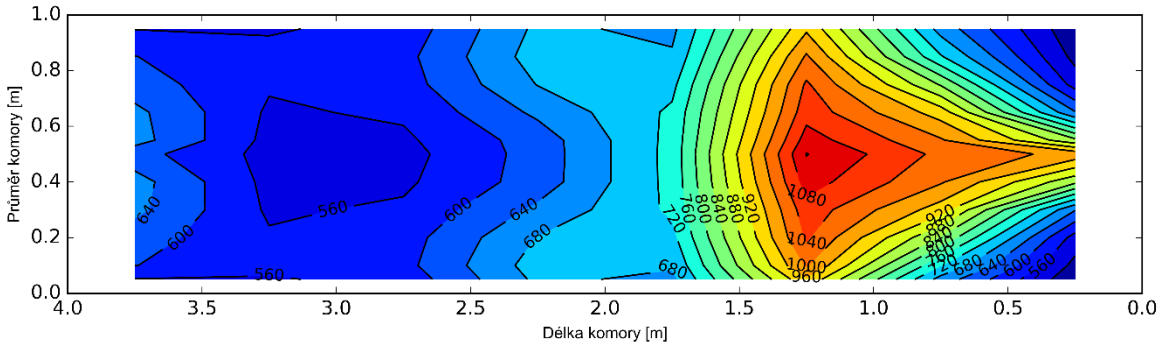
Zpracování dat z termočlánků bylo provedeno pomocí dataloggeru midi LOGGER GL220 od společnosti Graphtec, který má 10 analogových vstupů, kam lze sondy připojit a zobrazuje naměřené hodnoty na vestavěném LCD displeji.

10.1 MĚŘENÍ

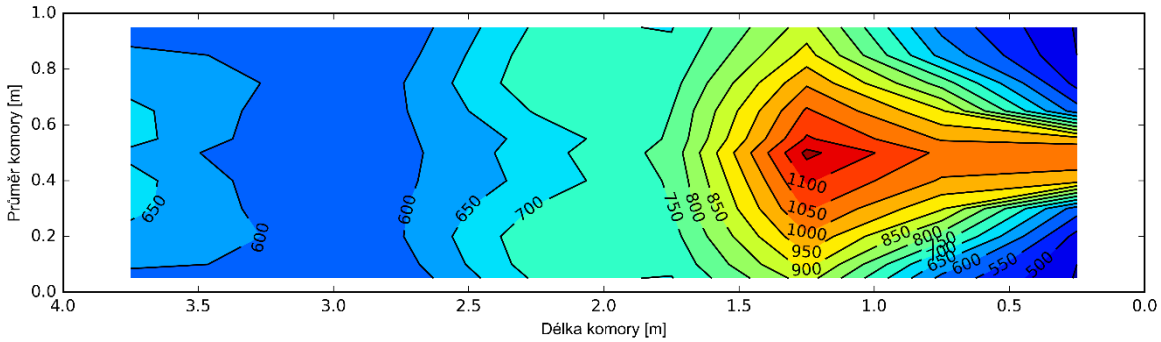
Po ustálení plamene a podmínek ve spalovací komoře byly pro každou konfiguraci paliva měřeny teploty v plamenu. Měření bylo provedeno celkem na 8 místech ve vzdálenostech 0,25; 0,75; 1,25; 1,75; 2,25; 2,75; 3,25 a 3,75 m od ústí hořáku. Termočlánky umístěné na jednotlivých pozicích byly postupně zasouvány do středu plamene. Každý z termočlánků měřil teploty celkem v 6 pozicích, konkrétně ve vzdálenostech 5; 10; 20; 30; 40 a 50 cm od vnitřního okraje pláště spalovací komory. V každé pozici byly teploty zaznamenávány po dobu 30 s a následně byla vypočtena průměrná hodnota. Takto získaná data bylo možné použít k vytvoření grafického vyobrazení plamene v celé komoře.

10.2 VYHODNOCENÍ

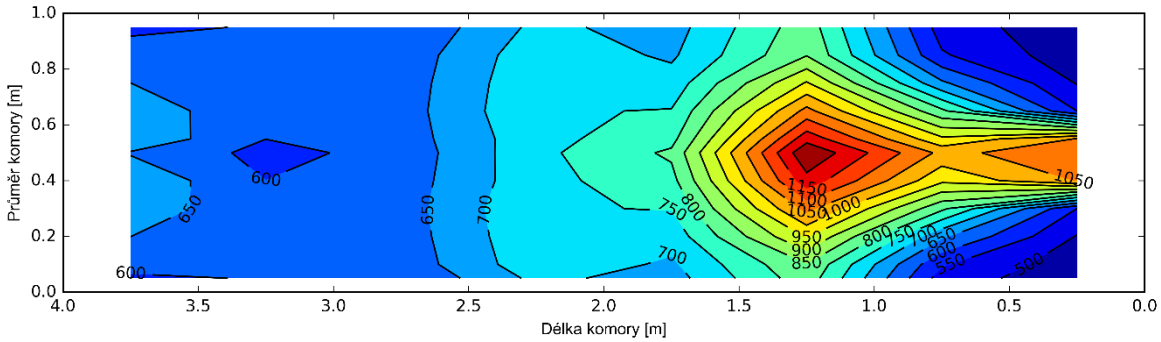
Na vykresleních plamene v jednotlivých měřeních lze pozorovat snižování teploty vlivem přidávání dusíku, či oxidu uhličitého. Při spalování čistého zemního plynu měl plamen teplotu jádra přes 1200 °C, jeho okrajové části dosahovaly teplot kolem 800 °C. Přídavek 30 m_N^3/h N_2 mírně snížil teplotu jádra plamene na 1150 °C, 30 m_N^3/h CO_2 na teplotu 1100 °C. Postupným zvyšováním průtoku N_2 až na 120 m_N^3/h se teplota jádra snížila na 1080 °C. Při průtoku 120 m_N^3/h CO_2 teplota jádra dosahovala 1000 °C. Ve všech konfiguracích bylo teplotní pole uniformní do délky cca 1,7 m a poté došlo k prudkému ochlazení v komoře. Maximální teplota u všech konfigurací byla ve vzdálenosti 1,3 m od hořáku. Ústí hořáku mělo ve všech případech podobnou teplotu okolo 1040 °C.



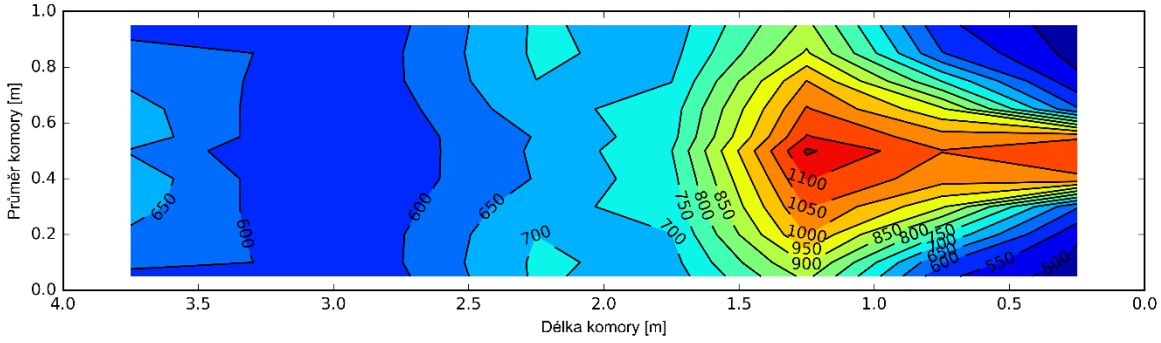
Obrázek 10.1: Měření č. 62 vykreslení plamene (60 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2)



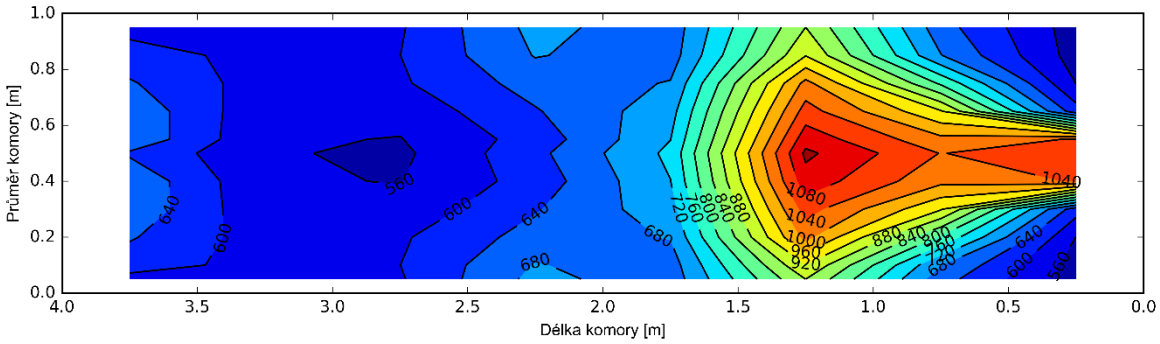
Obrázek 10.2: Měření č. 63 vykreslení plamene (30 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2)



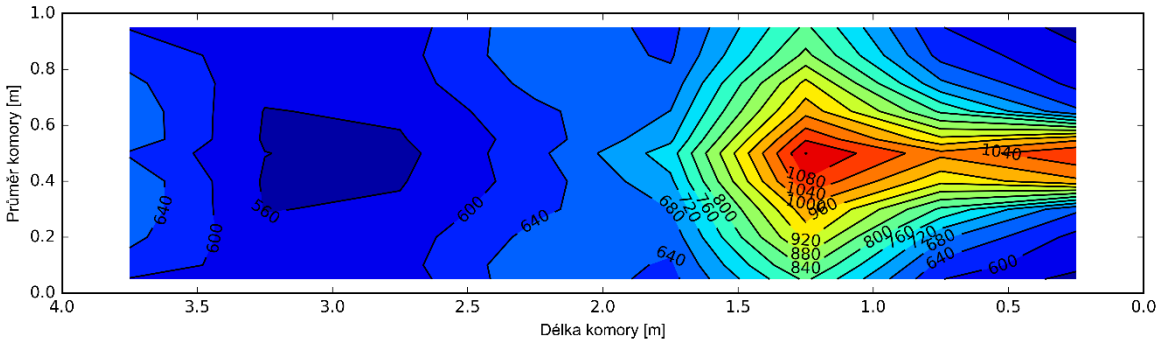
Obrázek 10.3: Měření č. 64 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 30 m_N^3/h N_2)



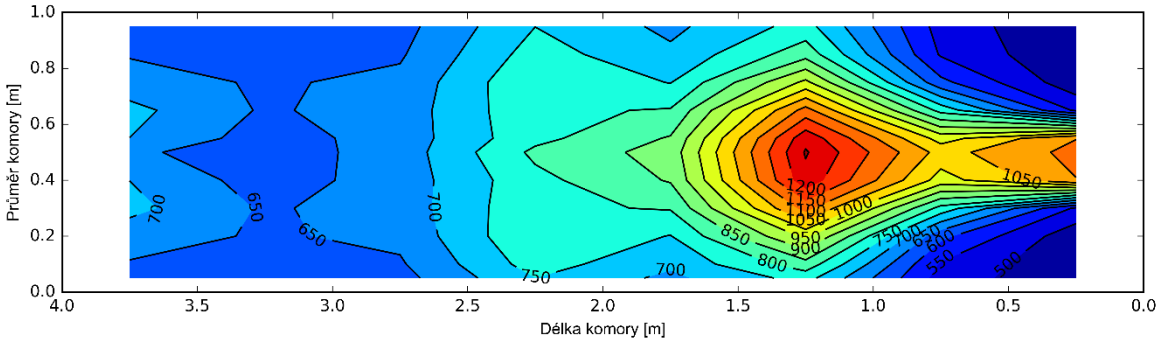
Obrázek 10.4: Měření č. 65 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 60 m_N^3/h N_2)



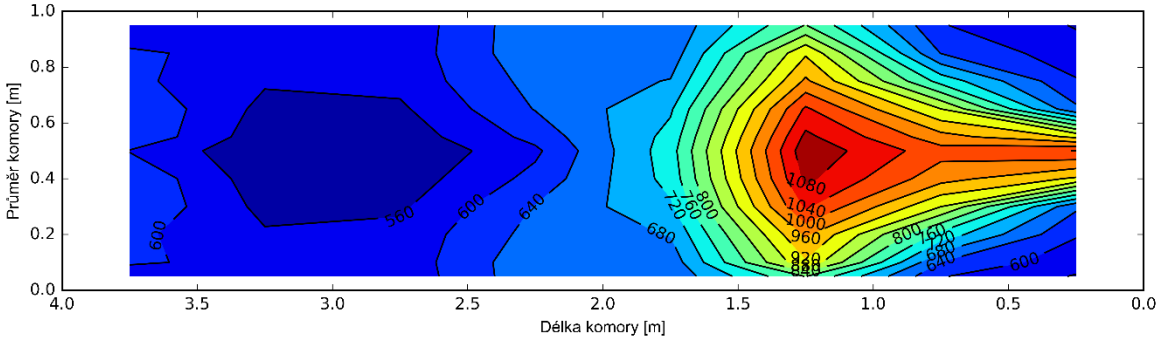
Obrázek 10.5: Měření č. 66 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 90 m_N^3/h N_2)



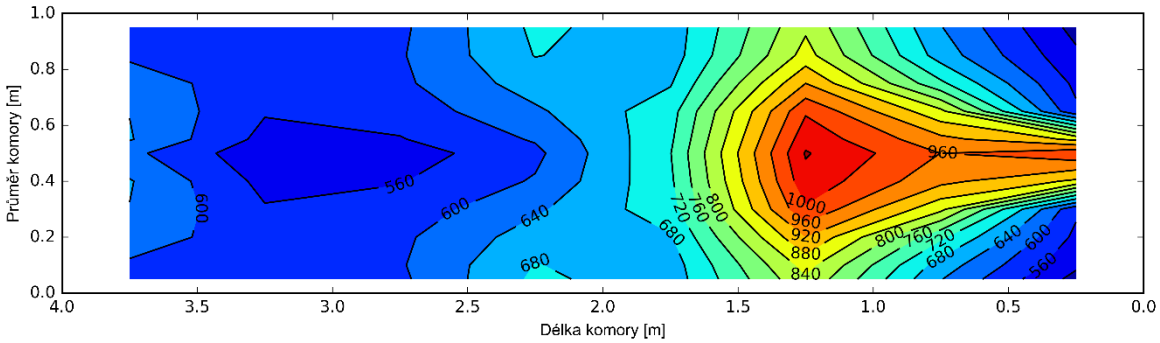
Obrázek 10.6: Měření č. 67 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 120 m_N^3/h N_2)



Obrázek 10.7: Měření č. 68 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2)



Obrázek 10.8: Měření č. 69 vykreslení plamene (90 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2)



Obrázek 10.9: Měření č. 70 vykreslení plamene (120 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2)

11 TEPELNÉ TOKY

Pro zjednodušení výpočtu byla hustota a měrná tepelná kapacita chladící vody uvažována jako konstantní. Pro výpočet tepelných toků byla použita rovnice (27), která byla upravena pro podmínky zkušebny hořáků do formy rovnice (28).

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{v,i} \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i = \rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i \tag{27}$$

$$\dot{q}_i = \frac{\rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i}{A_i} = \frac{\rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot (t_{out,i} - t_{in,i})}{L_{i \cdot \pi}} \tag{28}$$

Kde $\dot{Q}_i$ je tepelný tok v i-té sekci [W],
$\dot{m}_{v,i}$ hmotnostní průtok v i-té sekci [kg/s],
$c_{p,i}$ měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [J/kg·K],
Δt_i rozdíl teplot chladící vody na vstupu a výstupu do komory [°C],
ρ_i hustota vody v závislosti na teplotě [kg/m^3],
$\dot{V}_i$ objemový průtok v i-té sekci [m^3/s],
$\dot{q}_i$ hustota tepelného toku v i-té sekci [W/m^2],
A_i plocha i-té sekce [m^2],
$t_{out,i}$ výstupní teplota chladící vody z i-té sekce [°C],
$t_{in,i}$ vstupní teplota chladící vody do i-té sekce [°C],
L_i délka i-té sekce [m].

11.1 CHYBOVÁ ANALÝZA

Vzhledem k tomu, že pro výpočet tepelných toků bylo nutné změřit jak teploty vstupní a výstupní vody, tak průtok chladící vody, bylo potřeba stanovit chybu měření, která je u takového experimentu vždy přítomná. Výrobce měřících zařízení udává, jak velká nepřesnost může u daného zařízení (např. teploměru) vzniknout, což slouží k výpočtu absolutní chyby tepelného toku. Pro výpočet takové chyby lze využít rovnici (29), což je zákon šíření nejistoty. [26]

$$\left(\frac{\sigma_p}{P}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_a}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{B}\right)^2 \tag{29}$$

Kde P je hustota tepelného toku,
A objemový průtok chladící vody v jedné sekci [m^3/h],
B teplota chladící vody na vstupu a výstupu [K].

Úpravou rovnice je možné získat tvar, který popisuje rovnice (30). [26]

$$\left(\frac{\sigma_{\dot{q}_i}}{\dot{q}_i}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{V_i}}{\dot{V}_i}\right)^{2^2} + \frac{\sigma^2_{tout,i}+\sigma^2_{tin,i}}{\Delta t_i^2} \quad (30)$$

Po úpravě a vyjádření relativní chyby vznikne konečný tvar rovnice (31), který byl použit během výpočtu. [26]

$$\sigma_{\dot{q}_i} = \dot{q}_i \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_i}}{\dot{V}_i}\right)^{2^2} + \frac{\sigma^2_{tout,i}+\sigma^2_{tin,i}}{\Delta t_i^2}} \quad (31)$$

Kde $\sigma_{\dot{q}_i}$ je absolutní chyba měření [W/m^2],
$\dot{q}_i$ hustota tepelného toku v i-té sekci [W/m^2],
σ_{V_i} součin největší dovolené chyby průtokoměru (± 2 % z naměřené hodnoty) a naměřené hodnoty,
$\dot{V}_i$ objemový průtok v i-té sekci [m^3/s],
$\sigma^2_{t_{out,i}}$ přesnost použitého teploměru (fixně 0,25^{2,} přesnost použitého teploměru PTP50J je ±0,5 % z rozsahu (max. ±0,25 °C), uvažovaná je tedy nejhorší možnost a to 0,25),
$\sigma^2_{t_{in,i}}$ přesnost použitého teploměru (fixně 0,25^{2,} přesnost použitého teploměru PTP50J je ±0,5 % z rozsahu (max. ±0,25 °C), uvažovaná je tedy nejhorší možnost a to 0,25),
Δt_i^2 rozdíl teplot na vstupu a na výstupu.

Dále lze vyjádřit relativní chybu, a to pomocí rovnice (32).

$$\sigma_x = \dot{q}_i \cdot \frac{\sigma_{\dot{q}_\iota}}{\dot{q}_\iota} \cdot 100 \quad (32)$$

Rovnice (33) a (34) slouží jako příklad výpočtu.
průměrný průtok v první sekci: 2,4 m^3/h
průměrná teplota na vstupu: 12,35 °C
průměrná teplota na výstupu: 22,41 °C
dopočtený průměrný tepelný tok na sekci – dosazeno do rovnice (29): 22,39 kW/m^2

$$\sigma_{\dot{q}_\iota} = 22{,}39 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}02 \cdot 2{,}4}{2{,}4}\right)^2 + \frac{0{,}25^2+0{,}25^2}{(22{,}41-12{,}35)^2}} = 0{,}905 \text{ kW}/m^2 \quad (33)$$

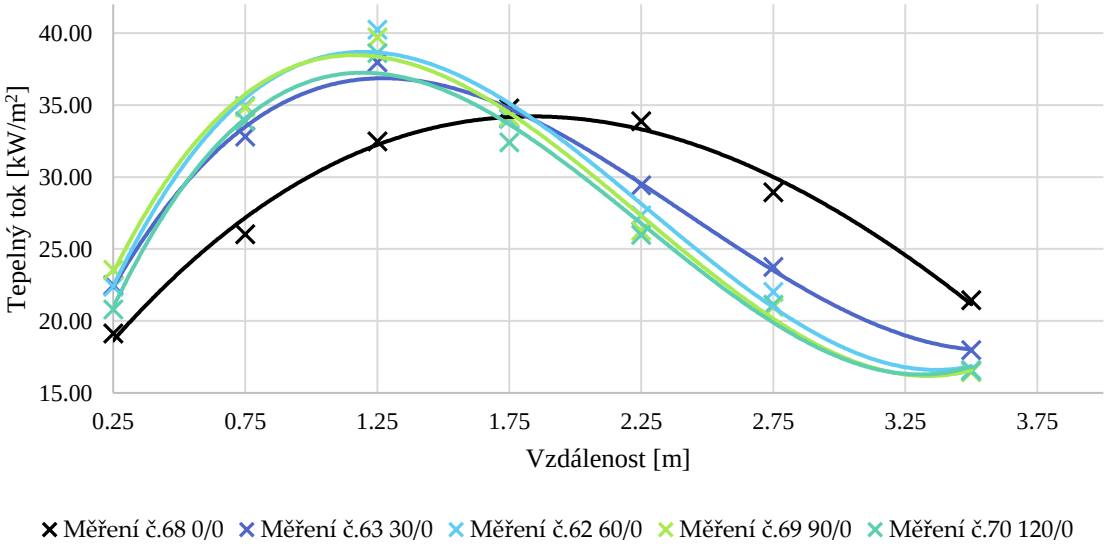
$$\frac{\sigma_{\dot{q}_\iota}}{\dot{q}_\iota} \cdot 100 = \frac{0{,}905}{22{,}39} \cdot 100 = 4{,}42\ \% \quad (34)$$

11.2 MĚŘENÍ

Tato podkapitola obsahuje vypočtené hodnoty tepelných toků, absolutní a relativní chyby těchto hodnot v jednotlivých sekcích, dále účinnosti a celkové tepelné toky jednotlivých měření. Pro srovnání je kapitola rozdělena na měření, kdy byl k zemnímu plynu přidán oxid uhličitý, nebo dusík. Pro lepší názornost je dále před těmito skupinami umístěno měření bez přídavku, jedná se tedy o spalování pouze zemního plynu (tabulka 11.1 a tabulka 11.6).

11.2.1 Paliva s přídavkem CO_2

Při pohledu na Obrázek 11.1 jde jasně vidět rozdíl mezi spalováním zemního plynu (černá křivka) a spalováním při ostatních konfiguracích s přídavkem oxidu uhličitého. I poměrně malý přídavek jako je 30 m_N^3/h způsobí zkrácení plamene a tepelný tok nabývá svého maxima při vzdálenosti 1,25 m, poté následuje prudký pokles. Naopak při spalování zemního plynu je tepelný tok distribuován rovnoměrněji a nenabývá tak vysokého maxima.



Obrázek 11.1: Srovnání různých průtoků CO_2 a zemního plynu[5]

[5] Legenda grafu obsahuje číslo měření a množství průtoku přidaného plynu. První hodnota je množství přidaného CO_2, druhá hodnota je množství přidaného N_2. Průtoky jsou uvedeny v m_N^3/h.

Tabulka 11.1: Tepelné toky – konfigurace 0 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2

Měření č. 68	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	19,12	0,87	4,55		
Sekce 2	26,04	0,79	3,04		
Sekce 3	32,47	0,90	2,78		
Sekce 4	34,77	0,93	2,69	65,97	196,66
Sekce 5	33,88	0,92	2,72		
Sekce 6	28,94	0,85	2,94		
Sekce 7	21,45	0,56	2,62		

Tabulka 11.2: Tepelné toky – konfigurace 30 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2

Měření č. 63	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	22,49	0,91	4,04		
Sekce 2	32,81	0,91	2,77		
Sekce 3	37,98	1,02	2,68		
Sekce 4	34,08	0,93	2,73	65,15	198,53
Sekce 5	29,43	0,88	2,99		
Sekce 6	23,76	0,82	3,44		
Sekce 7	17,97	0,52	2,90		

Tabulka 11.3: Tepelné toky – konfigurace 60 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2

Měření č. 62	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	22,39	0,91	4,04		
Sekce 2	34,94	0,95	2,73		
Sekce 3	40,24	1,05	2,62		
Sekce 4	34,04	0,94	2,77	64,57	197,59
Sekce 5	27,34	0,85	3,12		
Sekce 6	22,03	0,81	3,69		
Sekce 7	16,61	0,50	3,02		

Tabulka 11.4: Tepelné toky – konfigurace 90 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2

Měření č. 69	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	23,56	0,91	3,88	64,28	195,97
Sekce 2	34,83	0,92	2,63		
Sekce 3	39,70	1,01	2,53		
Sekce 4	34,19	0,94	2,76		
Sekce 5	26,28	0,82	3,11		
Sekce 6	20,97	0,76	3,61		
Sekce 7	16,44	0,49	2,96		

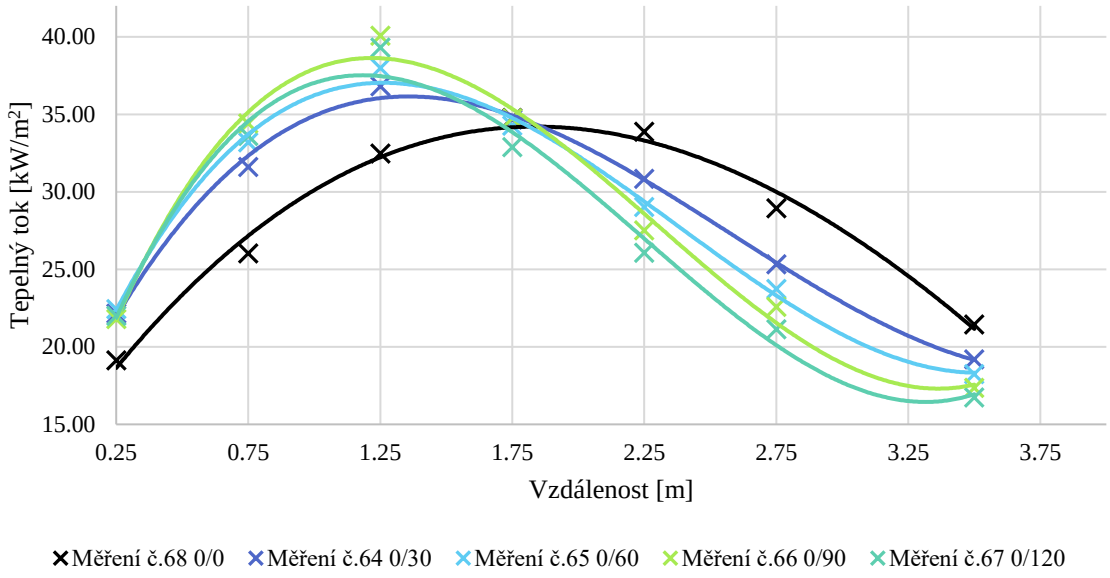
Tabulka 11.5: Tepelné toky – konfigurace 120 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2

Měření č. 70	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	20,80	0,89	4,27	62,09	189,35
Sekce 2	33,88	0,94	2,78		
Sekce 3	38,62	1,01	2,62		
Sekce 4	32,41	0,92	2,84		
Sekce 5	25,97	0,84	3,25		
Sekce 6	21,13	0,77	3,65		
Sekce 7	16,53	0,49	2,97		

Při srovnání jednotlivých konfigurací pomocí naměřených dat (tabulka 11.1 až 11.5) lze pozorovat, že účinnost a celkový tepelný tok je zcela srovnatelný, a že jediný rozdíl je ve způsobu distribuce tepla v komoře. Absolutní chyby nabývají hodnot od 0,49 do 1,05 kW/m^2 a relativní chyby od 2,53 do 4,55 %. Skoro 5 % chyba měření je poměrně vysoká, bylo by ji ovšem možné eliminovat při použití přesnějších měřících přístrojů.

11.2.2 Palivo s přídavkem N_2

Graf na obrázku 11.2 je velmi podobný obrázku 11.1. Maxima tepelných toků je opět dosaženo ve vzdálenosti 1,25 m od hořáku, načež dojde k prudkému poklesu tepelného toku. Vynesené křivky mají ovšem o něco větší rozptyl než s přídavkem oxidu uhličitého.



Obrázek 11.2: Graf – Srovnání různých průtoků N_2 a zemního plynu[6]

Tabulka 11.6: Tepelné toky – konfigurace 0 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2

Měření č. 68	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m²]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	19,12	0,87	4,55	65,97	196,66
Sekce 2	26,04	0,79	3,04		
Sekce 3	32,47	0,90	2,78		
Sekce 4	34,77	0,93	2,69		
Sekce 5	33,88	0,92	2,72		
Sekce 6	28,94	0,85	2,94		
Sekce 7	21,45	0,56	2,62		

Tabulka 11.7: Tepelné toky – konfigurace 0 m_N^3/h CO_2 30 m_N^3/h N_2

Měření č. 64	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m²]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	22,16	0,90	4,07	66,25	200,6
Sekce 2	31,60	0,89	2,80		
Sekce 3	36,81	1,00	2,70		
Sekce 4	34,67	0,94	2,70		
Sekce 5	30,84	0,89	2,88		
Sekce 6	25,32	0,83	3,29		
Sekce 7	19,19	0,54	2,81		

[6] Legenda grafu obsahuje číslo měření a množství průtoku přidaného plynu. První hodnota je množství přidaného CO_2, druhá hodnota je množství přidaného N_2. Průtoky jsou uvedeny v m_N^3/h.

Tabulka 11.8: Tepelné toky – konfigurace 0 m_N^3/h CO_2 60 m_N^3/h N_2

Měření č. 65	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	22,44	0,91	4,03	65,54	198,88
Sekce 2	33,19	0,91	2,74		
Sekce 3	37,98	1,01	2,66		
Sekce 4	34,27	0,93	2,72		
Sekce 5	29,02	0,86	2,95		
Sekce 6	23,74	0,81	3,41		
Sekce 7	18,25	0,52	2,82		

Tabulka 11.9: Tepelné toky – konfigurace 0 m_N^3/h CO_2 90 m_N^3/h N_2

Měření č. 66	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	21,79	0,8	4,08	65,02	198,51
Sekce 2	34,42	0,931	2,71		
Sekce 3	40,08	1,03	2,58		
Sekce 4	34,75	0,95	2,75		
Sekce 5	27,53	0,83	3,03		
Sekce 6	22,59	0,79	3,51		
Sekce 7	17,36	0,50	2,89		

Tabulka 11.10: Tepelné toky – konfigurace 0 m_N^3/h CO_2 120 m_N^3/h N_2

Měření č. 67	Tepelný tok	Absolutní chyba	Relativní chyba	Účinnost	Celkový tepelný tok
	[kW]	[kW/m^2]	[%]	[%]	[kW]
Sekce 1	21,99	0,91	4,15	62,32	191,76
Sekce 2	33,62	0,94	2,79		
Sekce 3	39,31	1,03	2,61		
Sekce 4	32,88	0,93	2,81		
Sekce 5	26,07	0,84	3,20		
Sekce 6	21,14	0,76	3,58		
Sekce 7	16,74	0,50	2,97		

Při srovnání jednotlivých konfigurací pomocí naměřených dat (tabulka 11.6 až 11.10) lze pozorovat, že účinnost a celkový tepelný tok je srovnatelný, a že jediný rozdíl je ve způsobu distribuce tepla v komoře. Absolutní chyby nabývají hodnot od 0,50 do 1,03 kW/m2 a relativní chyby od 2,58 do 4,55 %. Skoro 5 % chyba měření je poměrně vysoká, bylo by ji ovšem možné eliminovat při použití přesnějších měřících přístrojů.

12 ZÁVĚR

V dnešní době se mnozí dívají na spalování „skrze prsty“, ovšem tento proces je nutný k chodu průmyslových celků, díky kterým jsou získávány např. stavebniny, hnojiva, elektřina a další nutné zdroje. Tento děj tedy přináší střechu nad hlavou, jídlo, vodu a další nezbytnosti, které jsou pro lidstvo zcela běžným standardem. Je velmi důležité hledat alternativní paliva ať už z důvodu přebytku odpadních plynů, ekonomickému pohledu nebo řešení problematiky emisí. Tato práce tedy může být drobným přínosem do hledání odpovědí v problematice tohoto děje.

V teoretické části práce je věnován prostor nízko-výhřevným plynným palivům. Následně je pozornost mířena k samotnému spalování, hořákům a bezpečnosti práce během manipulace s vybranými plyny. V praktické části je popsáno zařízení v laboratoři a také průběh experimentu. Experiment probíhal při devíti různých kombinacích průtoku zemního plynu s oxidem uhličitým a zemního plynu s dusíkem. Během experimentu byly měřeny emise NO_2, emise CO, teplota spalin, teploty v plamenu a tepelné toky.

Data z měření emisí poukázala na snížení emisí při spalování NVPP oproti spalování čistě zemního plynu. K výraznému poklesu emisí došlo i při velmi malém přídavku inertního plynu. Důvodem bylo, že přídavek, ať už dusíku či oxidu uhličitého, ochladil plamen a tím došlo ke snížení emisí (podkapitola 4.3). Následovaly teploty v plamenu, které byly naměřeny pomocí termočlánků a ze získaných dat byly vytvořeny grafické vyobrazení plamene po celé délce spalovací komory. Naměřené hodnoty potvrzují závěry z měření emisí, neboť díky přídavku inertních plynů došlo k snížení teploty jádra plamene. Plamen se zkrátil a jeho distribuce v komoře byla uniformní. Výsledky z měření tepelných toků poukazují na velmi odlišnou distribuci tepla při srovnání spalování zemního plynu a zemního plynu s přídavkem inertních plynů. Přídavek CO_2 a N_2 způsobil zmodrání plamene a zvýšení jeho stability.

Vzhledem k tomu, že emisní limity průmyslových zařízení jsou stále snižovány, tak dalšími kroky, kam lze experiment posunout, by bylo spalování paliva s ještě nižší výhřevností a zpřesnění dat. Poté by bylo možné hledat limity tohoto postupu a následně by se dala data využít k ekonomickému zhodnocení pro různé odpadní plyny a metodu přídavku by bylo možné aplikovat v praxi.

Získané informace z laboratorního experimentu dokazují, že spalování nízko-výhřevných paliv je možné a je také poměrně efektivní. Pokud je k dispozici trvalý přísun odpadního plynu, tak jím lze velmi výhodně nahradit plyn zemní. Navíc spalování takového plynu je, co se emisí týče, ekologičtější. Pro spalování nízko-výhřevného paliva je ovšem zapotřebí využít speciálně upraveného hořáku a pece, což s sebou může nést finanční investici.

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Final draft of climate deal formally accepted in Paris. In: *Cable News Network* [online]. Turner Broadcasting System, Inc, 2015 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://edition.cnn.com/2015/12/12/world/global-climate-change-conference-vote/

[2] 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]. Elsevier Ltd, 2017, 2017(119), 497-503 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.077. ISSN 03605442. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216318837

[3] KUMAR, P. a D.P. MISHRA. Characterization of bluff-body stabilized LPG jet diffusion flame with N 2 dilution. *Energy Conversion and Management* [online]. Elsevier Ltd, 2008, 49(10), 2698-2703 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.04.007. ISSN 01968904. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0196890408001477

[4] LE CONG, T. a P. 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 [cit. 2017-04-19]. DOI: 10.1021/ef800832q. ISSN 08870624. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ef800832q

[5] Podíl zdrojů elektřiny použitých pro výrobu elektřiny v roce 2015. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: Skupina ČEZ, 2015 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://1url.cz/1tHpk

[6] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 858 s.

[7] NOVÁK, Jan. *Tabulky a výpočty: Výhřevnosti paliv* [online]. SEI, b.r. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv

[8] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978, 414 s.

[9] BAUKAL, Charles E. *The John Zink-Hamworthy combustion handbook. Volume 2, Design and operations*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781439839645.

[10] SVATOŠOVÁ, Irena. Plyn v objektu. *Studijní materiály TZB I.* [online]. b.r. [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/tzb-1/9.html

[11] SVOBODA, Alexandr. *Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*. 1. vyd. Praha: GAS, 1997, 1192 s. ISBN 8090233961.

[12] PEER, Václav. *Tzbinfo: Zplyňování - principy a reaktory* [online]. Ostrava, Výzkumné energetické centrum: VŠB – TU, 2016 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory

[13] TYAGUNOVA, Victoria. *Vodíková paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.

[14] PERNA, František a Rudolf RIEDL. *Plynárenství / sv. II*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1957, 517 s.

[15] Pec vysoká. *Leborelo.info* [online]. b.r. [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: https://leporelo.info/pec-vysoka

[16] CZBA. *Česká Bioplynová Asociace* [online]. b.r. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.czba.cz/bioplyn/

[17] Vlastnosti BP. *Bioprofit* [online]. b.r. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_vlastnosti.htm

[18] KÁRA, Jaroslav. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha: Vydal a vyrobil VÚZT, 2007.

[19] KRISTÝNA, ČERVENÁ. Bioplynové stanice. *Biologické metody zpracování odpadu* [online]. b.r. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/Bioplynova_stanice.html

[20] ŠKORPIL, Jan. Technologické možnosti energetického využití biomasy. *Oddělení technické ekologie* [online]. b.r. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.technicka-ekologie.zcu.cz/bie2.pdf

[21] SILVA, E. Gas Turbine performance analysis operating with low heating value fuels. *DEMEC* [online]. Sao Paulo, Brazil, 2013 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: http://demec.ufpr.br/reterm/ed_ant/21/artigos/267-2013.pdf

[22] *TOKAMAK* [online]. Encyklopedie fyziky, b.r. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/825-tokamak

[23] DLOUHÝ, Peter. Palivové články. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/588-palivove-clanky

[24] KITTEL, Hugo. *Bilance vodíku v ČESKÉ RAFINÉRSKÉ, a.s.* [online]. 2010 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.crc.cz/data/publications/APROCHEM_2010_%C4%8CeR_Kittel.pdf

[25] BAUKAL, Charles E. Jr. *Industrial Combustion Pollution and Control*. New York: Marcel Dekker, 2004, 904 s. ISBN 0824746945.

[26] NYKODÝM, Jiří. *Vliv provozních parametrů spalování a konstrukčních parametrů nízkoemisního hořáku na charakteristické parametry spalovacích procesů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 87 s., 2015.

[27] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 9788021443006.

[28] IBLER, Zdeněk. *Technický průvodce energetika*. [1.díl]. Praha: BEN- technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-026-1.

[29] *Česká technická norma - Zemní plyn* . Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

[30] SEDLÁČEK, Karel. *Plynové hořáky*. Praha: České plynárenské podniky, 1980.

[31] FÍK, Josef. Hořáky pro spalování zemního plynu III. *Tzbinfo* [online]. 2004 [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/2183-horaky-pro-spalovani-zemniho-plynu-iii

[32] From the lab to the marketplace. *Ultra-Clean Low Swirl Combustion* [online]. b.r. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: https://eetd.lbl.gov/l2m2/lowswirl.html

[33] CHEN, Allan. Low-Swirl Combustion Clears the Air. *Sciencebeat* [online]. b.r. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: http://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/EETD-low-swirl-combustion.html

[34] Low-swirl Burner. *Center for computional sciences and engineering* [online]. b.r. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: https://ccse.lbl.gov/Research/Combustion/lowSwirl.html

[35] *SciELO - Scientific Electronic Library Online* [online]. b.r. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: http://www.scielo.br/img/revistas/rmat/v15n2/14f01.gif

[36] MACENAUEROVÁ, Tereza. *Vliv vnitřní recirkulace spalin na charakteristické parametry spalování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 58 s.: Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D., 2015.

[37] AL-HALBOUNI A., GÖRNER. An Efficient Combustion Concept for Low Calorific Gases. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES* [online]. Essen, Germany: Gaswärme-Institut e. V. Essen, 2007 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: http://www.icrepq.com/icrepq07/213-al-halbouni.pdf

[38] SMITH LANCE, ETEMAD. *Catalytic Combustion* [online]. North Haven: Gas Turbine Group, Precision Combustion, Inc., 2012 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: http://jdem.cz/c5waj4

[39] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila. Dusík. *Česká asociace technických plynů* [online]. Praha: ČATP, 2014 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: http://www.catp.cz/publikace2.php?download=CATP_1_14_dusik.pdf

[40] Bezpečnostní list Vodík. *Linde gas* [online]. b.r. [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: http://jdem.cz/c5wag2

[41] VÍT, TUČEK. Vodík. *Česká asociace technických plynů* [online]. Praha: ČATP, 2004 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf

[42] Bezpečnostní značky / symboly. *Drogerie domu cz* [online]. b.r. [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: http://www.drogerie-domu.cz/image/data/_symboly/horlavy.jpg

[43] Bezpečnostní list dusík. *Linde gas* [online]. b.r. [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: http://jdem.cz/c5war8

[44] Bezpečnostní list oxid uhličitý. *Linde gas* [online]. b.r. [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: http://jdem.cz/c5was6

[45] Bezpečnostní list oxid uhelnatý. *Messer gases for life* [online]. b.r. [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: http://jdem.cz/c5wat5

[46] PERRY, Robert a Don GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. /. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 9780071422949.

[47] LAXA, Václav. *Technická ekologie: Stanovení emisních koncentrací ve spalinách plynového hořáku*. Praha: Západočeská Univerzita v Plzni, 2012.

14 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

A_i	[m^2]	plocha i-té sekce
$c_{p,i}$	[J/kg.K]	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
dT	[K]	rozdíl teplot mezi dvěma místy
dx	[m]	vzdálenost mezi dvěma místy
e^-	[-]	elektron
h	[-]	relativní hustota
H^0	[kJ/m^3]	spalné teplo (výhřevnost) směsi na objemovém základě
H^0_j	[kJ/m^3]	spalné teplo (výhřevnost) j-té složky na objemovém základě
L_i	[m]	délka i-té sekce
M_{NO}	[kg/kmol]	molekulová hmotnost NO
M_{NO2}	[kg/kmol]	molekulová hmotnost NO_2
$\dot{m}_{v,i}$	[kg/s]	hmotnostní průtok v i-té sekci
MW_i	[kg/kmol]	molekulová hmotnost i-té složky
P_H	[kW]	výkon hořáku
$\dot{Q}$	[W]	tepelný tok
$\dot{q}_i$	[W/m^2]	hustota tepelného toku v i-té sekci
$\dot{q}_i$	[W/m^2]	měrný tepelný tok
$\dot{Q}_i$	[W]	tepelný tok v i-té sekci
Q_n	[kJ/m^3]	výhřevnost paliva
Qs	[MJ/m^3]	spalné teplo
R	[$J.mol^{-1}.K^{-1}$]	molární plynová konstanta
S	[m^2]	povrch stěny
S	[-]	spalovací poměr
T	[K]	teplota
T	[K]	teplota spalin
T_0	[K]	teplota 0 °C v Kelvinech
T_2	[K]	absolutní teplota v Kelvinech
$t_{in,i}$	[°C]	vstupní teplota chladící vody do i-té sekce
$t_{out,i}$	[°C]	výstupní teplota chladící vody z i-té sekce
T_w	[K]	teplota povrchu stěny
$\dot{V}_i$	[m^3/s]	objemový průtok v i-té sekci

V_{ph}	[m^3/h]	množství plynného paliva
V_{vh}	[m^3/h]	množství spalovacího vzduchu
W	[MJ/m^3]	Wobbeho číslo
X	[ppm]	naměřená koncentrace NO nebo NO_2
x_i	[kg/kg]	hmotnostní podíl i-té složky
x_j	[-]	objemová koncentrace j-té složky
Y	[mg/m_N^3]	přepočítaná koncentrace NO nebo NO_2
Δt_i	[°C]	rozdíl teplot chladící vody na vstupu a výstupu do komory
Δt_i^2	[$°C^2$]	rozdíl teplot na vstupu a výstupu do komory umocněn na druhou
α	[$W/(m^2 \cdot K)$]	součinitel přestupu tepla
ε	[-]	emisivita
λ	[$W/(m \cdot K)$]	tepelná vodivost
ρ^0	[kg/m^3]	hustota ideálního plynu
ρ_i	[kg/m^3]	hustota vody v závislosti na teplotě
σ	[$W/(m^2K^4)$]	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\sigma^2_{tin,i}$	[-]	přesnost použitého teploměru
$\sigma^2_{tout,i}$	[-]	přesnost použitého teploměru
σ_{qi}	[W/m^2]	absolutní chyba měření
σ_{Vi}	[-]	součin největší dovolené chyby průtokoměru a naměřené hodnoty
σ_x	[-]	relativní chyba

Chemické sloučeniny

C	uhlík
CH_3OH	metanol
CH_4	metan
C_nH_m	vyšší uhlovodíky
CO	oxid uhelnatý
CO_2	oxid uhličitý
H	atom vodíku
H_2	molekula vodíku
H_2O	voda
N	atom dusíku
N_2	molekula dusíku

NH_3	amoniak
NO	oxid dusnatý
NO_x	oxidy dusíku
O	atom kyslíku
O_2	molekula kyslíku
S	síra
SiC	karbid křemíku

Zkratky

ČOV	čistírna odpadních vod
ČSN	česká technická norma
DN	nominální průměr
ES	Evropská norma
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
LCD	liquid-crystal display (Displej z tekutých krystalů)
LPG	liquified petroleum gas (Tekutý ropný plyn)
NVPP	nízko-výhřevné plynné palivo
UCLSC	velmi čisté spalování s malým vířením

15 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Srovnání způsobů výroby elektřiny v ČR [5] 13
Obrázek 2.2: Průběh procesů v reaktoru [12] 20
Obrázek 2.3: Vysoká pec [15] 22
Obrázek 2.4: Schéma bioplynové stanice [19] 25
Obrázek 3.1: Schéma membránového palivového článku [23] 27
Obrázek 4.1: Vznik NO v závislosti na teplotě [28] 32
Obrázek 5.1: Hořák pro spalování generátorového plynu [11] 36
Obrázek 5.2: Schéma ejekčního hořáku [11] 38
Obrázek 5.3: Schéma vířivého hořáku [31] 39
Obrázek 5.4: Schéma blokového hořáku [31] 40
Obrázek 5.5: a) Vířivá tryska UCLSC, b) Vyvýšený plamen [34] 41
Obrázek 5.6: Schématické zobrazení porézního hořáku [2] 42
Obrázek 5.7: Porézní vrstva SiC [35] 42
Obrázek 5.8: Vícestupňové spalování [36] 43
Obrázek 5.9: Schématické znázornění spalování s katalyzátorem [38] 43
Obrázek 6.1: Označení extrémně hořlavých látek [42] 45
Obrázek 7.1: Zkušebna hořáků VUT 48
Obrázek 7.2: Technologické schéma zkušebny hořáků. 49
Obrázek 7.3: Model hořáku LPH-1000 50
Obrázek 7.4: Směšovací aparatura 52
Obrázek 7.5: Svazek zamrzlých lahví CO_2 52
Obrázek 8.1: Plamen při konfiguraci 60 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.62 53
Obrázek 8.2: Plamen při konfiguraci 30 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.63 54
Obrázek 8.3: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 30 m_N^3/h N_2 měření č.64 54
Obrázek 8.4: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 60 m_N^3/h N_2 měření č.65 54
Obrázek 8.5: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 90 m_N^3/h N_2 měření č.66 55
Obrázek 8.6: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 120 m_N^3/h N_2 měření č.67 55
Obrázek 8.7: Plamen při konfiguraci 0 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.68 55
Obrázek 8.8: Plamen při konfiguraci 90 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.69 56
Obrázek 8.9: Plamen při konfiguraci 120 m_N^3/h CO_2 0 m_N^3/h N_2 měření č.70 56
Obrázek 9.1: Graf - vliv množství N_2 na emise 59
Obrázek 9.2: Graf – vliv množství CO_2 na emise 59
Obrázek 10.1: Měření č. 62 vykreslení plamene (60 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2) 61
Obrázek 10.2: Měření č. 63 vykreslení plamene (30 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2) 61
Obrázek 10.3: Měření č. 64 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 30 m_N^3/h N_2) 61
Obrázek 10.4: Měření č. 65 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 60 m_N^3/h N_2) 61
Obrázek 10.5: Měření č. 66 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 90 m_N^3/h N_2) 62
Obrázek 10.6: Měření č. 67 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 120 m_N^3/h N_2) 62
Obrázek 10.7: Měření č. 68 vykreslení plamene (0 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2) 62
Obrázek 10.8: Měření č. 69 vykreslení plamene (90 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2) 62

Obrázek 10.9: Měření č. 70 vykreslení plamene (120 m_N^3/h CO_2, 0 m_N^3/h N_2).....63
Obrázek 11.1: Srovnání různých průtoků CO_2 a zemního plynu[5].....66
Obrázek 11.2: Graf – Srovnání různých průtoků N_2 a zemního plynu[6].....69

16 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Srovnání paliv podle výhřevnosti [7] 15
Tabulka 2.2: Srovnání plynných paliv I. [8] 18
Tabulka 2.3: Srovnání plynných paliv II. [8] 18
Tabulka 2.4: Vlastnosti generátorového plynu z černého uhlí [8] 19
Tabulka 2.5: Vlastnosti Vodního plynu [8] 22
Tabulka 2.6: Vlastnosti Kychtového plynu [8] 23
Tabulka 2.7: Vlastnosti Dvojplynu [8] 23
Tabulka 2.8: Vlastnosti Bioplynu [17] 24
Tabulka 7.1: Plán měření 51
Tabulka 9.1: Naměřená data emisí 58
Tabulka 11.1: Tepelné toky – konfigurace 0 CO_2 0 N_2 67
Tabulka 11.2: Tepelné toky – konfigurace 30 CO_2 0 N_2 67
Tabulka 11.3: Tepelné toky – konfigurace 60 CO_2 0 N_2 67
Tabulka 11.4: Tepelné toky – konfigurace 90 CO_2 0 N_2 68
Tabulka 11.5: Tepelné toky – konfigurace 120 CO_2 0 N_2 68
Tabulka 11.6: Tepelné toky – konfigurace 0 CO_2 0 N_2 69
Tabulka 11.7: Tepelné toky – konfigurace 0 CO_2 30 N_2 69
Tabulka 11.8: Tepelné toky – konfigurace 0 CO_2 60 N_2 70
Tabulka 11.9: Tepelné toky – konfigurace 0 CO_2 90 N_2 70
Tabulka 11.10: Tepelné toky – konfigurace 0 CO_2 120 N_2 70

17 OBSAH DVD

Název	Cesta k dokumentu
Diplomová práce	..\Diplomová práce_Matěj Kvapil.pdf
Měřící listy	..\Měřící listy.xlsx
Výpočet emisí	..\Výpočet emisí.xlsx
Výpočet tepelných toků, chybová analýza	..\Výpočet tepelných toků, chybová analýza.xlsx
Výpočet Výhřevnosti, Spalného tepla, hustoty	..\Výpočet Výhřevnosti, Spalného tepla, hustoty.xlsx