



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VLIV TYPU ATOMIZAČNÍHO MÉDIA NA KVALITU
SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV**

THE INFLUENCE OF ATOMIZING MEDIA ON THE QUALITY OF THE COMBUSTION OF LIQUID FUELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Bojanovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Jiří Bojanovský
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.
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:

Vliv typu atomizačního média na kvalitu spalování kapalných paliv

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Průmyslové aplikace jako jsou ohřev procesních látek (voda, ropa apod.) nebo zpracování materiálů (kovových, nekovových, sklářských písků apod.) získávají potřebnou tepelnou energii spalováním plyných, kapalných a tuhých paliv. Při každém spalovacím procesu vznikají kromě tepelné energie i tzv. emise, které jsou škodlivé a nežádoucí. Nejvýznamnější jsou emise oxidů dusíku (zkráceně NO_x), oxidu uhelnatého (CO) a oxidy síry (SO_x). Další emise tvoří oxidy síry, tuhé znečišťující látky, těkavé látky aj. Z tohoto důvodu jsou kladeny na spalovací stacionární zdroje přísné požadavky pro splnění emisních limitů při spalování těchto paliv a proto je nutné se zabývat výzkumem a vývojem v oblasti potlačení tvorby emisí.

Předmětem této práce bude vyhodnotit vliv typu atomizačního média na kvalitu spalování kapalného paliva rostlinného původu. Atomizačním médiem bude studený a přehřátý tlakový vzduch, a přehřátá pára. Pro atomizaci paliva bude použita dvoumédiová effervescentní tryska s maximálním výkonem cca 100 kg/h oleje instalovaná na kombinovaném hořáku plyn/olej. Při spalovacích zkouškách budou sledovány emise NO_x, CO a SO_x, teplota spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory, stabilita hoření bez podpory stabilizačního hořáku, usazování paliva na dně spalovací komory, tvar a barva plamene.

Cíle diplomové práce:

- 1) Literární rešerše v oblasti spalování kapalných paliv ropného a rostlinného původu.
- 2) Souhrn současných emisních limitů pro stacionární zdroje o různém spalovacím výkonu.
- 3) Příprava a provedení spalovacích zkoušek vybraného kapalného paliva na zkušebně hořáků Ústavu procesního inženýrství.
- 4) Zpracování experimentálních dat a jejich zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

ALONSO, J.S.J. et al. A note on the combustion of blends of diesel and soya, sunflower and rapeseed vegetable oils in a light boiler. *Biomass and Bioenergy*. 2008, 32, 880-886. ISSN 0961-9534.

BASHA, S.A., GOPAL, K.R., JEBARAJ, S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 13, 1628-1634. ISSN 1364-0321.

ALONSO, J.S.J. et al. Combustion of rapeseed oil and diesel oil mixtures for use in the production of heat energy. *Fuel Processing Technology*. 2006, 87, 97-102. ISSN 0378-3820.

NG, H.K., GAN, S. Combustion performance and exhaust emissions from the non-pressurised combustion of palm oil biodiesel blends. *Applied Thermal Engineering*. 2010, 30, 2476-2484. ISSN 1359-4311.

SOUZA, R. et al. Evaluation of the performance of biodiesel from waste vegetable oil in a flame tube furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2009, 29, 2562-2566. ISSN 1359-4311.

TATE, R.E. et al. The densities of three biodiesel fuels at temperatures up to 300 degrees of Celsius. *Fuel*. 2006, 85, 1004-1009. ISSN 0016-2361.

LEFEBVRE, A. *Atomization and Sprays*. CRC Press, 1989. ISBN 978-0891166030.

SOVANI, S.D., SOJKA, P.E., LEFEBVRE, A.H. Effervescent atomization. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2001, 27, 483-521. ISSN 0360-1285.

KERMES, V., BĚLORHADSKÝ, P. Biodiesel (EN 14213) heating oil substitution potential for petroleum based light heating oil in a 1 MW stationary combustion facility. *Biomass and Bioenergy*. 2013, 49, 10-21. ISSN 0961-9534.

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 experimentální zjištění vlivu atomizačního média na charakteristické parametry spalování kapalných paliv, konkrétně methylesteru řepkového oleje. Měření probíhalo na horizontální, vodou chlazené spalovací komoře. K rozprašování paliva byl použit pneumatický způsob atomizace užitím effervescentní trysky. Jako atomizační médium byl během zkoušek použit tlakový vzduch a přehřátá pára. Spalování probíhalo při $GLR = 15, 20$ a 25% . Měřené a sledované parametry spalování zahrnovaly emise NO_x a CO , teplotu spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory, stabilitu hoření bez podpory stabilizačního hořáku, usazování paliva na dně spalovací komory a tvar a barvu plamene. Z výsledků zkoušek vyplývá, že při atomizaci paliva tlakovým vzduchem je dosaženo vyšší termické účinnosti o přibližně 6% , zároveň však dochází k navýšení emisí NO o 15 mg/m_N^3 v důsledku zvýšení teplot v plamenu v porovnání s přehřátou párou.

KLÍČOVÁ SLOVA

spalování, atomizace, kapalné palivo, emise

ABSTRACT

The aim of the present work was to experimentally investigate the influence of atomizing medium on combustion properties of methyl-ester of rapeseed oil. The experiments were carried out in a water-cooled horizontal combustion chamber. The pneumatic atomization using effervescent atomizer was used in test. As atomizing medium compressed air and superheated steam was chosen. The tests were performed at $GLR = 15, 20$ and 25% . The experiments were focused on the investigation of the flame characteristics, quality of combustion, emissions, temperature of flue gas, distribution of heat fluxes and stability of combustion. Results revealed that atomization by compressed air is more efficient (approximately by 6%), on the other hand it leads to higher NO emissions (for 15 mg/m_N^3 due to higher in-flame temperature).

KEYWORDS

combustion, atomization, liquid fuel, emissions



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOJANOVSKÝ, J. *Vliv typu atomizačního média na kvalitu spalování kapalných paliv*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 20. září 2017

.....

Bc. Jiří Bojanovský



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své práce Ing. Petru Bělohradskému, Ph.D. za cenné připomínky, ochotu a trpělivost při vedení této diplomové práce.



OBSAH

Úvod	10
Cíle diplomové práce:.....	11
1 Současný stav poznání v oblasti spalování kapalných paliv	12
2 Emise oxidů dusíku	16
2.1 Popis plynů spadající do skupiny NO _x	16
2.2 Tvorba NO _x	16
2.2.1 Termický NO	16
2.2.2 Promptní NO	17
2.2.3 Palivový NO	18
2.3 Metody pro snížení NO _x	18
2.3.1 Nulté redukční metody	18
2.3.2 Primární redukční metody	19
2.3.3 Sekundární redukční metody	20
3 Současné emisní limity pro stacionární zdroje o různém spalovacím výkonu.....	21
4 Přenos tepla při spalování.....	24
4.1 Přenos tepla radiací	24
4.2 Přenos tepla konvekcí	24
4.3 Přenos tepla kondukcí	25
5 Rozprašování kapalného paliva.....	26
5.1 Typy kapalných paliv.....	26
5.2 Fyzikálně-chemické vlastnosti kap. paliv	27
5.3 Typy atomizérů	28
5.3.1 Tlakové atomizéry	28
5.3.2 Rotační atomizéry	30
5.3.3 Pneumatické atomizéry.....	31
6 Popis experimentálního zařízení.....	33
6.1 Spalovací komora	33
6.2 Doprava paliva	34
6.3 Spalovací vzduch	34
6.4 Atomizační médium.....	34
6.5 Hořák	34
6.6 Atomizér	34
6.7 Palivo	36
6.8 Měření emisí	37
6.8.1 Spalinový analyzátor Siemens ULTRAMAT 23	38



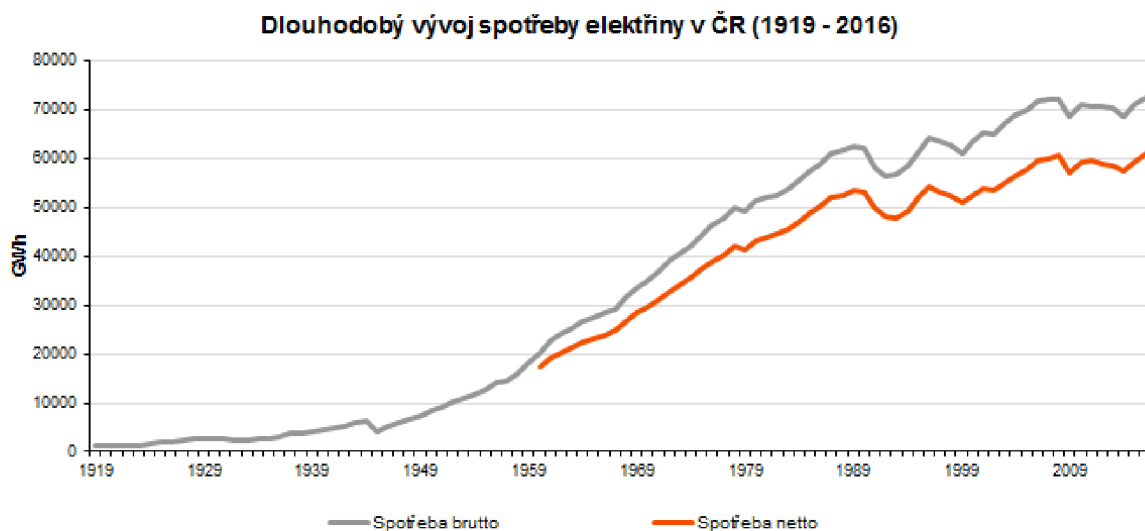
6.8.2	Spalinový analyzátor ABB EL 3020	38
7	Plán měření experimentu	39
8	Výsledky	40
8.1	Základní parametry nastavení spalovacího systému	40
8.2	Emise NO a CO	40
8.3	Teplota spalin	42
8.4	Rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory	42
8.5	Rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory	46
8.5.1	Podstata měření prostřednictvím termočlánků	46
8.5.2	Vlastní výsledky měření	48
8.6	Stabilita hoření bez podpory stabilizačního hořáku	49
8.7	Usazování paliva na dně spalovací komory	49
8.8	Tvar a barva plamene	49
8.9	Stanovení chyby měření tepelných toků	50
	Závěr	52
	Seznam obrázků	56
	Seznam tabulek	57
	Seznam použitých symbolů a zkratk	58
	Seznam chemických prvků a sloučenin	60

ÚVOD

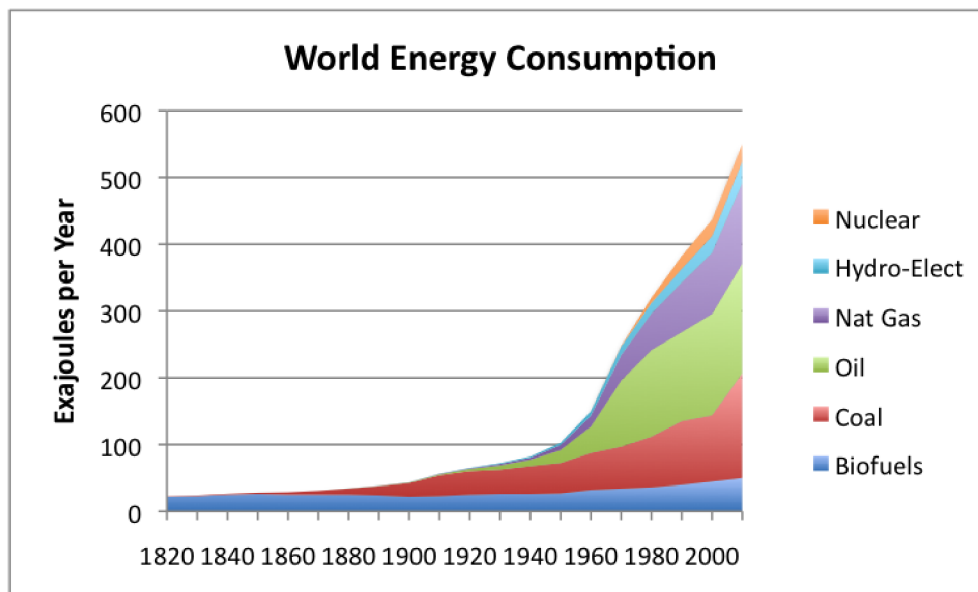
Převážná většina průmyslových procesů potřebuje ke svému správnému průběhu stále větší množství energie. Vzhledem k demografickému vývoji, kdy na Zemi žije stále více obyvatel, je tento trend obdobný i pro výrobu tepelné a elektrické energie do domácností. Mnoho průmyslových procesů produkuje kapalný odpad, jehož jedinou možnou ekologickou likvidací je právě spalování. Z tohoto úhlu pohledu je patrné, že zvyšování efektivity a snižování ekologické náročnosti spalování kapalných paliv je strategicky, ekonomicky a ekologicky velmi významné [1].

Trend zvyšování spotřeby energie dokládají obrázky 1 a 2. Na obrázku 1 je zobrazen graf dlouhodobého vývoje spotřeby elektrické energie v České republice v letech 1919 až 2016. Za necelých 100 let se spotřeba elektrické energie v ČR zvýšila téměř 35x. Obrázek 2 obsahuje vývoj světové spotřeby veškeré energie v letech 1820 až 2010. Díky barevnému rozlišení jednotlivých paliv použitých k výrobě energie lze také sledovat trend navyšování spotřeby uhlí a ropy. Přestože je v bohatých zemích kladen důraz na snižování emisí a podporu výroby jaderné energie nebo energie z obnovitelných zdrojů, celosvětově je patrný růst spotřeby uhlí a ropy. Vysvětlení absence jaderné energie v chudých oblastech lze najít jednoduše ve vysoké ekonomické náročnosti výstavby a provozu jaderných elektráren a také nedostatku vzdělaného personálu pro obsluhu takové elektrárny [2].

Spalování kapalných paliv za účelem výroby tepelné a elektrické energie je v porovnání s jadernou energií mnohem méně náročné na výstavbu i provoz. To je pravděpodobně jedním z důvodů stále se zvyšující spotřeby ropy. Dalším a pravděpodobně významnějším důvodem je nárůst automobilové, kamionové, lodní a letecké dopravy. Zefektivňování spalování kapalných paliv v motorech však není obsahem této práce.



Obrázek 1 Dlouhodobý vývoj spotřeby elektřiny v ČR [1]



Obrázek 2 Dlouhodobý vývoj světové spotřeby energie dle paliva [3]

Tato diplomová práce řeší problematiku spalování kapalných paliv za účelem výroby tepelné a elektrické energie. Jedná se o relativně složitý proces, který lze stále vylepšovat a optimalizovat. Zvýšení efektivity a snížení emisí při spalování kapalných paliv jsou hlavní motivací této diplomové práce. Prostředků k dosažení lepší kvality spalování existuje celá řada, zde je důraz kladen na vyhodnocení vlivu atomizačního média.

Komplexní měření všech myslitelných nastavení a jejich následné vyhodnocení není z časových důvodů možné. Vlastní experiment je zaměřen na sledování emisí NO_x a CO , teploty spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory, stabilitu hoření bez podpory stabilizačního hořáku, usazování paliva na dně spalovací komory a na tvar a barvu plamene.

CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE:

Práce je zaměřená na zjištění vlivu atomizačního média na spalování kapalných paliv. Pozornost je věnována zejména na kvalitu spalování, jeho účinnost a emise. Cíle práce lze shrnout následovně:

- rešerše doposud uskutečněného výzkumu a experimentů v oblasti spalování kapalných paliv ropného a rostlinného původu,
- shrnutí současných emisních limitů pro stacionární zdroje o různém spalovacím výkonu,
- popis experimentálního zařízení na zkušební hořáků Ústavu procesního inženýrství VUT v Brně,
- příprava a provedení spalovacích zkoušek vybraného kapalného paliva,
- zpracování experimentálních dat a jejich vyhodnocení.

1 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV

Problematika atomizace kapalných paliv a spalování těchto surovin obecně je diskutovaným tématem již dlouhou dobu [5]. Velká část experimentů byla provedena za účelem zjištění možností náhrady fosilních paliv palivy z obnovitelných zdrojů, např. methylesterem řepkového oleje (MEŘO). Právě tento druh paliva byl použit při měřeních pro tuto práci.

Při čerpání a spalování paliv o vyšší viskozitě bývají problémy s jeho rozprašováním apod. Řešením může být předehřev paliva na vyšší teplotu, což má za následek snížení viskozity a hustoty. Pro případ spalování MEŘA bylo na experimentálním zařízení, stejném jako probíhalo měření pro tuto práci, zjištěno, že vhodná teplota předehřevu paliva je 70 °C. Při vyšších teplotách již nebylo zjištěno zlepšení atomizace, a navíc docházelo k poměrně výraznému nárůstu emisí NO_x [4].

Effervescentní rozprašování je metoda (počátky lze nalézt v devadesátých letech 20. století) dvoumédiové atomizace, ve které je palivo směřováno s atomizačním médiem (nejčastěji párou nebo tlakovým vzduchem) ještě před výstupem z trysky. Na výstupu z trysky dochází v důsledku expanze molekul atomizačního média k rozprášení proudu kapalného paliva na malé kapičky. Jedná se o odlišnou metodu v porovnání s ostatními metodami atomizace (např. tlakovou a mechanickou), která dosahuje výrazně lepších výsledků v podobě menších částic vystupujících z trysky, a to dokonce i za sníženého tlaku vstřikovaného paliva [5].

Alonso a kol. [6] se zabýval směsmi ELHO (extra-light heating oil) a řepkových olejů na boileru o výkonu 26 kW. Pozornost byla věnována směsím ELHO a biodieselu, tzn. methylesterů nebo ethylesterů mastných kyselin. Při měření docházelo k problémům se stabilitou hoření. Pokud podíl biodieselu překročil hranici 30 %, bylo problematické i zapálení směsi.

Rozprašováním vodoolejových emulzí vzduchem v effervescentních atomizérech se zabýval Ochowjak [7]. Průtok paliva se při měření pohyboval od 5,04 do 39,6 kg/h, vypočtené GLR (gas-to-liquid ratio) pak od 1,4 do 57 %. Při testování bylo využito digitální mikrofotografické metody. Z výsledků vyplývá, že velikost rozprášených částic se velmi liší v závislosti na nastavení systému. Bylo zjištěno, že na kvalitu atomizace má vliv nejen viskozita paliva, ale také jeho povrchové napětí. Z textu dále vyplývá, že na SMD (Sauter Mean Diameter) mají vliv toky atomizačního média a paliva, konstrukce trysky a fyzikálně-chemické vlastnosti paliva. Z výsledků je zřejmý velký vliv geometrie trysky na její charakteristiky. SMD se zvyšuje se zvětšujícím se výstupním otvorem trysky. Tento vliv je při změně z 2 na 6 mm dvojnásobný.

Zhifang Chen [8] se ve své práci zabýval zjišťováním vlivu teploty na velikost rozprášených částic a vznikem kavitace uvnitř trysky. Jako palivo byl zvolen methanol předehřátý na teploty 25, 50, 60, 70 a 80 °C. Vznik kavitace v trysce byl testován za tlaku paliva 3, 4 a 5 bar.

Vliv různé viskozity paliva při atomizaci v tzv. Y trysce effervescentního atomizéru zkoumal Li [9]. Jako palivo zvolil průmyslový glycerín, vodu a jejich dva roztoky o viskozitách 1,3; 30 a 120 mPa·s. Jako atomizační médium byl použit vzduch, GLR odpovídalo hodnotám 2, 5, 10, 15 a 20 %. Průtok paliva při experimentu byl 41 až 396 kg/h a jeho tlak 1, 3 a 5 bar. Nejlepší kvalitu rozprášení vykazovala tryska v axiální vzdálenosti 150 mm, SMD záviselo zejména na GLR, méně už na viskozitě či tlaku. Velký rozdíl SMD byl však zjištěn při nárůstu viskozity na 120 mPa·s. Při testovaném vyšším tlaku paliva a GLR byl zaznamenán

ve větší vzdálenosti od trysky (250 nebo 400 mm) větší vliv viskozity na SMD. Autor uvádí, že na střední průměr částic má větší vliv GLR než tlak paliva.

Yokoi a kol. [10] se zaměřili na testování vlivu vysokého vstupního tlaku paliva na kvalitu spalování a jeho emise. Jako palivo byla zvolena nafta o průtoku 3 l/h a vstupních tlacích 200, 400, 600 a 800 bar. Při testování rozprašování (bez spalování) se při zvyšování vstupního tlaku paliva zvýšila šířka útvaru rozprašovaného média a zároveň se snížil střední průměr rozprašených částic SMD. Při spalování bylo za zvýšeného vstupního tlaku paliva pozorováno zvýšení emisí hydroxidů, ale také snížení oxidů dusíku NO_x . Z výsledků vyplývá, že zvýšení vstupního tlaku paliva může snížit emise NO_x a zlepšit kvalitu spalování.

Problematikou spalování roztoků glycerolu se zabýval Ochowjak [11]. Práce byla zaměřena na zjišťování vztahů mezi výpustním koeficientem C_D a viskozitou. Test probíhal při průtoku paliva od 5,04 do 39,6 kg/h s odpovídajícím GLR 1,4 – 57 %. Atomizačním médiem byl vzduch a teplota mírně přehřátého paliva dosahovala hodnoty cca 35 °C. Výpustní koeficient C_D je velmi významný parametr effervescentních atomizérů popisující jejich průchodnost kapalinou. Z textu vyplývá, že vztah mezi viskozitou a výpustním koeficientem je nepřímo úměrný, tedy C_D se snižuje s rostoucí viskozitou. Vliv viskozity na C_D je větší pro menší GLR. Pro GLR okolo 10 % je vliv viskozity na C_D zanedbatelný. C_D je nelineární funkcí GLR.

Spalování za použití velmi přehřátého vzduchu (1200 °C) bylo testováno na zařízení s použitím jednoho nebo dvou atomizérů umístěných v horní a dolní části spalovací komory. Za těchto teplot docházelo k silnému nárůstu oxidů dusíku ve spalinách, což bylo řešeno pomocí přímého vstříkávání do pece a zpětným prouděním spalin do spalovací komory [12].

Na energetickém ústavu VUT v Brně se doc. Jedelský zabýval problematikou charakteristiky rozprašování a distribuce paliva v effervescentních průmyslových hořácích [13]. Veškeré testování probíhalo za nezvýšené teploty (bez přehřevu). Jako testované rozprašované médium byla použita voda, atomizačním médiem byl zvolen vzduch. Testovaný tlak vody na vstupu do atomizéru byl 2, 5 a 10 bar. GLR se pohybovalo v rozmezí 3, 5 a 10 % v závislosti na tlaku paliva (nižší tlak odpovídá vyššímu GLR). Testováno bylo několik různých atomizérů lišících se geometrií. Z výsledků je patrné, že vnitřní geometrie má velký vliv na kvalitu rozprašení, což vede ke zlepšení kvality spalování.

Během testování effervescentního atomizéru s tryskou s jedním otvorem bylo při spalování lehkého topného oleje a atomizací pomocí vzduchu doc. Jedelským z VUT zjištěno, že nárůst GLR v rozmezí 2 – 10 % vede ke zvýšení rychlosti vstříkovaných částic v celém prostoru komory, zejména pak v ose trysky. Z výsledků také vyplývá, že zvýšení GLR vede ke zmenšení vrcholového úhlu rozprašovaného útvaru pro všechna nastavení atomizéru. Zvýšení atomizačního tlaku v rozmezí 0,1 – 0,5 MPa způsobil nárůst rychlosti skrz celý radiální profil [14].

Sestavením vzájemných vztahů mezi jednotlivými charakteristikami spalování se zabýval Chen [15]. Cílem bylo stanovit závislost mezi SMD a viskozitou paliva, vstupním tlakem paliva a vstupním tlakem atomizačního média. Využil k tomu původní data, samotným měřením se v této práci nezabýval. Viskozity měřených paliv se pochybovaly v rozmezí $9,71 \cdot 10^{-4}$ Pa·s a $1,207 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, vstupní tlaky paliva od 1 do 10 bar a vstupní tlaky atomizačního média od 0 do 2000 Pa. Zjistil, že faktor, který nejvíce ovlivňuje SMD, je vstupní tlak paliva. Zvyšování vstupního tlaku atomizačního média nemusí vždy vést ke zlepšení atomizace. Proložení bodů vypočtenými křivkami lze považovat za relativně velmi přesné. Koeficient determinace odpovídá hodnotě $R^2 = 0,9339$.



Ma [16] se zaměřuje na spalování ropných splaškových kalů. Jedná se o visko-elastickou newtonovskou kapalinu, jejíž atomizace je v běžných atomizérech velmi obtížná. Toto palivo obsahuje ropný kal, splaškovou vodu a určité množství chemických přísad. Ropné částice jsou silně hydrofobní, což negativně ovlivňuje proces atomizace. Testování probíhalo v effervescentním atomizéru při průtoku paliva 90 – 210 kg/h. Atomizačním médiem byl vzduch. Vypočtené GLR odpovídalo hodnotě 2 – 12 %. Z výsledků vyplývá, že rozprášení lze vylepšit použitím menšího výstupního otvoru a vyššího vstřikovacího tlaku paliva.

Porovnání možností atomizace methylesteru canoly (CME) a nafty se zabýval Erazo [17]. Spalování probíhalo v průhledné spalovací komoře za atmosférického tlaku za přídavného proudění předehřátého vzduchu. Palivo bylo dopravováno do komory skrz vířivý atomizér (tzv. swirl-type air-blast atomizér) o průměru vstřikovače 0,3 mm. Axiální a radiální rychlost rozprášených částic byla stejně jako jejich průměr měřena Dopplerovým analyzátozem. Zároveň byla měřena distribuce NO, CO, CO₂ a O₂. Průtoky paliva, spalovacího i atomizačního média byly konstantní při měření obou paliv. Hodnota průtoku atomizačního média (vzduchu) odpovídala 379,2 l/h, spalovacího vzduchu 3480 l/h a paliva 0,276 l/h. Spalovací vzduch byl v případě nafty předehřátý na teplotu 100 °C, v případě CME na teplotu 232 °C. Střední průměr částic SMD byl zaznamenán menší pro methylester canoly, což naznačuje snazší vypaření paliva. Teplota plamene v případě CME klesala rychleji jak v radiálním, tak v axiálním směru. Emise NO a CO byly nižší v případě spalování CME.

Doc. Jedelský se také zabýval optimalizací konstrukce atomizéru u dalších kapalných paliv, přesněji polymerního roztoku krakovaného oleje. Jako atomizační médium byla využita pára. Při testování dvou odlišných paliv popisuje nutnost zajištění nezávislého průtoku jednotlivých kapalin. Krakovaný olej byl rozprašován Y-tryskou vybavenou v prstencové části 6 výstupními otvory. Pro atomizaci polymerního roztoku byla využita effervescentní tryska. Oproti výsledkům provedených s původním atomizérem bylo dosaženo o 3 – 30 % nižších emisí sazí a o 5 – 20 % vyšších emisí NO_x. Navíc bylo zjištěno, že v případě nové konstrukce je dosaženo stabilnějšího plamene a lepšího spalování [18].

Gong [19] popsal a testoval vířivý plynokapalinový atomizér. Cílem práce bylo stanovit závislosti, které poskytnou návod na sestavení vhodné konstrukce atomizéru. Jako atomizační médium byl zvolen vzduch, místo těžkého topného oleje, pro který je atomizér primárně určen, byla při testování využita voda. GLR se při testování pohybovalo od 4 % do 6 %. Průtok vody byl 100 kg/h, průtok vzduchu byl 5,45 kg/h. V práci jsou studovány nastavené parametry, GLR a viskozita paliva a jejich vliv na výstupní koeficient.

V dnešní moderní době má význam při vylepšování spalování a proudění tekutin obecně numerické modelování. Jedná se o tzv. metodu CFD, kterou se mimo jiné zabýval Rahman přímo na effervescentních tryskách [20]. Jako palivo byla zvolena voda rozprašovaná vzduchem při odpovídajícím GLR 1 – 4 %. Distribuce a velikost částic vzniklých rozprašováním byla měřena za použití Eulerovy-Eulerovy dvoukapalinové balanční metody. Výsledky ukazují, že SMD se zmenšuje se zvyšující se radiální vzdáleností od střednice trubky ve všech zkoušených tryskách. V jedné ze tří zkoumaných trysek bylo díky několika konvergentním a divergentním sekcím dosaženo vyššího turbulentního proudění, což mělo za následek rozprášení větších částic na menší, na rozdíl od ostatních dvou trysek. Trysky, které vykazují pouze konvergentní sekci, mají tendenci produkovat částice o větším průměru.

Spalování olejů rostlinného původu (např. z bavlňených semen) vyžaduje modifikaci komerčních kotlů uzpůsobených původně ke spalování topných olejů. Tato problematika byla řešena např. na kotli typu Riello 40N10 [21]. Testování probíhalo za vstupních tlaků paliva v rozmezí 16 – 28 bar. Průtok rostlinného oleje při měření odpovídal hodnotě 6,85 kg/h,

u porovnávaného topného oleje pak 5,8 kg/h. Z výsledků vyplývá, že modifikace daného kotle na spalování oleje z bavlněných semen je možná. Jako optimální nastavení u tohoto kotle lze označit vstupní tlak paliva o hodnotě 28 bar a jeho přehřátí na teplotu 125 °C. Pokud jsou dodrženy tyto parametry, kvalita spalování i emise jsou podobné jako při použití topných olejů ropného původu.

Na univerzitě v Bukurešti se tým kolem Oprea [22] zaměřil na shrnutí problematiky optimalizace nastavení jednotlivých charakteristik spalování. Detailně popisuje vliv geometrie trysky, vstupního tlaku paliva apod. V práci se vyskytuje celá řada geometrických vztahů, které je dobré brát v úvahu při konstrukci atomizéru.

Podobně jako je výše zmíněný článek zaměřený na konstrukci atomizéru, práce vzniklá na půdě VUT v Brně popisuje proceduru, kterou lze použít ke vhodnému stanovení všech potřebných parametrů spalování. Volba vhodné geometrie zařízení je stejně jako vhodné nastavení průtoků, tlaků a GLR často velmi obtížná. Závisí na spalovaném palivu, jeho teplotě, složení, viskozitě, množství a velikosti tuhých částic apod. Článek je mimo jiné zaměřen na optimalizaci velikosti výstupních otvorů, velikosti směšovací komory (vnitřní průměr a délka) a počet, velikost a umístění aeračních otvorů [23].

Rozprašováním ve vnitřně směšovacím atomizéru (tzv. *internal-mixing*) se zabýval Li. [24]. Testování probíhalo za použití vody a vzduchu při tlaku 1, 2, 3, 4 a 5 bar, GLR se pohybovalo od 2 % do 20 %. Průtok paliva dosahoval hodnoty 41 – 240 kg/h. Bylo zjištěno, že hlavní vliv na kvalitu směšování má hodnota GLR. Se zvyšujícím se GLR se mění tok z přechodového na prstencový. Dále zvýšení GLR má za následek zmenšení SMD za všech testovaných podmínek. Z výsledků měření vyplývá, že optimální tlak paliva na vstupu do atomizéru je 2 – 3 bar, což je mez, kdy se v důsledku tohoto navýšení tlaku vrstva kapaliny stává tenčí.

2 EMISE OXIDŮ DUSÍKU

Emise jsou souhrnným názvem pro nežádoucí vedlejší produkty vznikající při spalování paliv. Mezi tyto produkty patří sloučeniny oxidů dusíku NO_x , oxidů síry SO_x , pevné částice, popílek atd. Prvky těchto sloučenin mohou pocházet z paliva, nebo z okysličovadla (vzduchu) [25].

2.1 POPIS PLYNŮ SPADAJÍCÍ DO SKUPINY NO_x

Nejčastější oxidační formy oxidů dusíku jsou oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO_2 . Pro tyto dvě sloučeniny bylo zavedeno souhrnné označení NO_x . Dále do této skupiny patří i oxid dusný N_2O , oxid dusičný N_2O_5 a další, ty lze ale vzhledem k jejich malé koncentraci ve spalinách zanedbat [25].

Oxid dusnatý (NO) je bezbarvý, jedovatý plyn nevýrazné vůně. Velmi snadno reaguje s volným kyslíkem za vzniku oxidu dusičitého. NO je významným meziproduktem při výrobě kyseliny dusičné [26].

V plynném skupenství je oxid dusičitý NO_2 červenohnědý a prudce jedovatý. V kapalném skupenství se jedná o žlutohnědou látku, která tuhne do krystalů. V kapalně formě se používá jako okysličovadlo do raketových motorů [26].

Největší riziko oxidů dusíku pro životní prostředí spočívá v jejich negativním vlivu na rostliny. Zejména při vyšších koncentracích zapříčiňují, že se rostliny stávají méně odolné vůči mrazu či plísním. Oxid dusičitý je také zodpovědný za vznik tzv. kyselých dešťů. Oxid dusnatý je skleníkovým plynem, je tedy spoluzodpovědný za globální oteplování planety. Negativní dopady na zdraví člověka mají oxidy dusíku zejména při vyšších koncentracích. Tyto oxidy se váží na krevní barvivo, čímž zhoršují schopnost krve přenášet kyslík do tkání celého těla. Oxid dusičitý navíc dráždí sliznice a může vyvolat i respirační onemocnění [26].

2.2 TVORBA NO_x

Tvorba sloučenin NO_x závisí zejména na teplotě plamene, druhu paliva a jeho poměru k vzduchu v daném místě spalovací komory (plamene). Způsob vzniku oxidu dusnatého NO lze popsat pomocí tří různých mechanismů. Tyto mechanismy dělí NO na termické, promptní a palivové. Termický oxid dusnatý byl poprvé popsán Zeldovičem [27]. Promptní NO vznikající ve velmi krátkých časových intervalech při reakci vzdušného dusíku s uhlovodíkovými radikály byl poprvé popsán Fenimorem [28]. Dusíkem chemicky vázaným v palivu vzniká palivový NO popsán Pershingem a Wendtem [29]. Oxid dusičitý NO_2 vzniká oxidací NO na NO_2 volnými radikály kyslíku, které vznikají štěpením molekuly kyslíku nebo peroxidovým radikálem HO_2 [25]. Tato oxidace probíhá zejména v odtazích spalin a ozonem ve volném ovzduší.

2.2.1 TERMICKÝ NO

Termický oxid dusnatý vzniká při vysokých teplotách (nad $1100\text{ }^\circ\text{C}$) oxidací atmosférického dusíku v oblastech s nedostatkem paliva [30]. Tento mechanismus vzniku NO je nejvýznamnější a je popsán Zeldovičovým dvoukrokovým mechanismem [27]:



Reakce dle rovnice 2.1, považovaná za řídicí reakci v celém mechanismu, je velmi citlivá na teplotu z důvodu vysoké vazebné energie molekuly dusíku ($\text{N}\equiv\text{N}$) [25].

Zanedbáme-li ostatní méně významné mechanismy vzniku NO, můžeme zapsat rychlostní rovnici vzniku termických NO následujícím způsobem [25]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k \cdot [O] \cdot [N_2] \quad (2.3)$$

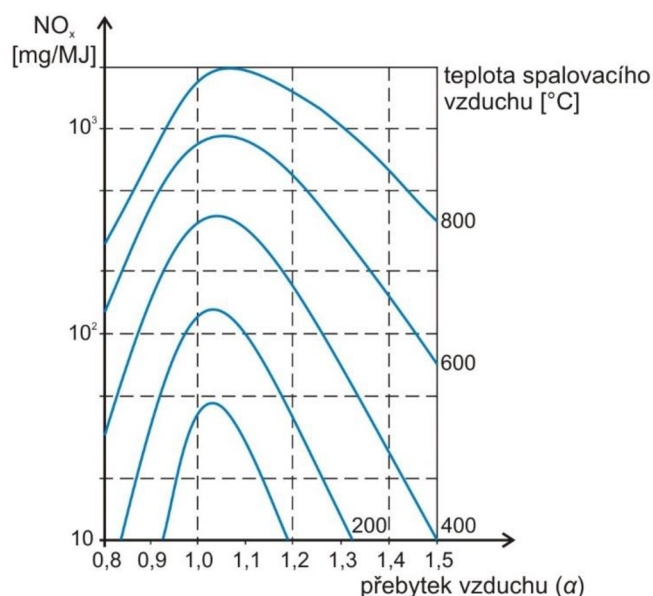
kde:

$[NO]$, $[O]$, $[N_2]$ je koncentrace složek $[\text{mol}/\text{m}^3]$,

t je doba reakce $[\text{s}]$,

k je rychlostní konstanta reakce závisající na teplotě $[\text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{s} \cdot \text{K}]$.

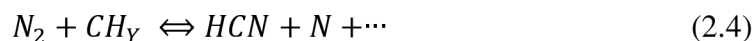
Mezi množstvím vzniklých NO a teplotou je velmi silná závislost, která je zřejmá zejména při použití předehřevu spalovacího vzduchu, jehož důsledkem je navýšení teploty plamene. Závislost vzniklého množství NO na teplotě spalovacího vzduchu a jeho přebytku je znázorněna na obrázku 2.1. Od přebytku vzduchu α se odvíjí množství kyslíku, které se účastní spalování. V důsledku nedokonalého spalování nedochází k nejvyšším teplotám v plamenu při přebytku vzduchu $\alpha = 1$, nýbrž při přebytku $\alpha = 1,05 - 1,1$. Při dále se zvyšujícím se přebytku α již nedochází ke zkvalitnění spalování a přebývající vzduch se stává pouze balastem, jehož rostoucí množství pouze snižuje teplotu plamene. Důsledkem je poté snížení množství vzniklého termického NO [25].



Obrázek 2.1 Závislost vzniklého množství NO na přebytku a teplotě spalovacího vzduchu [31]

2.2.2 PROMPTNÍ NO

Promptní oxid dusnatý vzniká v oblastech bohatých na palivo reakcí vzdušného dusíku s uhlovodíkovými radikály CH a CH₂. Produkty vzniklé těmito reakcemi jsou poté oxidovány na NO. Na základě několika experimentů byly vypořádovány tyto hlavní reakce popisující vznik promptního NO [30]:



Reakce dle rovnice 2.5 je považována za hlavní, neboť přibližně 90 % vytvořených promptních NO vzniká v důsledku této reakce. Tvorba promptního NO se často zanedbává, neboť její podíl na celkovém množství vzniklých NO nebývá vyšší než 10 % [25].

2.2.3 PALIVOVÝ NO

Chemicky vázaný dusík obsažený v palivu je příčinou vzniku palivového oxidu dusíku. Reálně nevzniká NO přímo oxidací palivového dusíku, nýbrž postupnými reakcemi, jejichž nejdůležitějšími produkty jsou HCN a NH₃. Ty jsou poté oxidovány na NO, který může být redukován na N₂ [30].

Palivový oxid dusíku nevzniká při spalování plynných paliv, protože tato paliva obvykle neobsahují chemicky vázaný dusík. Značné množství vázaného dusíku obsahují těžké topné oleje, odpadní oleje, uhlí, nebo koks. Při spalování těchto paliv tvoří palivový NO až 80 % všech spalováním vytvořených NO_x. To je dáno tím, že palivový dusík je vázán slaběji (vazby N – H a N – C), než je trojnásobná vazba atomů v molekule dusíku, a proto palivový oxid dusíku vzniká snadněji než termický [25].

Tabulka 2.1 Mechanismy vzniku NO a NO₂ při spalování [31]

Složka NO	Místo vzniku	Mechanismus	Hlavní vlivy
termický	<ul style="list-style-type: none"> plamen oblast nejvyšších teplot 	Zeldovičův	<ul style="list-style-type: none"> doba zdržení koncentrace O₂ teplota > 1100 °C
promptní	<ul style="list-style-type: none"> plamen oblast vyhořívání uhlovodíků 	Fenimorův	<ul style="list-style-type: none"> koncentrace O₂ přebytek spalovacího vzduchu
palivový	<ul style="list-style-type: none"> plamen 	Pershing a Wendtův	<ul style="list-style-type: none"> doba zdržení přebytek spalovacího vzduchu
NO ₂	<ul style="list-style-type: none"> plamen odtahy spalin volné ovzduší 	Fenimorův NO+HO ₂ →NO ₂ +OH	<ul style="list-style-type: none"> rychlé ukončení spalování (např. u plynové turbíny) intenzita slunečního záření

2.3 METODY PRO SNÍŽENÍ NO_x.

Opatření, která vedou ke snížení emisí NO_x ve spalinách lze rozdělit do tří skupin. Jako tzv. nultá opatření jsou označována ta, která spočívají v úpravě proudů vstupujících do spalovacího prostoru (paliva, oxidačního činidla). Primární opatření spočívají v potlačení tvorby oxidů dusíku ovlivněním podmínek spalování (úprava technologie spalování, konstrukční úpravy hořáku). Dodatečné odstraňování oxidů dusíku ze spalin mimo spalovací komoru je charakteristické pro sekundární opatření [25].

2.3.1 NULTÉ REDUKČNÍ METODY

Příkladem nulté redukční metody je výběr alternativního paliva s menším obsahem dusíku, nebo snížení obsahu chemicky vázaného dusíku v palivu. Tento proces se nazývá denitrifikace. Jeho ekonomická uplatnitelnost závisí na obsahu dusíku v palivu a také vybrané denitrifikační metodě. Ekonomicky málo náročné jsou adsorpce a membránová separace, tyto metody jsou však schopny odstranit pouze malé množství dusíku.

Další metodou spadající do nultých redukčních metod je použití jiného druhu oksylichovadla. V běžných provozech se používá atmosférický vzduch, který má však vysoký obsah dusíku

(78 %). Proces spalování lze vylepšit použitím obohaceného vzduchu o kyslík, nebo úplným nahrazením spalovacího vzduchu čistým kyslíkem, tzv. kyslíkové spalování [25].

2.3.2 PRIMÁRNÍ REDUKČNÍ METODY

Podstatou těchto metod je ovlivnění faktorů, které podporují tvorbu oxidů dusíku. Mezi tyto faktory patří především [25]:

- teplota plamene a teplota uvnitř spalovací komory,
- koncentrace kyslíku v prostoru spalovací komory,
- doba prodloužení hořící směsi v pásmu vysokých teplot.

Při teplotách vyšších než 1100 °C dochází k rychlému nárůstu vzniku oxidů dusíku podle Zeldovičova mechanismu. Přírůstek koncentrace oxidů dusíku v závislosti na teplotě není konstantní, ale roste exponenciálně se vzrůstající teplotou plamene. Z tohoto důvodu spočívá většina primárních redukčních metod ve snaze snížit teplotní špičky plamene a snížit pravděpodobnost styku kyslíku s dusíkem v oblastech teplotních špiček [25].

Mezi základní primární metody redukce NO patří [25]:

- vícestupňové spalování (stupňovitý přívod paliva, stupňovitý přívod spalovacího vzduchu, kombinace stupňovitého přívodu paliva a stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu, palivový „reburning“),
- chlazení plamene (vnitřní a vnější recirkulace spalin, nástřik vody či vodní páry, optimální přebytek vzduchu),
- bezplamenné spalování,
- kyslíkové spalování,
- nucený odtah spalin.

Mezi velmi účinné metody redukce NO patří výše zmíněné vícestupňové spalování. *Základní myšlenka spočívá v přivedení části paliva nebo spalovacího vzduchu nebo i obou médií do podstechiometrické oblasti spalování (tzv. primární stupeň), čímž se sníží teplota plamene. Zbylá část z celkového množství paliva nebo vzduchu, případně obou médií, je přivedena do oblasti plamene (tzv. sekundární stupeň) a spalování se dokončí, ovšem za výrazně snížených teplot, takže výsledné koncentrace NO_x jsou podle dostupných literárních údajů o 20 až 50 % nižší než při jednostupňovém spalování [25].*

Reburning je metoda podobná metodě stupňovitého spalování, ke snížení koncentrace NO však využívá rozdílnou strategii. Metoda spočívá v nástřiku uhlovodíkového paliva do proudu spalin mimo hlavní oblast plamene tedy tam, kde již mají spaliny nižší teplotu. Nástřikem paliva dojde k vytvoření oblasti bohaté na uhlovodíkové radikály CH_Y, které nejprve reagují spolu s NO na HCN, který je poté redukován na N₂. Množství nástřikovaného paliva se pohybuje v rozmezí 10 – 20 % z celkového množství spalovaného paliva [26].

Chlazení plamene probíhá nejčastěji recirkulací spalin, což je také nejučinnější metoda. Recirkulaci spalin lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní recirkulace spočívá v přivádění části spalin, které již odevzdaly teplo spalovací komoře a jsou tedy ochlazené, zpět do hořáku prostřednictvím ejekčního účinku proudícího spalovacího vzduchu. Tato recirkulace je dosažena pomocí vhodně zvolené konstrukce hořáku. Na rozdíl od vnitřní je vnější recirkulace charakteristická odebráním určitého množství spalin z odtahového systému spalovacího zařízení. Tyto spaliny jsou dopravovány zpět do sání hořáku (prostřednictvím ventilátoru). Tato metoda je ve srovnání s předchozí investičně náročnější z důvodu instalace spalinového ventilátoru a výstavby spalinového potrubí [25].

Dalšími metodami snižování teploty plamenu je vstřikování vody nebo vodní páry, nebo použití vyššího přebytku spalovacího vzduchu α [25].

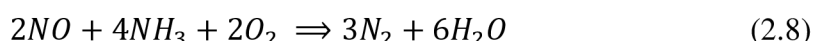
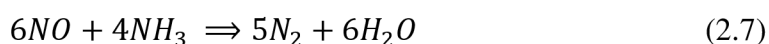
Bezplamenné spalování je slibná technologie přinášející výhody zejména rovnoměrného teplotního pole uvnitř spalovací komory, vysokou termickou účinnost celého spalovacího procesu a nízké emise NO_x a CO_2 . Tento typ spalování funguje na principu oxidace paliva vysoce přehřátým spalovacím vzduchem. Teplota přehřevu vzduchu se pohybuje nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$, což je hodnota, která u většiny paliv přesahuje teplotu samovznícení. Při takto vysokých teplotách při běžném spalování vznikají termické oxidy dusíky, jejichž vznik je při tomto typu spalování potlačen snížením koncentrace O_2 ve spalovacím vzduchu inertním plynem [26].

Kyslíkové spalování zcela potlačuje vznik NO_x nahrazením konvenčního spalovacího vzduchu čistým kyslíkem. Ten je s palivem z bezpečnostních důvodů smíchán až v ústí hořáku, z důvodu jeho vysoké reaktivity a nebezpečí výbuchu. Další výhodou spolu s eliminací tvorby oxidů dusíku je i úspora paliva a snížení objemu spalin, což je příčinou nízkých tepelných ztrát spalin. Snížení objemu spalin zároveň umožňuje zmenšení celého spalovacího zařízení. Hlavní nevýhodou tohoto typu spalování jsou vysoké provozní náklady [26].

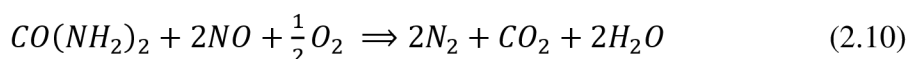
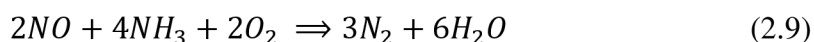
2.3.3 SEKUNDÁRNÍ REDUKČNÍ METODY

Pokud nulté, nebo primární metody redukce oxidů dusíku z ekonomických či jakýchkoliv jiných důvodů nepostačují, je nutné přistoupit k čištění NO_x ze spalin. Pro tyto metody platí, že jsou obecně ekonomicky výrazně náročnější. V provozu jsou zatím nejvíce k vidění metody selektivní katalytické redukce (SCR) a selektivní nekatalytické redukce (SNCR) [25].

Metoda SCR (selektivní katalytická redukce) je charakteristická nástřikem amoniaku do proudu spalin při teplotách pohybujících se v rozmezí $300 - 400\text{ }^\circ\text{C}$. Za přítomnosti katalyzátoru TiO_2 nebo V_2O_5 se oxidy dusíku redukují na dusík N_2 a vodu H_2O . Tyto reakce jsou popsány rovnicemi 2.7 a 2.8 [26].



Metoda SNCR (selektivní nekatalytická redukce) spočívá v přidání amoniaku nebo močoviny přímo do spalovací komory. Tam bez přítomnosti katalyzátoru při teplotách pohybujících se v rozmezí $870 - 1100\text{ }^\circ\text{C}$ probíhají reakce dle rovnic 2.9 a 2.10. Tato metoda je citlivá zejména na dodržení teploty nástřiku. Při teplotách vyšších než $1100\text{ }^\circ\text{C}$ má amoniak i močovina tendenci samovolně oxidovat na oxidy dusíku, což je zcela v rozporu s primárním účelem této metody [26].



3 SOUČASNÉ EMISNÍ LIMITY PRO STACIONÁRNÍ ZDROJE O RŮZNÉM SPALOVACÍM VÝKONU

Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje jsou předmětem vyhlášky č. 415/2012 Sb. Zařízení jsou členěna dle spalovacího výkonu do dvou skupin. Do první skupiny spadají zařízení o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od 0,3 do 50 MW, do druhé skupiny zařízení o tepelném příkonu 50 MW a více [32].

Konkrétní emisní limity pro zařízení o příkonu od 0,3 do 50 MW jsou uvedeny v příloze 2 část II výše uvedené vyhlášky. Hodnoty těchto limitů jsou shrnuty v tabulkách 3.1 a 3.2. Tabulka 3.1 obsahuje limity platné do 31. prosince 2017. Tabulka 3.2 obsahuje limity platné od 1. ledna 2018. Pro kotle jsou specifické emisní limity vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách 6 % v případě pevných paliv obecně, 11 % v případě biomasy a 3 % v případě kapalných a plyných paliv.

Limity k zařízením o příkonu 50 MW a vyšším se nacházejí v příloze 2 část I vyhlášky č. 415/2012 Sb. Tabulka 2 této vyhlášky je platná pro zařízení, pro něž byla podána žádost o první povolení provozu 7. ledna 2013 nebo později nebo byly uvedeny do provozu po 7. lednu 2014. Specifické emisní limity jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách 6 % v případě pevných paliv a 3 % v případě kapalných a plyných paliv [32]. Tyto emisní limity jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Třetí část přílohy 2 vyhlášky č. 415/2012 se věnuje spalovacím stacionárním zdrojům určeným ke spalování více druhů paliv.

U spalovacího stacionárního zdroje používajícího současně dva nebo více druhů paliv se stanoví hodnoty specifických emisních limitů následujícím postupem [32]:

- a) *přiřadí se hodnota specifického emisního limitu odpovídající každému jednotlivému palivu a znečišťující látce v závislosti na celkovém jmenovitém tepelném příkonu spalovacích stacionárních zdrojů,*
- b) *následně se určí vážené hodnoty specifických emisních limitů podle jednotlivých druhů paliv, a to tak, že jednotlivé hodnoty specifických emisních limitů se vynásobí tepelným příkonem každého paliva a tento součin se vydělí součtem tepelných příkonů dodaných všemi palivy a*
- c) *sečtou se vážené hodnoty specifických emisních limitů pro jednotlivá paliva.*

Tabulka 3.1 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkoku od 0,3 do 50 MW platné do 31. prosince 2017 [32]

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]											
	> 0,3-1 MW				> 1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo obecně	-	650	250	650	-	650	250	650	2500	650	150	400
		1100 ²⁾				1500 ¹⁾			500 ¹⁾	100 ¹⁾	300 ¹⁾	
									1100 ²⁾	250 ⁵⁾	650 ⁵⁾	
Paliva dle § 15 odst. 5	-	650	150	300	-	650	150	300	-	650	150	300
Kapalné palivo	-	500	-	175	-	500	100	175	1700	450	100	175
Plynné palivo a zkapalněný plyn	-	200	-	100	-	200	-	100	900 ⁴⁾	200	50 ⁴⁾	100
		300 ³⁾				300 ³⁾						

Vysvětlivky:

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

Tabulka 3.2 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkoku od 0,3 do 50 MW platné od 1. ledna 2018 [32]

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

Vysvětlivky:

- 1) Na spalovací stacionární zdroje spalující hnědé uhlí, provozované nejvýše 3200 provozních hodin ročně, se vztahuje specifický emisní limit 2000 mg.m⁻³.
- 2) Pokud nelze této hodnoty z technických důvodů dosáhnout použitím nízkoemisních hořáků, platí specifický emisní limit 200 mg.m⁻³.
- 3) Platí v případě spalování biomasy pro spalování ve stacionárních zdrojích s výjimkou spalování výlisků z takové biomasy.
- 4) Vztahuje se na spalování těžkého topného oleje a jemu podobných kapalných paliv.

Tabulka 3.3 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkonu 50 MW a vyšším [32]

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]											
	50-100 MW				> 100-300 MW				> 300 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo obecně	400	300 400 ¹⁾	20	250	200	200	20	250	150 200 ²⁾	150 200 ¹⁾	10	250
Biomasa podle § 2 písm. a)	200	250	20	250	200	200	20	250	150	150	20	250
Rašelina	300	250	20	250	300 250 ²⁾	200	20	250	150 200 ²⁾	150	20	250
Kapalné palivo obecně	350	300 50 ⁵⁾	20	175 100 ⁵⁾	200	150 50 ⁵⁾	20	175 100 ⁵⁾	150	100 50 ⁵⁾	10	175 100 ⁵⁾
Zkapalněný plyn	5	300	5	175	5	150	5	175	5	150	5	175
Plynné palivo obecně	35	100 50 ³⁾ 75 ⁴⁾	5	100	35	100 50 ³⁾ 75 ⁴⁾	5	100	35	100 50 ³⁾ 75 ⁴⁾	5	100
Zemní plyn	35	100 50 ³⁾ 75 ⁴⁾	5	100	35	100 50 ³⁾ 75 ⁴⁾	5	100	35	100 50 ³⁾ 75 ⁴⁾	5	100
Koksárenský plyn	400	100	30	100	400	100	30	100	400	100	30	100
Vysokopecní plyn	200	100	10	100	200	100	10	100	200	100	10	100
Plyn ze zplyňování rafinérských zbytků	35	100	5	100	35	100	5	100	35	100	5	100

Vysvětlivky:

- 1) Vztahuje se pouze na spalování práškového hnědého uhlí.
- 2) Vztahuje se pouze na spalování ve fluidním loži.
- 3) Vztahuje se pouze na plynové turbíny s jednoduchým cyklem, které mají účinnost větší než 35 % (stanovenou na základě podmínek Mezinárodní organizace pro normalizaci ISO) platí emisní limit ve výši $50 \times \eta / 35$, kde η je účinnost plynové turbíny pracující v základním zatížení (podle ISO) vyjádřená v procentech.
U plynových turbín, včetně plynových turbín s kombinovaným cyklem, emisní limit platí pouze při zatížení větším než 70 %
- 4) Vztahuje se pouze na pístové spalovací motory.
- 5) Vztahuje se pouze na plynové turbíny, včetně plynových turbín s kombinovaným cyklem.

4 PŘENOS TEPLA PŘI SPALOVÁNÍ

Přenos tepla z horkých spalin do stěn spalovací komory nebo ohřívání materiálu je proces skládající se ze tří mechanismů. V případě kondukce (vedení tepla) a konvekce (proudění) lze tepelný tok popsat jako lineární závislost gradientu teploty. Gradient teploty je teplotní rozdíl mezi plamenem a stěnami spalovací komory. Pro případ radiace (záření) je tepelný tok úměrný čtvrté mocnině absolutní teploty povrchu tělesa. Tento jev popisuje Stefan-Boltzmannův zákon [25].

4.1 PŘENOS TEPLA RADIACÍ

Příčinou přenosu tepla radiací je vyzáření energie ve formě elektromagnetických vln (podle teorie elektromagnetických vln) nebo proudů fotonů (podle teorie kvantové mechaniky) v oblasti infračervených vlnových délek (0,7 - 100 μm) [25]. Jakmile částice získávají přebytečnou energii, stávají se nestabilními. Jejich snaha navrátit se do stabilní polohy vede k vyzáření fotonu. Tento foton se volně pohybuje prostorem do té doby, než narazí na jinou částici, která ho pohltí [33].

Přenos tepla nejvýznamněji popisuje právě radiace. Tento typ přenosu tepla může bez omezení probíhat i ve vakuu, neboť není závislý na existenci hmotného prostředí. Přenos tepla radiací popisuje Stefan-Boltzmannův zákon (rovnice 4.1) [34]. Díky výskytu čtvrté mocniny teploty dochází tímto mechanismem k největšímu přenosu tepelné energie. Zejména s rostoucí teplotou je radiace více dominantním mechanismem přenosu tepla při spalování ve srovnání s kondukcí a konvekcí. V rovnici popisující Stefan-Boltzmannův zákon se vyskytuje veličina emisivita. Jedná se o vlastnost předmětu vypovídající o tom, zda je toto těleso ideálním zářičem nebo zda se chová jako absolutně černé těleso [33].

$$Q_H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (4.1)$$

kde:

Q_H je předané teplo [W],

A je plocha přestupu tepla [m²],

ε je emisivita (poměrná zářivost) [-],

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²·K⁴)]),

T je teplota [K].

4.2 PŘENOS TEPLA KONVEKČÍ

Konvekci neboli proudění lze rozdělit na přirozenou a nucenou. Přirozená konvekce funguje za působení gravitační síly, kdy těžší molekuly proudí ve směru vektoru tíhového zrychlení, zatímco lehčí molekuly mají tendenci proudit opačným směrem. Nucená konvekce funguje za působení vnější síly. Tuto sílu může vyvolat například kompresor nebo čerpadlo. Konvekce se skládá ze dvou mechanismů. Prvním mechanismem je difuze. Tento náhodný pohyb molekul má konvekce společný s kondukcí. Promíchání objemového toku je charakteristické pro druhý mechanismus. K nejtýpovějšímu příkladu přenosu tepla konvekcí dochází mezi proudící tekutinou a povrchem, který směr proudění této tekutiny vymezuje [33]. Rovnice přenosu tepla konvekcí (někdy označována jako Newtonova) vypadá následovně [34]:

$$Q_H = A \cdot \alpha_t \cdot (T - T_w) \quad (4.2)$$

kde:

- Q_H je předané teplo [W],
 A je plocha přestupu tepla [m²],
 α_t je součinitel přestupu tepla [W/(m²·K)],
 T je teplota tekutiny [K],
 T_w je teplota povrchu tělesa [K].

4.3 PŘENOS TEPLA KONDUKČÍ

Přenos tepla kondukcí (vedením) je popsán Fourierovým zákonem rovnicí 4.3 [34]. Pro tento mechanismus je charakteristická velmi malá vzdálenost mezi jednotlivými molekulami. Na rozdíl od radiace, kdy přenos tepla probíhal bez závislosti na vnějším prostředí, kondukcce je závislá na fyzikálních vlastnostech látky, ve které přenos tepla probíhá. Jednotlivé částice účastníci se přenosu tepla mezi sebou mohou interagovat několika způsoby. Může se jednat o vibrace molekul v atomové mřížce (případ pevných látek) anebo neuspořádaný pohyb molekul (případ plyných látek) [33].

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.3)$$

kde:

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

5 ROZPRAŠOVÁNÍ KAPALNÉHO PALIVA

Atomizace, respektive rozprašování je proces rozpadu kapaliny do kapek. Základní rozdělení atomizace podle druhu energie použité k rozprašení kapaliny je uvedeno v tabulce 5.1 [35].

Tabulka 5.1 Rozdělení jednotlivých typů atomizace dle druhu používané energie [35]

Typ atomizace	Druh energie
tlaková atomizace	využití kinetické energie kapaliny
pneumatická atomizace	využití rychlosti proudícího plynu (u spalování vzduchu nebo páry)
rotační atomizace	využitím mechanické energie rotující součásti
elektrostatická, ultrazvuková, akustická atomizace	využití vibrační, elektrické energie

Dokonalé spalování, tedy vypaření veškerého množství vstříkovaného paliva, jeho kvalitní promísení s oksyločivadlem a jejich následné prohoření, klade velké nároky na kvalitu atomizace. Pokud z jakéhokoli důvodu není kvalita atomizace dostatečná, nedochází ke kompletnímu odpaření kapalného paliva, které se poté usazuje na stěnách spalovací komory, případně i spalinových cest. Nedokonalé spalování má za následek vznik škodlivých a nebezpečných emisí CO a C_xH_y. Kvalitní atomizace je odvislá zejména od hustoty, viskozity a povrchového napětí použitého typu paliva. Z výše uvedeného vyplývá, že požadavky na atomizéry jsou zejména následující:

- minimální velikost kapek rozprašovaného média v širokém rozsahu jeho průtoku,
- homogenní distribuce rozprašovaného média,
- minimální tvorba usazenin v trysce,
- rychlá reakce na změnu průtoku,
- odolnost vůči nestabilitám průtoku,
- nízké energetické nároky, nízká cena a nízká hmotnost,
- nízké provozní náklady, snadná údržba.

Charakteristickým znakem kvality rozprašování je střední velikost rozprašovaných částic SMD (sauter mean diameter), kterou lze vypočítat dle vztahu 5.1 [38]. Zvýšení GLR má za následek zmenšení SMD [24]. Velikost výstupního otvoru trysky je přímo úměrná SMD. Při zvětšení otvoru z 2 na 6 mm se SMD přibližně zdvojnásobí [7]. Vstupní tlak paliva silně ovlivňuje SMD, jeho zvyšování však nemusí vždy vést ke zlepšení atomizace [15].

$$SMD = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2} \quad (5.1)$$

kde:

- SMD* střední velikost částic [m],
N_i počet kapiček o průměru *D_i* [-],
D_i průměr kapičky [m],

5.1 TYPY KAPALNÝCH PALIV

Kapalná paliva se vyrábějí zejména z ropy procesy rafinace a destilace. Vzniklé produkty lze rozdělit do několika skupin. Mezi lehké topné oleje (LTO) spadají benzín, nafta a další LTO.

Dalšími produkty jsou těžké topné oleje TTO a zbytky. Chemické složení těchto paliv je tvořeno zejména uhlíkem (C), vodíkem (H), sírou (S) a dusíkem (N) [37]. Dusík a síru obsaženou v palivu lze označit za parazitní složky, neboť zapříčiňují vznik škodlivých emisí [35].

Prudce se rozvíjející oblastí je i vývoj kapalných paliv z obnovitelných zdrojů, přestože je skutečný přínos těchto produktů pro životní prostředí zatím stále rozporuplný. Z hlediska spalování biopaliv za účelem získání tepelné energie, respektive páry je problematické zejména rozdílné složení těchto paliv ve srovnání s konvenčními palivy ropného původu. Tyto odlišnosti je nutné brát v úvahu při stavbě i provozu spalovacích zařízení [35].

Během zkoušek prováděných při tvorbě této diplomové práce byl jako palivo použit methylester řepkového oleje. Výhodou rostlinných olejů je ve srovnání například s bioethanolem zejména jejich nižší energetická náročnost potřebná k výrobě. Řepkový olej se vyrábí lisováním semen řepky olejky, zatímco bioethanol se vyrábí destilací kukuřice, brambor, pšenice, cukrové třtiny a řepy. Lisování je ve srovnání s destilací energeticky mnohem méně náročné, což v konečném důsledku činí výrobu rostlinných olejů také více ekologickou. Nevýhodou řepkových olejů je jejich vyšší viskozita oproti palivům ropného původu (viz tabulka 5.2), což je pro jejich kvalitní rozprášení za účelem efektivního spalování problematické. Viskozitu lze před rozprášením paliva snížit například jeho zahřátím na vyšší teplotu. Další metodou snížení viskozity je její chemické snížení procesem zvaným esterifikace. Tímto rafinačním procesem vzniká za přimíchávání methanolu methylester řepkového oleje [35].

5.2 FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI KAP. PALIV

Některé vybrané fyzikální vlastnosti zmíněných (plynných i kapalných) paliv jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2 Vybrané fyzikální a chemické vlastnosti paliv [35]

Palivo		Hustota	Výhřevnost	Spalné teplo	Zápalná teplota
		kg/m ³	MJ/m ³	MJ/kg	°C
Zemní plyn		0,69	34	37,8	650
LPG	propan	505	46,3	95,5	510
	butan	580	45,9	125,7	490
LNG		0,41	35	40	540
Bioplyn		1,2	21	21	cca 700

Tabulka 5.3 obsahuje srovnání dvou paliv rostlinného a ropného původu. Konkrétně se jedná o methylester řepkového oleje (RME) a extra lehký topný olej (ELHO). Z tabulky 5.2 vyplývá, že největší rozdíly mezi jednotlivými palivy jsou v teplotě bodu vzplanutí a chemickém složení. Teplota bodu vzplanutí je v případě RME o více než 80 °C vyšší než u ELHO. Koncentrace kyslíku u RME pak přesahuje 13 hmotnostních % ve srovnání s necelým 1 hmotnostním % u ELHO.

Tabulka 5.3 Srovnání fyzikálně-chemických vlastností paliv rostlinného a ropného původu [4]

Veličina	Způsob získání hodnoty	Jednotka	ELHO	RME
Kinematická viskozita při 20 °C	změřeno	mm ² /s	4,18	7,18
Kinematická viskozita při 40 °C	změřeno	mm ² /s	2,71	4,42
Kinematická viskozita při 30 °C	vypočítáno	mm ² /s	3,3	5,6
Kinematická viskozita při 70 °C	vypočítáno	mm ² /s	-	2,7
Kinematická viskozita při 110 °C	vypočítáno	mm ² /s	-	1,5
Bod vzplanutí	změřeno	°C	66	148
Hustota při 15 °C	změřeno	kg/m ³	836	883
Hustota při 30 °C	změřeno	kg/m ³	824	871
Hustota při 70 °C	změřeno	kg/m ³	-	853
Hustota při 110 °C	změřeno	kg/m ³	-	820
Obsah uhlíku	změřeno	hm. %	84,91	74,24
Obsah vodíku	změřeno	hm. %	14,15	12,61
Obsah dusíku	změřeno	hm. %	0,01	0
Obsah síry	změřeno	hm. %	0,06	0
Obsah kyslíku	vypočítáno	hm. %	0,87	13,15
Stechiometrický objem vzduchu	vypočítáno	m _N ³ /kg	11,39	9,61
Stechiometrický objem vzduchu	vypočítáno	m _N ³ /MWh	946,9	905,6
HHV	změřeno	MJ/kg	46,407	40,969
LHV	vypočítáno	MJ/kg	43,303	38,203

5.3 TYPY ATOMIZÉRŮ

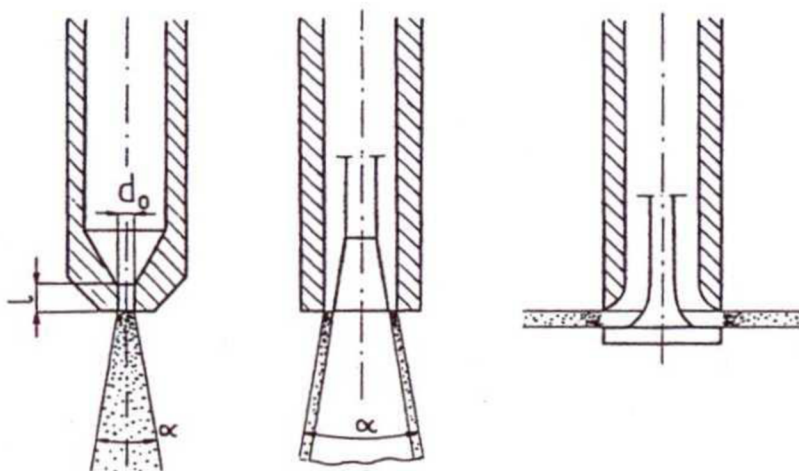
Vzhledem k rozmanitým potřebám jednotlivých aplikací atomizace je logické, že existuje široké spektrum jednotlivých typů atomizérů. Jen některé z nich jsou vhodné k rozprašování kapalných paliv za účelem jeho spalování.

5.3.1 TLAKOVÉ ATOMIZÉRY

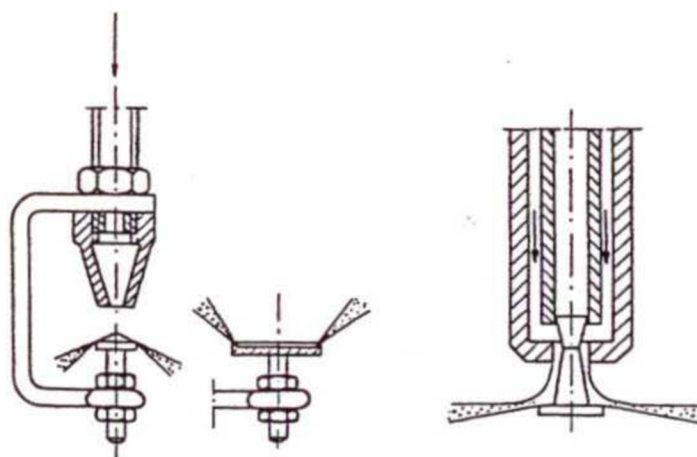
Tlakové atomizéry patří mezi nejběžněji používané typy. K rozprašení kapaliny dochází především díky tlakové energii kapaliny (řádově desítky barů). Při výstupu z trysky se tlaková energie kapaliny mění na kinetickou, což má za následek získání velmi vysoké relativní rychlosti mezi rozprašovanou kapalinou a okolním prostředím. Hlavní výhodou těchto atomizérů je jejich jednoduchost (nepotřebují přívod dalších médií). Nevýhodami jsou neschopnost rozprašit více viskózní kapaliny a klesající kvalita atomizace s rostoucím průtokem [35].

Mezi **tlakové atomizéry** spadají [35]:

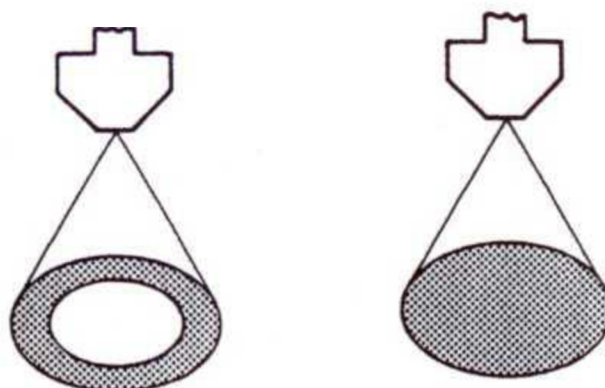
- atomizéry s jednoduchou tryskou (používají se k čištění),
- deflekční atomizéry (zavlažování rostlin a v hasicích systémech),
- vířivé atomizéry (protipožární ochrana, zemědělství nebo čištění povrchů),
- duplexní atomizéry (turbíny letadel).



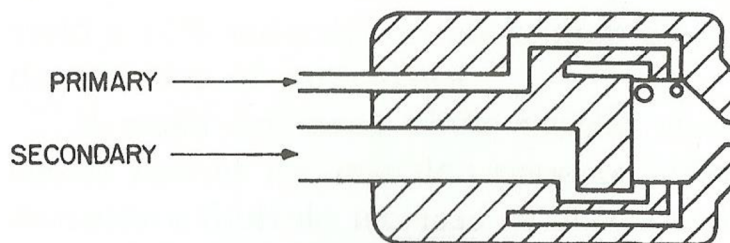
Obrázek 5.1. Atomizéry s jednoduchou tryskou: cylindrická, prstencová a radiální tryska [39]



Obrázek 5.2. Deflekční atomizéry [39]



Obrázek 5.3. Dva základní tvary rozprášené kapaliny u vířivých atomizérů (dutý a plný kužel) [38]



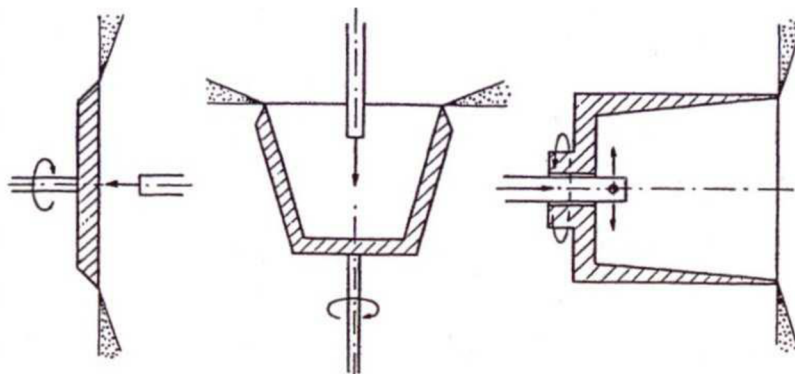
Obrázek 5.4. Schéma duplexního atomizéru [38]

5.3.2 ROTAČNÍ ATOMIZÉRY

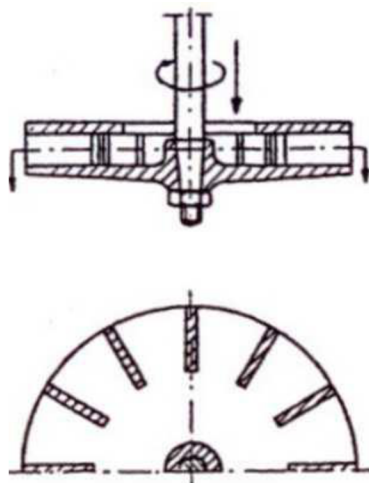
U tohoto typu atomizéru dochází k rozprašení kapaliny dodáním mechanické energie prostřednictvím rotující části atomizéru. Tato součást může rotovat kolem vertikální nebo horizontální osy. Mezi hlavní výhody tohoto řešení lze zařadit schopnost rozprašovat vysoce viskózní i znečištěné kapaliny, nenáročnost na vstupní tlak přiváděného média, nezávislost kvality atomizace na nastaveném průtoku média, snadná údržba a relativně levný provoz. Nevýhodami jsou složitá konstrukce atomizéru a pouze omezené využití v průmyslu [35].

Mezi **rotační atomizéry** patří:

- diskové
- lopatkové (výroba léčiv a v mlékárenském průmyslu)



Obrázek 5.5. Typy diskových rotačních atomizérů (disk, miska, pohár) [39]



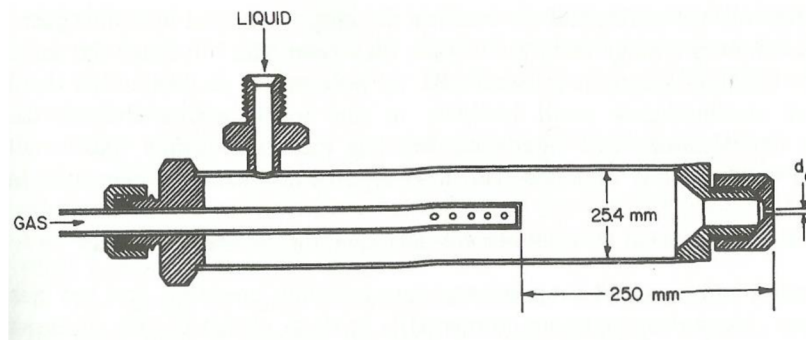
Obrázek 5.6. Lopatkový atomizér [39]

5.3.3 PNEUMATICKÉ ATOMIZÉRY

V případě pneumatických atomizérů probíhá rozprašení kapaliny prostřednictvím kinetické energie přiváděného plynu. Nejčastějšími atomizačními médii jsou tlakový vzduch nebo pára. Tyto atomizéry nacházejí své uplatnění zejména tam, kde je nutné zajistit kvalitní atomizaci velmi viskózních kapalin nebo tekutých kovů. Popis toků, které probíhají uvnitř pneumatických atomizérů je poněkud složitý. K interakci mezi kapalnou a plynnou fází může dojít při paralelním, přechodovém nebo vířivém toku. Při paralelním toku dochází k interakci paliva a atomizačního média na povrchu kapaliny, která se poté rozpadá na kapky. Atomizéry s tímto typem toku se vyznačují shodným směrem proudění kapaliny a plynu. V případě atomizérů s přechodovým tokem dochází k rozpadu kapaliny prostřednictvím dynamického působení plynu. K tomu dochází díky vytvoření tenkého proudu kapaliny, do kterého vstupuje proud plynu. U atomizérů s vířivým tokem je nutné dosáhnout alespoň u jednoho přiváděného média (plynu nebo kapaliny) vířivého toku. Při přivedení tenkého proudu kapaliny do vířivého proudu plynu dochází k velmi vysoké kvalitě atomizace, čehož se využívá zejména při výrobě páry a v plynových turbínách. K mísení plynného a kapalného média může dojít uvnitř i vně atomizéru. Základním principem pneumatické atomizace je smykové napětí na rozhraní kapaliny a plynu. K rozpadu kapaliny může dojít podle dvou mechanismů. Buď se odtrhují kapičky z povrchu kapaliny anebo dochází k rozpadu kapaliny na hraně trysky [35].

Effervescentní rozprašování je specifickým typem pneumatické atomizace. Na rozdíl od ostatních typů pneumatických atomizérů, které nejprve vytvoří tenký proud kapaliny, do kterého je následně přiveden plyn o vysoké rychlosti, effervescentní atomizéry zavádějí atomizační médium přímo do proudu kapaliny v určitém okamžiku proti výstupnímu otvoru v trysce. Kapalina je společně s plynem přivedena do směšovací komory prostřednictvím několika malých otvorů. Atomizační médium není určeno k předání své kinetické energie kapalině, a tak je tlakový rozdíl mezi přiváděným plynem a kapalinou malý. Cílem je dopravit malé bublinky plynu do proudu kapaliny tak, aby byl vytvořen dvoufázový tok. Bublinky v proudu kapaliny při průchodu tryskou prudce expandují, což má za následek rozpad okolní kapaliny na malé kapičky. Výhodou tohoto typu atomizace je její vysoká kvalita i při malých vstříkovacích tlacích a malých průtocích plynu. Effervescentní atomizéry jsou jednoduché na konstrukci, spolehlivé a mají snadnou údržbu [35].

Mezi obecné výhody pneumatické atomizace lze zařadit schopnost atomizace i velmi viskózních kapalin. Při použití přehřáté páry dochází ke snížení viskozity rozprašované kapaliny dosažením její vyšší teploty. Mezi další výhody ve srovnání s tlakovou atomizací patří schopnost kvalitní atomizace v širším rozsahu používaných průtoků. Navíc díky přívodu atomizačního média je kapalina přiváděna do trysky za nižších tlaků, což umožňuje použití větších průřezů, které mají nižší tendenci k ucpávání. Nevýhodami tohoto typu atomizace jsou vyšší pořizovací i provozní náklady a nutnost přívodu dalších doprovodných médií [35].



Obrázek 5.7. Schéma effervescentního atomizéru (1. plyn, 2. kapalina) [38]

Charakteristikou pneumatických atomizérů rozhodující o kvalitě konstrukce je množství atomizačního média potřebného k rozprašení jednotkového množství atomizované kapaliny. Tento poměr charakterizuje tzv. GLR (*Gas to Liquid Ratio*) poměr vyjádřený rovnicí 5.1 [35]:

$$GLR = \frac{\dot{Q}_G}{\dot{Q}_L} \cdot 100 [\%] \quad (5.1)$$

kde:

GLR *Gas to Liquid Ratio* – hmotnostní poměr průtoku plynu a kapaliny [%],

\dot{Q}_G hmotnostní průtok atomizačního plynu [kg/h],

\dot{Q}_L hmotnostní průtok kapaliny [kg/h].

6 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

6.1 SPALOVACÍ KOMORA

Testování proběhlo v horizontální, dvouplášťové, vodou chlazené spalovací komoře o délce 4 m a vnitřním průměru 1 m. Chlazení vnitřního pláště umožňuje voda proudící v sedmi oddělených a nezávislých sekcích. Prvních šest sekcí měří 0,5 m, poslední sedmá 1 m. V každé sekci je připojeno nezávislé měření teploty vody na vstupu i výstupu a regulace průtoku. Průtok v každé sekci lze nezávisle regulovat v rozmezí od 2 do 10 m³/h. Celkový průtok chladicí vody je dále omezen na 50 m³/h. Chlazení spalovací komory umožňuje částečně simulovat podmínky podobné těm v ohřevných pecích procesního průmyslu.

Maximální tepelný výkon komory je omezen maximální teplotou spalin 1050 °C a odpovídá hodnotě mezi 1500 a 1800 kW v závislosti na tvaru plamene a použitém palivu. Válcová část spalovací komory je vybavena osmi inspekčními okny na každé straně. Komplexnější pozorování plamene je umožněno dvěma dalšími průhledítky v zadní části komory naproti hořáku. Tato průhledítka nemusí sloužit jen k pozorování plamene, ale také jimi lze vkládat do spalovací komory různá další přídavná měřicí zařízení, např. termočlánky pro měření teploty v plamenu. Spaliny proudí skrz komoru do komína o vnitřním průměru 0,5 m, ve kterém se nachází termočlánek pro měření výstupní teploty a sonda od analyzátoru spalin pro měření složení spalin. Ve spodní části komínu je umístěn ejektor, který v případě potřeby zajišťuje podtlak ve spalovací komoře.

Spalovací komora může být provozována buď v podtlaku, nebo přetlaku. Rozsah tlaku v komoře vůči okolnímu atmosférickému tlaku je při zapáleném hořáku -300 Pa až +800 Pa.



Obrázek 6.1 Spalovací komora

6.2 DOPRAVA PALIVA

Spalované palivo bylo do hořáku dopravováno z tlakové nádoby, ve které byl užitím tlakového vzduchu udržován nad hladinou konstantní přetlak 5 bar. Tlakový zásobník byl umístěn na průmyslové váze. Průtok paliva tak byl měřen na základě hmotnostního úbytku paliva v tlakového zásobníku.

6.3 SPALOVACÍ VZDUCH

Zkušebna hořáků je vybavena vysokotlakým ventilátorem s maximální kapacitou cca 2500 mN³ při přetlaku za ventilátorem cca 4000 Pa. Přívodní potrubí je osazeno snímaním teploty, tlaku a průtoku vzduchu. Spalovací zkoušky byly provedeny se studeným (bez předehřevu) spalovacím vzduchem.

6.4 ATOMIZAČNÍ MÉDIUM

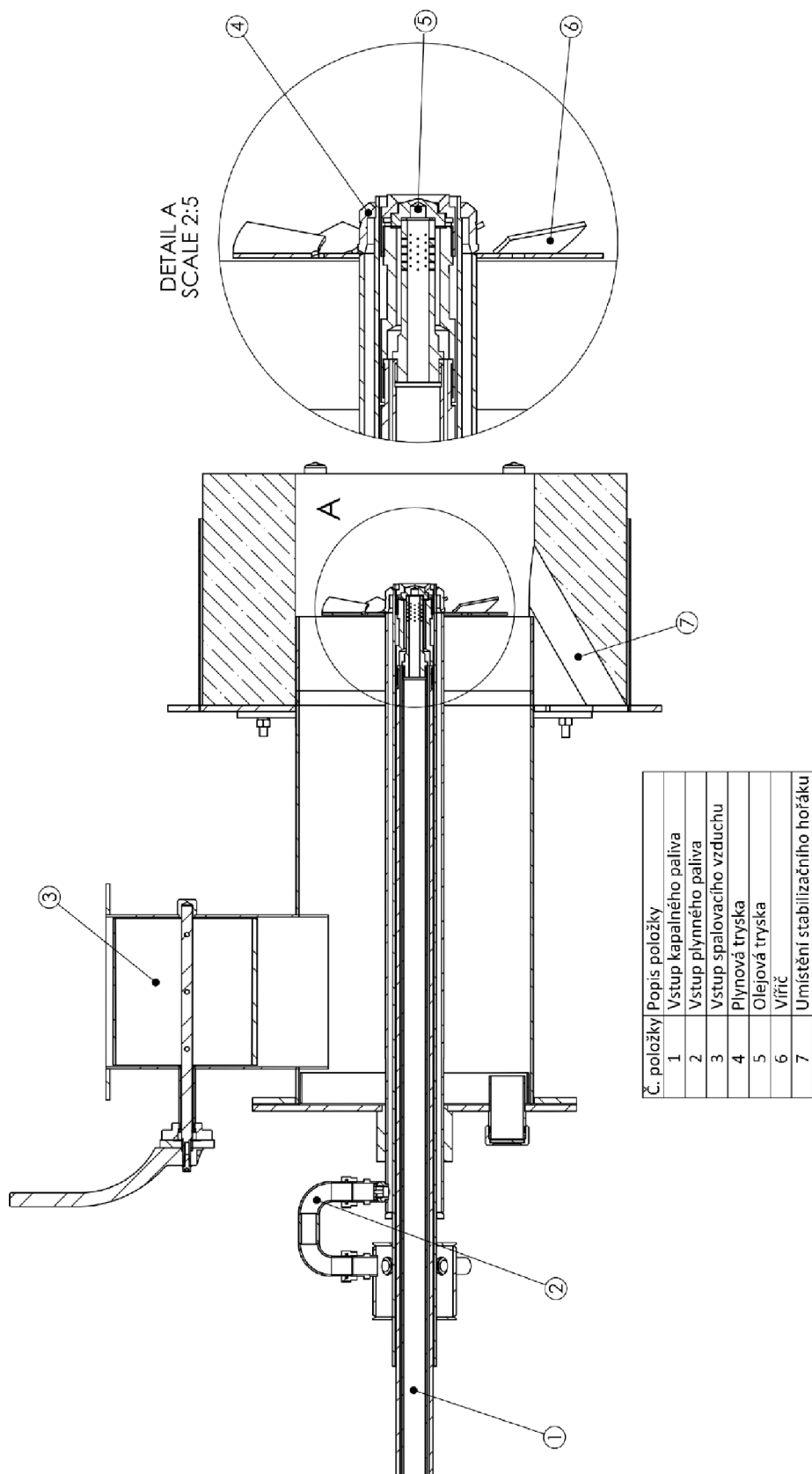
Pro pneumatickou atomizaci kapalných paliv lze použít tlakový vzduch s možností předehřevu na teplotu až 180 °C při přetlaku 10 bar nebo přehřátou páru o maximálním tlaku 13 bar a teplotě 180 °C.

6.5 HOŘÁK

Při testování byl použit kombinovaný hořák plyn/olej. Jeho maximální tepelný výkon plynové části je 1500 kW. K plynové trubce hořáku je v centrální části připojen víříč o průměru 240 mm s 8 skloněnými lopatkami. Vzdálenost mezi výstupem z hořákového kamene a výstupem z atomizéru, respektive víříčem, je 120 mm a 190 mm. Zapálení plamene je zajištěno pomocí plynového stabilizačního hořáku o tepelném výkonu 18 kW. Tento hořák byl v provozu během všech měření, s výjimkou testování stability hoření.

6.6 ATOMIZÉR

K důkladnému rozprášení paliva byl použit effervescentní atomizér. Maximální průtok odpovídá hodnotě 100 kg/h při přetlaku paliva 1,0 MPa, GLR hodnotě 15 % a teplotě lehkého topného oleje 20 °C. Výstupní tryska je tvořena třemi výstupními otvory o velikosti 1 mm. Vnitřní průměr směšovací komory je 10 mm. Vzduch je distribuován do proudu kapaliny skrz 40 aeračních otvorů o průměru 0,8 mm. Těchto 40 otvorů je situováno v 10 řadách po čtyřech otvorech. Sudé řady jsou vůči lichým pootočený o úhel 45 °. Vzdálenost mezi poslední řadou a výstupními tryskami je 5 mm.



Obrázek 6.2 Schéma kombinovaného hořáku

6.7 PALIVO

Pro spalovací zkoušky byl použit methylester řepkového oleje. (MEŘO – FAME Fat Acid Methyl ester). Před provedením zkoušek u něj byly provedeny palivové rozborů, a to prvková analýza (vodík, uhlík, dusík, síra, kyslík), měření HHV (LHV bylo dopočteno), viskozity při 20 °C a 40 °C, bod vzplanutí dle Pensky-Martens (dle normy ISO 2719:2002) a měření hustoty. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v tabulce 6.1 [4].

Dále byla provedena zkouška atmosférické destilace MEŘO, viz tabulka 6.2. MEŘO začíná destilovat až kolem 310 °C. Do teploty 320 °C se odpaří necelých 5 hm. %. Při teplotě od 320 do 330 °C dochází k odpaření více jak 79 hm. %, kdy kolísala teplota bodu varu z důvodu pyrolytického rozkladu MEŘO. Pyrolyticky se rozkládající destilační zbytek MEŘO při teplotě 330 °C tvořil cca 15 hm. %. Necelé 1 hm. % odpařené v rozmezí teplot 85 až 300 °C je důsledkem především odpaření látek znečišťujících MEŘO, jako jsou například methanol, voda atd.

Tabulka 6.1 Vlastnosti MEŘO

Palivo			MEŘO
Kinematická viskozita při 20 °C	změřeno	mm ² /s	7,2
Kinematická viskozita při 40 °C	změřeno	mm ² /s	4,4
Kinematická viskozita při 30 °C	vypočteno	mm ² /s	5,6
Kinematická viskozita při 70 °C	vypočteno	mm ² /s	2,7
Kinematická viskozita při 110 °C	vypočteno	mm ² /s	1,5
Bod vzplanutí	změřeno	°C	148
Hustota při 15 °C	změřeno	kg/m ³	883
Hustota při 30 °C	změřeno	kg/m ³	871
Hustota při 70 °C	změřeno	kg/m ³	853
Hustota při 110 °C	změřeno	kg/m ³	820
Uhlík	změřeno	hm. %	74,2
Vodík	změřeno	hm. %	12,6
Dusík	změřeno	hm. %	0
Síra	změřeno	hm. %	0
Kyslík	vypočteno	hm. %	13,2
Stechiometrická spotřeba vzduchu	vypočteno	m _N ³ /kg	9,61
Stechiometrická spotřeba vzduchu	vypočteno	m _N ³ /MWh	905,6
HHV	změřeno	MJ/kg	41,0
LHV	změřeno	MJ/kg	38,2

Tabulka 6.2 Výsledky atmosférické destilace MEŘA

Palivo		MEŘO
Frakce	Teplota [°C]	Hmotnostní podíl [hm. %]
1	85 – 115	0,3
2	115 – 210	0,6
3	210 – 300	0
4	300 – 320	4,4
5	320 – 330	79,4
6	> 330	15
Zbytek		0,3
Kontrolní součet		100

6.8 MĚŘENÍ EMISÍ

Analýza emisních hodnot probíhala při atomizaci tlakovým vzduchem pomocí analyzátoru ABB EL 3020, který uvádí hodnoty emisí CO a NO v jednotkách $\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$, zatímco analýza emisních hodnot při atomizaci sytou párou probíhala pomocí analyzátoru SIEMENS ULTRAMAT 23, který uvádí hodnoty emisí CO a NO v jednotkách ppm. Tyto hodnoty bylo tedy nutné převést na $\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$ (m_N^3 je kubický metr za normálních fyzikálních podmínek, tj. $p = 101\,325\text{ Pa}$ a $t = 0\text{ °C}$), které jsou uvedeny i v zákonem daných specifických emisních limitech. Srovnání naměřených a dovolených hodnot emisí by tedy bez přepočtu z ppm na $\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$ (rovnice 6.1) nebylo možné [40].

$$Y = X \cdot \frac{\sum x_i \cdot MW_i}{22,414} \quad (6.1)$$

kde:

Y je přepočtená koncentrace NO nebo NO₂ [$\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$],

X je naměřená koncentrace NO nebo NO₂ [ppm],

x_i je hmotnostní podíl i -té složky [kg/kg],

MW_i je molekulární hmotnost i -té složky [kg/kmol].

Vzorové přepočty 1 ppm NO a 1 ppm NO₂ na $\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$ jsou uvedeny v rovnicích 6.2 a 6.3.

$$1 \text{ ppm NO} = \frac{14+16}{22,414} = 1,34 \text{ mg}/\text{m}_\text{N}^3 \quad (6.2)$$

$$1 \text{ ppm NO}_2 = \frac{14+2 \cdot 16}{22,414} = 2,05 \text{ mg}/\text{m}_\text{N}^3 \quad (6.3)$$

Pokud chceme hodnotu emisí NO vyjádřit jako ekvivalentní složku NO₂, pak je pro přepočet zapotřebí použít rovnici 6.4. Ke změně číselné hodnoty koncentrace dojde pouze v případě, kdy je tato koncentrace vyjádřena v hmotnostních jednotkách ($\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$). Pokud je koncentrace vyjádřena jinak než pomocí hmotnosti, ke změně číselné hodnoty nedochází, neboť molární objem NO a NO₂ je přibližně stejný [40].

$$[\text{NO}_2] \frac{\text{mg}}{\text{m}_\text{N}^3} = [\text{NO}] \frac{\text{mg}}{\text{m}_\text{N}^3} \cdot \frac{m_{\text{NO}_2}}{m_{\text{NO}}} = [\text{NO}] \frac{\text{mg}}{\text{m}_\text{N}^3} \cdot 1,533 \quad (6.4)$$

kde:

m je hmotnost příslušné sloučeniny [kg].

Oba tyto analyzátorů, které byly použity při zkouškách, měří koncentrace emisí vzhledem k aktuálnímu obsahu kyslíku O₂ ve spalínách. Pro porovnání těchto hodnot je tedy nutné tyto koncentrace přepočíst (rovnice 6.5) na referenční obsah kyslíku ve spalínách (3 %), jak také uvádějí specifické emisní limity pro spalování kapalných paliv [40].

$$[C]_{ref} = [C]_{měř} \cdot \frac{20,9 - [C]_{ref}}{20,9 - [C]_{měř}} = [C]_{měř} \cdot \frac{\alpha_{měř}}{\alpha_{ref}} \quad (6.5)$$

kde:

$[C]_{ref}$ koncentrace látky vzhledem k referenčnímu přebytku vzduchu [mg/m_N³],

$[C]_{měř}$ koncentrace látky vzhledem k aktuálnímu změřenému přebytku vzduchu [mg/m_N³],

$\alpha_{měř}$ aktuální změřený přebytek vzduchu [-],

α_{ref} referenční přebytek vzduchu [-].

6.8.1 SPALINOVÝ ANALYZÁTOR SIEMENS ULTRAMAT 23

Analyzátor od společnosti SIEMENS umožňuje měření NO v rozsahu 0 – 1250 mg/m_N³, SO₂ v rozsahu 0 – 3000 mg/m_N³, CO v rozsahu 0 – 1250 mg/m_N³, CO₂ v rozsahu 0 – 20 % obj. a O₂ v rozsahu 0 – 25 % obj. Kyslík je měřen paramagneticky, ostatní složky na základe infračervené (IČ) absorpce. Výstupní signál je 0,25 – 20 mA, doba náběhu je minimálně 30 min. s nejvyšší přesností po 2 hodinách, průtok plynu 60 – 120 l/h, modul RS 485.

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), chladicím modulem pro zkondenzování vlhkosti z plynu, kyselinovým filtrem, membránovým čerpadlem a externím modulem pro konverzi NO₂ na NO s garantovanou min. 95 % konverzí a katalyzátorem na bázi uhlíku-molybdenu s dlouhodobou životností.

Analyzátor SIEMENS ULTRAMAT 23 uvádí hodnoty emisí v jednotkách ppm, které je nutné převést na mg/m_N³ (m_N³ je kubický metr za normálních fyzikálních podmínek 101 325 Pa a 0 °C) dle rovnice 6.1.

6.8.2 SPALINOVÝ ANALYZÁTOR ABB EL 3020

Analyzátor od společnosti ABB umožňuje měření NO v rozsahu 0 – 1250 mg/m_N³, SO₂ v rozsahu 0 – 3000 mg/m_N³, CO v rozsahu 0 – 1250 mg/m_N³, CO₂ v rozsahu 0 – 20 % obj. a O₂ v rozsahu 0 – 25 % obj. Kyslík je měřen elektrochemicky, ostatní složky na základě infračervené (IČ) absorpce. Výstupní signál je 0,25 – 20 mA, doba náběhu je minimálně 30 min. s nejvyšší přesností po 2 hodinách, průtok plynu 60 – 120 l/h, modul RS 485. 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), chladicím modulem pro zkondenzování vlhkosti z plynu, kyselinovým filtrem, membránovým čerpadlem.

Oba zmíněné analyzátory měří emise NO a CO v poměru k aktuálnímu obsaženému kyslíku ve spalínách, respektive k aktuálnímu přebytku vzduchu. Aby bylo možné tyto koncentrace porovnávat, je nutné tyto hodnoty přepočítat na referenční přebytek vzduchu dle rovnice 6.5.

7 PLÁN MĚŘENÍ EXPERIMENTU

Při spalovacích zkouškách byly jako konstantní parametry zvoleny výkon a obsah kyslíku ve spalínách. Výkon hořáku byl přibližně 600 kW a obsah kyslíku v suchých spalínách byl udržován na hodnotě 6 %. Proměnlivé parametry zahrnovaly GLR a typ atomizačního média. Zkoušky byly provedeny při GLR nabývajících hodnot 15, 20 a 25 % s dvěma typy atomizačního média, konkrétně nepředehřátým tlakovým vzduchem a přehřátou párou.

Měření bylo rozděleno do tří částí dle sledovaných charakteristik. V části A byla pozornost zaměřena na měření emisí NO a CO, stabilitu hoření při zhasnutém stabilizačním hořáku a také kvalitu rozprašování. V části B byly měřeny veličiny pro stanovení tepelných toků do stěn spalovací komory v jednotlivých sekcích. Část C byla zaměřena na měření teplot v plamenu. Měření A bylo provedeno pro všechna nastavení, měření B a C jen pro GLR 20 %, viz tabulka 7.1.

Tabulka 7.1 Plán měření

měření		GLR [%]		
		15	20	25
A	tlakový vzduch	•	•	•
	přehřátá pára	•	•	•
B	tlakový vzduch		•	
	přehřátá pára		•	
C	tlakový vzduch		•	
	přehřátá pára		•	

• měření proběhlo

8 VÝSLEDKY

8.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY NASTAVENÍ SPALOVACÍHO SYSTÉMU

Výběr důležitých hodnot parametrů nastavení spalovacího systému je uveden v tabulkách 8.1 a 8.2. Nižší průtok spalovacího vzduchu v případě atomizace tlakovým vzduchem je způsoben jeho částečným nahrazením tlakovým vzduchem. Díky exotermní reakci mezi parami rozprášeného paliva a kyslíkem obsaženým v tlakovém vzduchu bylo možné snížit průtok spalovacího vzduchu do spalovací komory.

Tabulka 8.1 Výběr některých hodnot parametrů nastavení spalovacího systému při atomizaci tlakovým vzduchem

GLR		Zemní plyn		MĚŘO			Spal. vz.	Tlak. vz.
	Měřená veličina	Průtok na plynoměru	Výkon hořáku	Průtok oleje	Tlak před hořákem	Tlak v systému	Průtok vzduchu	Tlak na hořáku
	Jednotka	m _N ³ /h	kW	l/h	bar	kPa	m _N ³ /h	kPa
	PID	F60U	Q91	F243	P227	P226	F61	P233
15		3,7	37,3	52,0	1,8	5,0	685,8	2,2
20		4,5	44,3	52,0	2,2	5,0	708,3	2,6
25		4,0	39,5	52,0	3,0	5,0	733,3	3,5

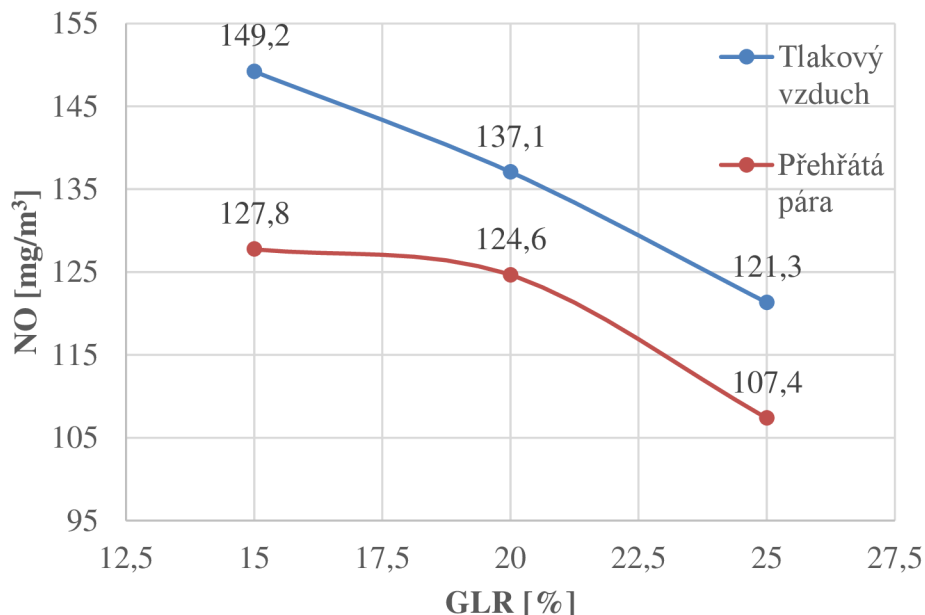
Tabulka 8.2 Výběr některých hodnot parametrů nastavení spalovacího systému při atomizaci přehřátou párou

GLR		Zemní plyn		MĚŘO			Spal. vz.	Pára
	Měřená veličina	Průtok na plynoměru	Výkon hořáku	Průtok oleje	Tlak před hořákem	Tlak v systému	Průtok vzduchu	Tlak na hořáku
	Jednotka	m _N ³ /h	kW	l/h	bar	kPa	m _N ³ /h	kPa
	PID	F60U	Q91	F243	P227	P226	F61	P233
15		8,1	81,0	52,0	2,2	5,0	794,5	2,6
20		6,2	61,0	52,0	2,8	5,0	880,0	3,0
25		8,5	82,3	52,0	3,0	5,0	847,0	3,6

8.2 EMISE NO A CO

Měření v části A bylo zaměřeno na měření emisí při různých provozních podmínkách spalování. Na obrázku 8.1 jsou graficky znázorněny naměřené hodnoty, které jsou proloženy polynomem. Z obrázku je zřejmý výrazný rozdíl v emisích NO mezi atomizací tlakovým vzduchem a přehřátou párou. Tento nárůst v průměru vychází na 15 mg/m³ v neprospěch atomizace tlakovým vzduchem. Příčinou je skutečnost, že pára vstupuje do spalovacího prostoru jako inert (tj. neúčastní se reakcí spalování), zatímco tlakový vzduch (resp. kyslík) je reaktant. Přestože měla pára na vstupu do komory teplotu vyšší než tlakový vzduch (150 °C, respektive 16 °C), ochlazovala vzniklé spaliny více než vzduch. Tlakový vzduch se totiž jako reaktant podílel na spalování par kapalného paliva, a tak v konečném důsledku naopak spaliny

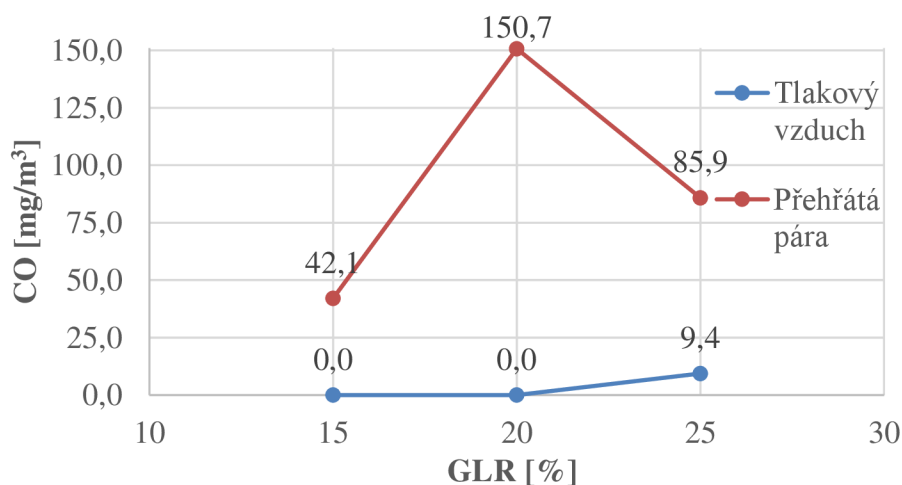
ohřival. Vyšší teplota spalin pak měla za následek vyšší tvorbu termických oxidů dusíku. Z obrázku 8.1 je zřejmé, že u obou atomizačních médií s rostoucím GLR klesá tvorba NO v důsledku snížení teplotních špiček v jádru plamene zvyšujícím se průtokem atomizačního média.



Obrázek 8.1 Závislost tvorby NO na GLR a typu atomizačního média

Závislost obsahu oxidu uhelnatého (CO) ve spalinách na GLR je zobrazena na obrázku 8.2. Z něj je zřejmé, že při atomizaci přehřátou párou vzniká výrazně více CO než u tlakového vzduchu. Tento rozdíl je v průměru přibližně 90 mg/m³, což naznačuje dokonalejší spalování při použití tlakového vzduchu jako atomizačního média. Nejvyšší emise CO byly naměřeny při atomizaci párou při GLR = 20 %.

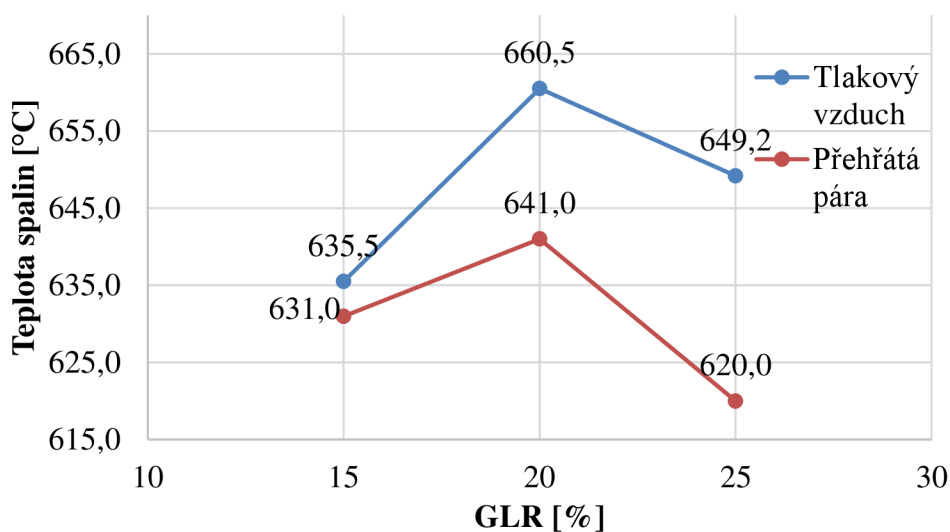
Vysvětlení této skutečnosti opět spočívá v tom, že tlakový vzduch má charakter reaktantu, a tak se bezprostředně po rozprášení paliva a odpaření kapiček účastní spalovací reakce. Naopak pára má charakter inertu a tedy zhoršuje promíchání par paliva se spalovacím vzduchem, respektive s kyslíkem. Mimo jiné společně s dusíkem obsaženým ve spalovacím vzduchu snižuje teplotu v plamenu, čímž se vytváří podmínky vhodné pro tvorbu CO.



Obrázek 8.2 Závislost CO na GLR a typu atomizačního média

8.3 TEPLOTA SPALIN

Závislost teploty spalin na GLR je uvedena na obrázku 8.3. Z obrázku je zřejmé, že teplota spalin byla vyšší při atomizaci tlakovým vzduchem, což je opět důsledkem exotermní reakce mezi tímto atomizačním médiem a palivem (pára jako inert teplo odebírá). Nejvyšší teploty spalin bylo dosaženo u obou atomizačních médií shodně při GLR = 20 %. Naopak nejnižší teploty bylo při atomizaci tlakovým vzduchem dosaženo při GLR = 15 %, zatímco při atomizaci přehřátou párou při GLR = 25 %. Průměrná teplota spalin byla při atomizaci tlakovým vzduchem $T_{10;TV} = 653,0$ °C, zatímco při atomizaci párou $T_{10;SP} = 635,1$ °C.



Obrázek 8.3 Porovnání závislosti mezi teplotou spalin a GLR při atomizaci tlakovým vzduchem a přehřátou párou

8.4 ROZLOŽENÍ TEPELNÝCH TOKŮ Z HORKÝCH SPALIN DO STĚNY SPALOVACÍ KOMORY

Zkušebna hořáků umožňuje vyhodnotit tepelné toky z horkých spalin do stěn spalovací komory po délce plamene. Vyhodnocení je založeno na měření vstupní a výstupní teploty a průtoku chladicí vody danou sekci.

Výpočet tepelných toků je založen na využití rovnic 8.1, 8.2, 8.3 a 8.4. Výsledky výpočtů jsou shrnuty v tabulkách 8.3 a 8.4. Průtoky paliva jsou v obou případech shodné. Výkon zemního plynu je odlišný, což je nutné brát v úvahu pro případ porovnání tepla přijatého chladicí vodou. Rozdíl v teple předaném stěnou spalovací komory je větší v případě atomizace tlakovým vzduchem, přestože byl výkon zemního plynu v tomto případě oproti atomizaci párou téměř poloviční. To svědčí o lepší účinnosti procesu. Rozdíl mezi účinnostmi je přibližně 6 %, což je důsledkem exotermní reakce probíhající mezi palivem a tlakovým vzduchem.

$$\rho_i = 1006 - 0,26 \cdot \frac{dt}{2} - 0,0022 \cdot \left(\frac{dt}{2}\right)^2 \quad (8.1)$$

$$c_{p,i} = 4210 - 1,363 \cdot \frac{dt}{2} + 0,014 \cdot \left(\frac{dt}{2}\right)^2 \quad (8.2)$$

$$A = \pi \cdot D \cdot l_i \quad (8.3)$$

$$\dot{q}_i = \frac{\dot{m}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta T_i}{A_i} = \frac{\dot{V}_i \cdot \rho_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta T_i}{A_i} \quad (8.4)$$

kde:

ρ_i	hustota chladicí vody v i-té sekci [kg/m ³]
dt	diferenciál teploty ($T_{\text{voda, vstup}} + T_{\text{voda, výstup}}$) [°C]
$c_{p,i}$	měrná tepelná kapacita chladicí vody v i-té sekci [J/kg·K]
\dot{m}_i	hmotnostní průtok chladicí vody v i-té sekci [kg/s]
\dot{V}_i	objemový průtok chladicí vody v i-té sekci [kg/s]
A_i	teplosměnná plocha i-té sekce [m ²]
D	průměr spalovací komory [m]
l_i	délka i-té sekce spalovací komory [m]
ΔT_i	teplotní rozdíl vstupní a výstupní teploty chladicí vody v i-té sekci [K]
\dot{q}_i	hustota tepelného toku do stěny i-té sekce [W/m ²]

Tabulka 8.3 Přestup tepla a účinnost při atomizaci tlakovým vzduchem a přehřátou párou

veličina	jednotka	tl. vzduch	přehřátá pára	
Odvedená tepla po sekcích	sekce 1	kW/m ²	18	19,1
	sekce 2	kW/m ²	33,7	34,6
	sekce 3	kW/m ²	53	53,8
	sekce 4	kW/m ²	49,7	46,8
	sekce 5	kW/m ²	37,4	35
	sekce 6	kW/m ²	27,1	25,3
	sekce 7	kW/m ²	16,8	16,6
Výkon – suma všech sekcí	kW	383,9	367,1	
LHV MEŘO	MJ/kg	38,2	38,2	
průtok MEŘO	kg/h	52	52	
výkon MEŘO	kW	551,8	551,8	
výkon ZP	kW	44,4	78,6	
účinnost	%	64,4	58,2	

Účinnost v tabulce 8.3 byla vypočtena jako podíl příkonu spalovací komory (součet výkonu zemního plynu a MEŘO) a výkonu (dle tepla přijatého chladicí vodou), viz rovnice 8.5.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_{out}} = \frac{\dot{Q}_{ZP} + \dot{Q}_{MEŘO}}{\dot{Q}_{chl.voda}} = \frac{\dot{Q}_{ZP} + m_{MEŘO} \cdot LHV_{MEŘO}}{\dot{Q}_{chl.voda}} \quad (8.5)$$

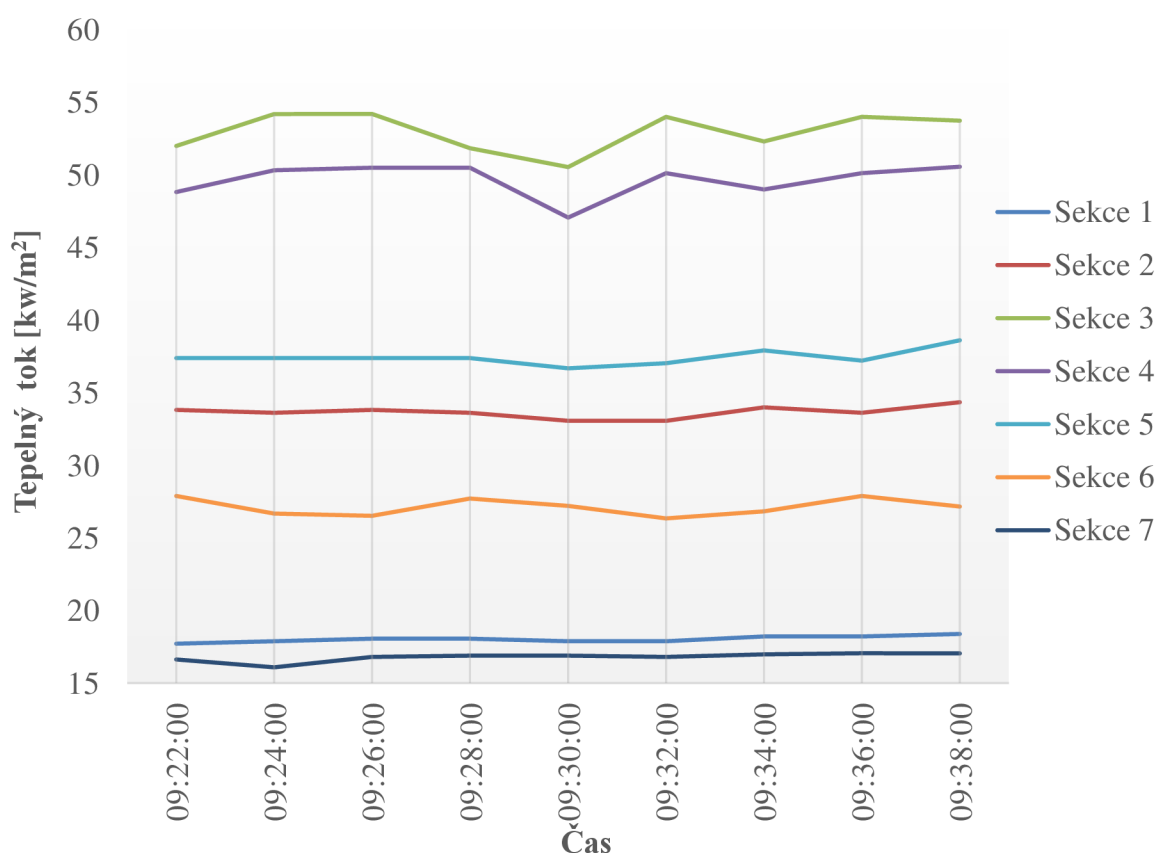
kde:

η účinnost [-]

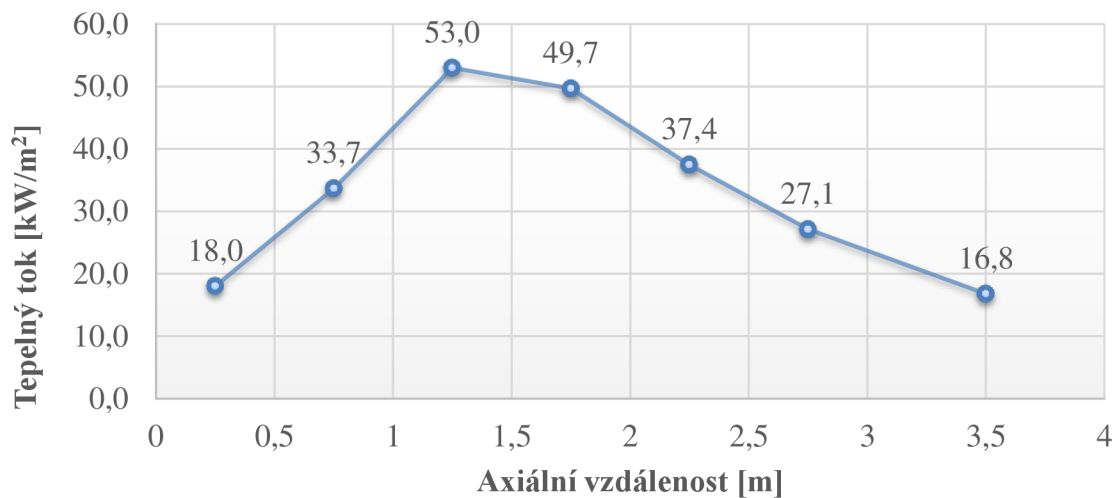
\dot{Q}_{ZP}	výkon zemního plynu [kW]
\dot{Q}_{MERO}	výkon MEŘO [kW]
\dot{m}_{MERO}	hmotnostní průtok MEŘO [kg/s]
LHV_{MERO}	výhřevnost MEŘO [MJ/kg]
$\dot{Q}_{chl. voda}$	výkon spalovací komory (z tepla přijatého chladicí vodou) [kW]

Při měření tepelných toků bylo nutné nejprve dosáhnout termodynamicky stabilního stavu ve spalovací komoře. Ten byl dosažen na základě měření rozdílu teploty spalin v intervalu 30 minut a kontinuálního vyhodnocování tepelného toku (viz obrázky 8.4 a 8.6). Jakmile byl teplotní rozdíl v intervalu 10 minut do 10 °C a zároveň trend tepelných toků vykazoval konstantní průběh, začalo měření tepelných toků v jednotlivých sekcích spalovací komory.

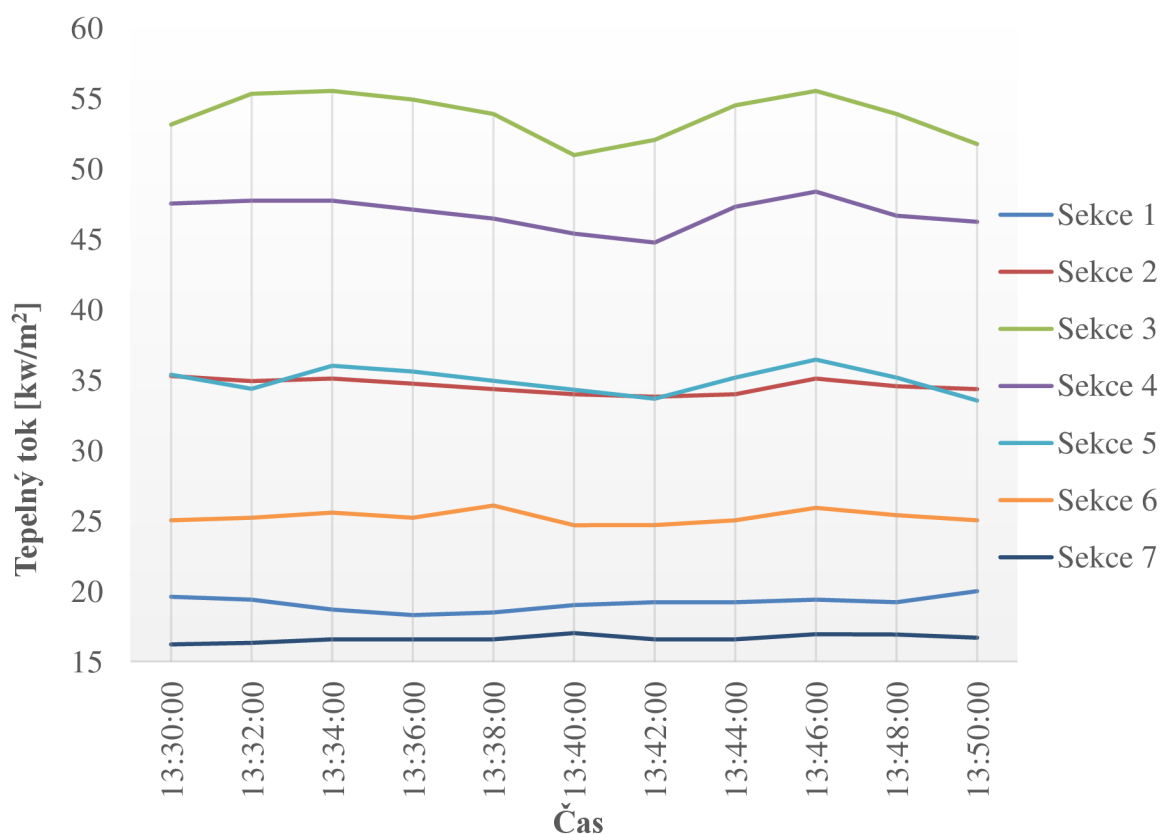
Distribuce tepla mezi jednotlivými sekcemi je v případě atomizace tlakovým vzduchem a přehřátou párou velmi podobná a není tedy pravděpodobně závislá na typu atomizačního média. Největšího tepelného toku bylo dosaženo ve třetí sekci (viz obrázky 8.5 a 8.7). V tomto bodě již bylo palivo nejvíce vypařeno a docházelo k jeho nejintenzivnějšímu spalování. Největší rozdíl v tepelných tocích dle závislosti na typu atomizačního média byl dosažen ve čtvrté sekci. V případě atomizace tlakovým vzduchem zde byl tepelný tok větší o přibližně 3 kW/m². To je opět důsledkem exotermní reakce mezi tlakovým vzduchem a palivem, který způsobil posun maximálních teplot směrem od hořáku do čtvrté sekce (viz kapitola 8.5).



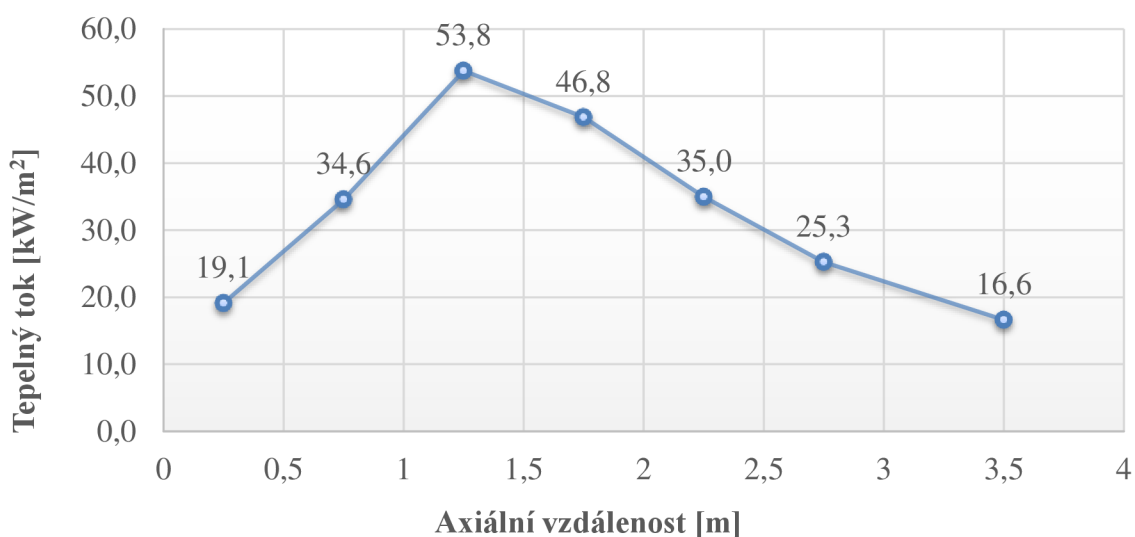
Obrázek 8.4 Zobrazení tepelných toků v jednotlivých sekcích při atomizaci tlakovým vzduchem



Obrázek 8.5 Zobrazení závislosti tepelných toků na axiální vzdálenosti od trysky při atomizaci tlakovým vzduchem



Obrázek 8.6 Zobrazení tepelných toků v jednotlivých sekcích při atomizaci přehřátou párou



Obrázek 8.7 Zobrazení závislosti tepelných toků na axiální vzdálenosti od trysky při atomizaci přehřátou párou

8.5 ROZLOŽENÍ TEPLOT V HORIZONTÁLNÍ ROVINĚ SYMETRIE SPALOVACÍ KOMORY

8.5.1 PODSTATA MĚŘENÍ PROSTŘEDNICTVÍM TERMOČLÁNKŮ

Měření teplot pomocí termočlánků je založeno na tzv. Seebeckově jevu. Tento jev je charakteristický převodem tepelné energie na elektrickou. V té části vodiče, kde je vyšší teplota, mají částice větší energii, a tak difundují do těch částí vodiče, kde je teplota naopak nižší. Na základě tohoto principu dochází k převaze kladných nebo záporných nábojů.

V praxi je tohoto jevu k měření teploty využito tak, že se vodiče vkládané do teplotního pole skládají z dvou různých materiálů. V takovém vodiči se poté generuje tzv. termoelektrické napětí (rovnice 8.6). Na jednotlivých koncích vodiče je rozdílná hustota volných elektronů, neboť elektrony nacházející se ve vyšších teplotách mají vyšší kinetickou energii. Díky tomuto rozdílu vzniká ve vodiči elektrický potenciál. Pokud použijeme dva materiály s rozdílnou hodnotou elektrických potenciálů, můžeme na základě znalosti těchto hodnot určit aktuální měřenou teplotu [33].

$$U = S(T_1 - T_0) \quad (8.6)$$

kde:

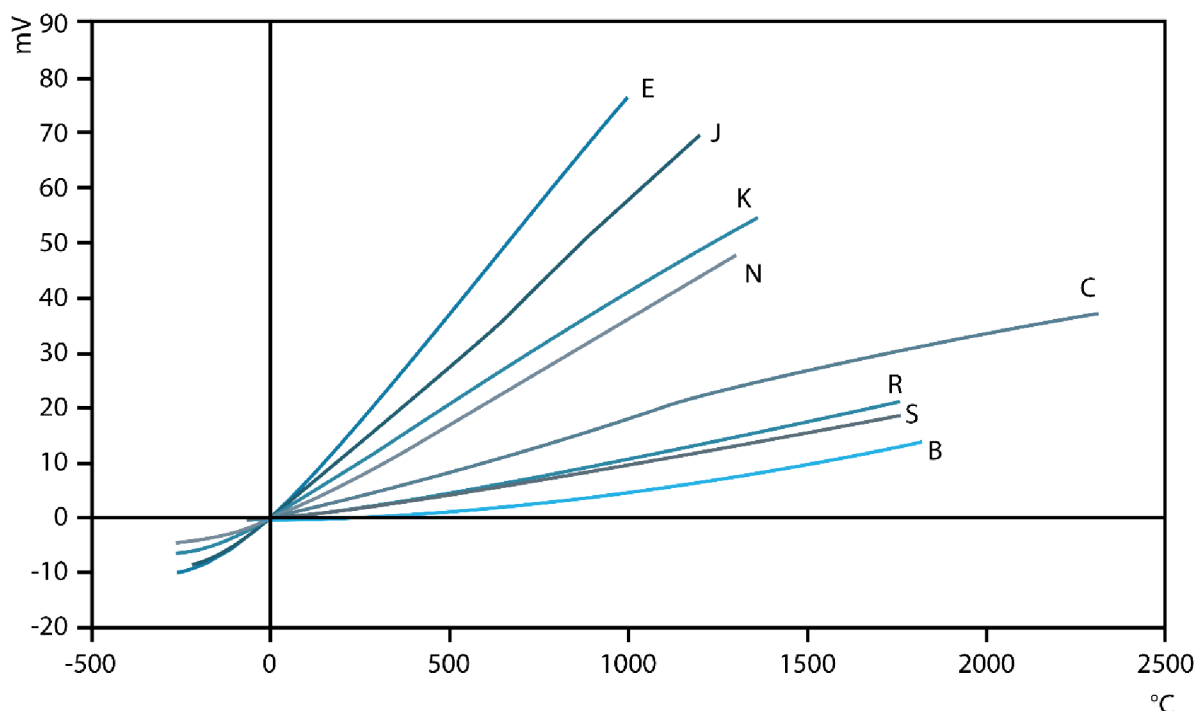
- U je napětí [mV],
- S je Seebeckův koeficient ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$),
- T_1 je teplota na teplé straně vodiče,
- T_0 je teplota na studené straně vodiče.

Seebeckův koeficient neboli termoelektrické napětí (rovnice 8.6) je obdobně jako hustota, tepelná vodivost charakteristikou daného materiálu. Jeho hodnota tedy není závislá na tvaru ani velikosti vodiče, ale je pouze funkcí teploty. Dle hodnoty Seebeckova koeficientu, ceny, chemické stability apod. lze rozhodnout o vhodném výběru materiálů pro konkrétní průmyslové aplikace. Nejčastěji používanými kovy jsou platina, měď, nikl atd. V tabulce 8.4 se nachází rozdělení jednotlivých typů termočlánků [33].

Tabulka 8.4 Označení jednotlivých typů termočlánků [41]

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

Volba vhodného typu termočlánku je závislá na očekávané měřené teplotě a také na prostředí, v jakém má měření probíhat. Teplotní rozsahy jednotlivých termočlánků jsou uvedeny na obrázku 8.8, kde je uvedena závislost mezi měřenou teplotou a generovaným napětím na jednotlivých typech termočlánků.



Obrázek 8.8 Závislost generovaného napětí na teplotě pro jednotlivé typy termočlánků [41]

Jelikož se v praxi termočlánky nacházejí ve větší vzdálenosti od sběrných či zobrazovacích zařízení, používá se tzv. kompenzační vedení, neboť vodiče používané přímo k měření teploty v daném teplotním poli jsou velmi finančně nákladné. Často se jako kompenzační vedení volí měděný drát o zvoleném průřezu. Tato vedení je vhodné doplnit o kvalitní tepelnou izolaci, aby nedocházelo k ovlivnění měření okolní tepelnou radiací [33].

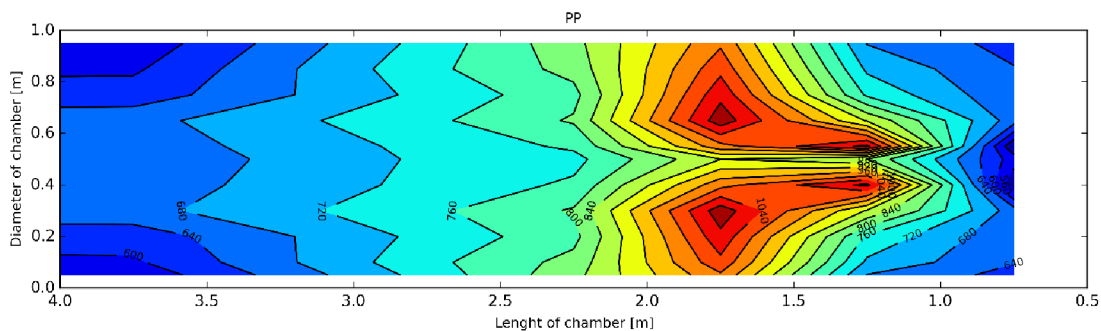
Měření teplot v této diplomové práci probíhalo pomocí termočlánku typu R, který lze použít v inertním a oxidačním prostředí. Jeho výhodou je široké rozpětí měřených teplot (0 °C až 1480 °C). Nevýhodou je neschopnost pracovat v redukčním prostředí a nutnost uložení vodičů do hliníkových ochranných trubek. Při použití železných trubek může dojít k difuzi a narušení krystalové mřížky [33].

8.5.2 VLASTNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ

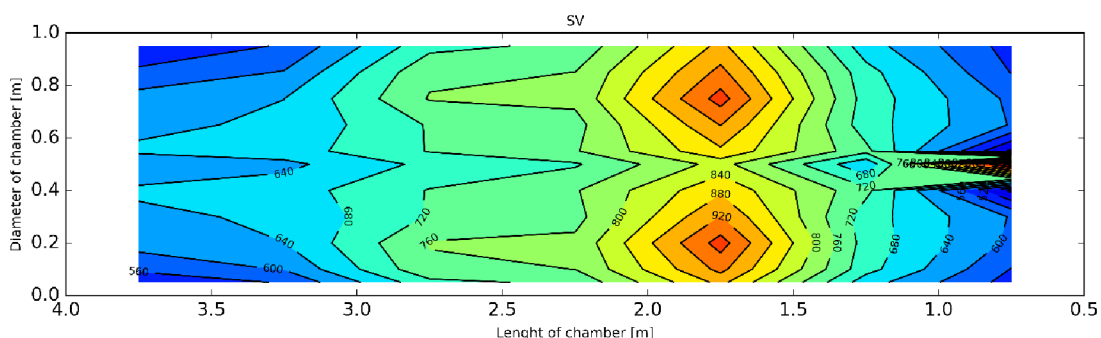
Měření teplot v plamenu probíhalo zvlášť ve všech sekcích spalovací komory pomocí 8 termočlánků. Jakmile byl v komoře dosažen termodynamicky stabilní stav (tedy výstupní teplota spalin byla po určité době konstantní), byly do vzdálenosti 5 cm od stěny komory (tedy 45 cm od její horizontální osy) nasunuty termočlánky s vodou chlazeným pláštěm. Měření teplot v dané poloze probíhalo vždy 1 minutu se záznamem do dataloggeru každou vteřinu. Mezi měřeními byl termočlánek vždy 1 minutu ponechán v aktuální měřicí poloze, aby bylo dosaženo ustáleného stavu, a tedy co nejpřesnějších výsledků. Měření probíhalo celkem v šesti polohách ve vzdálenostech 5, 10, 20, 30, 40 a 50 cm od stěny komory. Z naměřených teplot byl následně vypočítán aritmetický průměr. Z tabulky naměřených hodnot byly prostřednictvím algoritmu v programovacím jazyku Python vygenerovány obrázky 8.9 a 8.10 zobrazující rozložení teplot ve spalovací komoře.

Měření teplot v plamenu probíhalo v obou případech (u tlakového vzduchu i přehřáté páry) naprosto stejně. Z obrázků 8.9 a 8.10 je patrné, že při atomizaci přehřátou párou bylo ve spalovací komoře dosaženo vyšších teplot, což přímo nekoresponduje s dosavadními výsledky. Při atomizaci přehřátou párou bylo dosaženo nižší účinnosti a nižších tepelných toků. Dle tepla přijatého chladičí vodou, které bylo vyšší v případě atomizace tlakovým vzduchem, lze předpokládat také vyšší teplotu ve spalovací komoře. Tento rozpor má pravděpodobně dvě různá, vzájemně se nevylučující vysvětlení. Zaprvé tepelný tok skrze stěnu spalovací komory záleží nejen na teplotě plamenu, ale také na zdržné době. Pokud byla zdržná doba spalin v komoře delší v případě atomizace tlakovým vzduchem, mohlo být důsledkem tohoto jevu právě navýšení tepelného toku. Dalším podstatným faktem ovlivňujícím naměřené hodnoty teplot v plamenu je uložení, respektive natočení trysky v atomizéru. Jelikož nebylo pravděpodobně dodrženo stejné natočení trysek při atomizaci přehřátou párou a tlakovým vzduchem, došlo pravděpodobně ke zkreslení výsledků. Pro případ přehřáté páry pravděpodobně jeden výstupní otvor trysky směřoval přímo na vsunuté termočlánky, což zvýšilo naměřené hodnoty oproti měření, kde výstupní otvory trysky směřovaly mimo.

Rozložení teplot je pro případ atomizace párou i tlakovým vzduchem podobné. U tlakového vzduchu dochází k protažení oblastí se stejnou teplotou v axiálním směru, což je pravděpodobně důsledkem exotermní reakce mezi palivem a tlakovým vzduchem. Při atomizaci párou, která je inertní, k tomuto jevu nedochází.



Obrázek 8.9 Rozložení teplot spalin uvnitř spalovací komory při atomizaci přehřátou párou



Obrázek 8.10 Rozložení teplot spalin uvnitř spalovací komory při atomizaci tlakovým vzduchem

8.6 STABILITA HOŘENÍ BEZ PODPORY STABILIZAČNÍHO HOŘÁKU

U všech uvedených nastavení bylo testováno spalování MEŘO bez podpory stabilizačního hořáku. Při zhasnutí stabilizačního hořáku bylo hoření v obou případech stabilní, nebyla pozorována tendence ke zhasnutí, zášlehu nebo utržení plamene.

8.7 USAZOVÁNÍ PALIVA NA DNĚ SPALOVACÍ KOMORY

Usazování paliva na dně spalovací komory nebylo pozorováno u žádného z testovaných nastavení, což značí kvalitní rozprašování paliva užitím effervescentního atomizéru v testovaném rozsahu GLR a při daném přebytku spalovacího vzduchu.

8.8 TVAR A BARVA PLAMENE

Při změně atomizačního média došlo ke změně ostroty a barvy plamene – plamen změknl. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 8.5. Při vyšším GLR se plamen zkrátil a zostřil.

Tabulka 8.5 Geometrický a vizuální popis plamene v závislosti na použitém atomizačním médiu

atomizační médium	GLR	délka [m]	průměr [m]	popis
tlakový vzduch	15	2,1	0,95	stabilní žlutý ostrý
	20	2,0	0,95	stabilní žlutý ostrý
	25	2,0	0,95	stabilní žlutý ostrý
přehřátá pára	15	2	0,9	stabilní žlutý měkký
	20	2	0,9	stabilní žlutý měkký
	25	1,9	0,9	stabilní žlutý měkký



Obrázek 8.11 Plamen při spalování kapalného paliva

8.9 STANOVENÍ CHYBY MĚŘENÍ TEPELNÝCH TOKŮ

Výpočet chyby vychází z teorie šíření chyb (propagation of uncertainty). Experimentální data vždy obsahují nějaké systematické nebo náhodné chyby. Tyto chyby nejčastěji vyplývají z nepřesnosti měřicích zařízení a jsou definovány přímo výrobcem tzv. intervalem přesnosti. Absolutní chybu lze vyjádřit směrodatnou odchylkou σ , která je rovna kladné části druhé odmocniny z rozptylu σ^2 [42]. Její vyhodnocení se nachází v tabulkách 8.6 a 8.7.

Rovnice 8.7 je funkcí dvou proměnných A , B se směrodatnými odchylkami σ_A , σ_B , korelačním koeficientem ρ_{AB} a známou reálnou konstantou a . Tuto funkci lze obecně zapsat následovně [42]:

$$f = aAB \quad (8.7)$$

Rozptyl této funkce je definován následovně [42]:

$$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + 2\frac{\sigma_A}{A} \cdot \frac{\sigma_B}{B} \cdot \rho_{AB} \quad (8.8)$$

Pro usnadnění výpočtu budeme předpokládat, že hustota a měrná tepelná kapacita jsou konstantní pro všech 7 sekcí spalovací komory. Součinem těchto konstant dostáváme konstantu a . Chyba se do výpočtu dostává prostřednictvím měřených veličin, tedy objemového průtoku chladicí vody V_i a rozdílu její vstupní a výstupní teploty Δt_i . Rozptyl tepelného toku do i -té sekce spalovací komory se vypočítá dle rovnice 8.9 [42].

$$\left(\frac{\sigma_{\dot{q}_i}}{\dot{q}_i}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t_i}}{\Delta t_i}\right)^2 + 2\frac{\sigma_{V_i}}{V_i} \cdot \frac{\sigma_{\Delta t_i}}{\Delta t_i} \cdot \rho_{V_i \Delta t_i} \quad (8.9)$$

Pro určení rozptylu tepelného toku je nejprve zapotřebí určit rozptyl teplotního rozdílu Δt_i . Ten je funkcí vstupní a výstupní teploty, což lze obecně zapsat následovně [42]:

$$f = aA \pm bB \quad (8.10)$$

kde a, b jsou známé konstanty. Rozptyl zmíněné funkce se vypočítá dle rovnice 8.11 [42].

$$\sigma_f^2 = a^2\sigma_A^2 + b^2\sigma_B^2 \pm 2abcov_{AB} \quad (8.11)$$

kde:

cov kovariance [-]

Rozptyl teplotního rozdílu pro i -tou sekci je pak:

$$\sigma_{\Delta t_i}^2 = \sigma_{t_{OUT,i}}^2 + \sigma_{t_{IN}}^2 - 2cov_{t_{OUT,i},t_{IN}} \quad (8.12)$$

Tabulka 8.6 Výpočet absolutní a relativní chyby při výpočtu odvedeného tepla v případě atomizace tlakovým vzduchem

Tlakový vzduch						
sekce	průměrný průtok vody	průměrná teplota výstup	teplota vstup	průměrné odvedené teplo	absolutní chyba	relativní chyba
	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[%]
1	2,3	26,4	15,8	18,0	0,7	4,0 %
2	2,5	34,0	15,8	33,7	0,8	2,4 %
3	2,2	47,8	15,8	53,0	0,7	1,4 %
4	2,5	43,2	15,8	49,7	0,8	1,6 %
5	2,4	36,9	15,8	37,4	0,8	2,1 %
6	2,2	32,1	15,8	27,1	0,7	2,6 %
7	2,1	35,4	15,8	30,2	0,7	2,2 %

Tabulka 8.7 Výpočet absolutní a relativní chyby při výpočtu odvedeného tepla v případě atomizace párou

Přehřátá pára						
sekce	průměrný průtok vody	průměrná teplota výstup	teplota vstup	průměrné odvedené teplo	absolutní chyba	relativní chyba
	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[%]
1	2,7	25,0	15,3	19,1	0,8	4,4 %
2	2,5	34,0	15,3	34,6	0,8	2,3 %
3	2,8	41,6	15,3	53,8	0,9	1,7 %
4	2,9	37,2	15,3	46,8	0,9	2,0 %
5	2,9	31,7	15,3	35,0	0,9	2,6 %
6	2,4	29,5	15,3	25,3	0,8	3,0 %
7	2,9	29,2	15,3	16,6	0,5	3,1 %

ZÁVĚR

Při zjišťování dosažených výsledků spalování kapalných paliv s různými atomizačními médii bylo zjištěno, že se jedná o velmi málo prozkoumanou problematiku. V této souvislosti lze považovat dosažené výsledky za zajímavé.

Výsledky experimentálních měření ukazují, že tlakový vzduch je z hlediska účinnosti spalování vhodnější alternativou k přehřáté páře. Rozdíl účinností je 6,2 %. Příčinou je pravděpodobně exotermická reakce mezi tlakovým vzduchem a spalovaným palivem, díky které bylo dosaženo vyšších teplot v plamenu a vyšších tepelných toků. Na druhou stranu dochází při atomizaci tlakovým vzduchem k nárůstu emisí NO o 15 mg/m_N³, a to v důsledku zvýšené teploty v plamenu.

Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkonu od 1 do 5 MW platné do 31. prosince 2017 stanovují horní hranici NO_x na hodnotě 500 mg/m_N³ a CO na hodnotě 175 mg/m_N³. Od 1. ledna 2018 dojde ke zpřísnění limitů na hodnoty 130 mg/m_N³ pro případ NO_x a 80 mg/m_N³ u CO [32]. Z naměřených výsledků vyplývá, že během experimentů nebyl překročen emisní limit platný do 31. prosince 2017 ani v jednom případě. Přísnější emisní limity CO platné od 1. ledna 2018 byly dodrženy při atomizaci tlakovým vzduchem ve všech režimech měření. Při atomizaci přehřátou párou při GLR 20 % a 25 % byl nový emisní limit překročen. Emisní limity platné pro NO_x od 1. ledna 2018 byly při atomizaci přehřátou párou splněny ve všech režimech měření. Během atomizace tlakovým vzduchem byl limit překročen při GLR 15 % a 20 % (při GLR 25 % byl limit dodržen). Zpřísněné emisní limity lze tedy ve výše zmíněných režimech dodržet.

Vliv GLR na spalování byl patrný v několika hlediscích. Při zvyšujícím se poměru atomizačního média k palivu došlo ke zkrácení a zostření tvaru plamenu. Při GLR = 20 % bylo zaznamenáno dosažení maximální teploty spalin u obou použitých atomizačních médií.

Trend v rozložení tepelných toků je velmi podobný, vliv atomizačního média na tuto charakteristiku nebyl prokázán. Pouze ve čtvrté sekci bylo při použití tlakového vzduchu dosaženo o přibližně 3 kW/m² vyššího tepelného toku v důsledku protažení vyšších teploty v plamenu do této sekce. Testování stability hoření neprokázalo žádné problémy ani při zhasnutém stabilizačním hořáku.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Spotřeba elektřiny v ČR – dlouhodobý vývoj. *Energetika v ČR* [online]. 17.3.2017, [cit. 12.5.2017]. Dostupné z <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-v-cr.html>
- [2] CHLUMSKÝ, M. *Srovnání nákladů jaderných a uhelných elektráren*. Praha: Vysoké učení technické v Praze, Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2014. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Beneš, Ph.D.
- [3] TVERBERG, G. *World Energy Consumption Since 1820 in Charts*. Our Finite World [online]. 12. 3. 2012, [cit. 12. 5. 2017]. Dostupné z <https://ourfinitemworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>
- [4] KERMES, V., BĚLOHRADSKÝ, P. *Biodiesel (EN 14213) heating oil substitution potential for petroleum based light heating oil in a 1 MW stationary combustion facility*. *Biomass and Bioenergy*, číslo 49. Elsevier, 2013. ISSN 0961-9534.
- [5] SOVANI, S.D., SOJKA, P.E., LEFEBVRE, A.H. *Effervescent atomization*. *Progress in energy and combustion science*, číslo 27, Elsevier, 2000. ISSN 0360-1285.
- [6] Alonso, J. S. J., SASTRE, J.A.L., ROMERO-ÁVILA, C., ROMERO, E.J.L. *Combustion of rapeseedoil and diesel oil mixtures for use in the production of heat energy*. *Fuel Processing Technology*, číslo 87. Elsevier, 2006. ISSN: 0378-3820
- [7] OCHOWJAK, M. *The effervescent atomization of oil-in-water emulsions*. *Chemical Engineering and Procession: Process Intensification*, číslo 52, Elsevier, 2012. ISSN 0255-2701.
- [8] ZHIFANG CHEN a kol. *Effect of fuel temperature on the methanol spray and nozzle internal flow*. *Applied Thermal Engineering*, číslo 114, Elsevier, 2017. ISSN 1359-4311.
- [9] LI, Z. a kol. *Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer*. *Fuel*, číslo 103. Elsevier, 2013. ISSN: 0016-2361.
- [10] YOKOI, S. a kol. *Experimental investigation of atomization and combustion characteristics of high-pressure pulse sprays*. *Fuel Processing Technology*, číslo 148. Elsevier, 2016. ISSN: 0378-3820
- [11] OCHOWJAK, M. *The experimental study on the viscosity effect on the discharge coefficient for effervescent atomizers*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, číslo 50, Elsevier, 2013. ISSN 0894-1777.
- [12] WU, S-R., CHANG, W-CH., CHIAO, J. *Low NO_x heavy fuel combustion with high temperature air*. *Fuel*, číslo 86. Elsevier, 2007. ISBN 0016-2361.
- [13] JEDELSKÝ, J., JÍCHA, M. *Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomisers for industrial burners*. *Applied Thermal Engineering*, číslo 96, Elsevier, 2016. ISSN 1359-4311.
- [14] JEDELSKY, J., LANDSMANN, M, JÍCHA, M., KUŘITKA, I. *Effervescent atomizer: Influence of the operation conditions and internal geometry on spray structure; study using PIV-PLIF*. In 22 Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. 1. Como Lake, Italy: Politecnico di Milano, 2008. s. 1-8. ISBN: 978-88-903712-0-2.

- [15] CHEN, L., LIU, Z., SUN, P., HUO, W. *Formulation of a fuel spray SMD model at atmospheric pressure using Design of Experiments (DoE)*. Fuel, číslo 153. Elsevier, 2015. ISSN: 0016-2361.
- [16] MA, X., DUAN, Y., LIU, M. *Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer*. Experimental Thermal and Fluid Science, číslo 46, Elsevier, 2013. ISSN 0894-1777.
- [17] ERAZO, J.A., PARTHASARATHY, R., GOLLAHALLI, S. *Atomization and combustion of canola methyl ester biofuel spray*. Fuel, číslo 89. Elsevier, 2010. ISSN: 0016-2361.
- [18] JEDELSKY, J., JÍCHA, M. *Design of atomizer for waste fuel combustion with decreased exhaust gas emissions*. In Proceedings 31st International Symposium on Combustion. 1. Heidelberg, Germany: University of Heidelberg, Germany, 2006. s. 34-34.
- [19] GONG, J-S., FU, W-B. *The experimental study on the flow characteristics for a swirling gas-liquid spray atomizer*. Applied Thermal Engineering, číslo 27. Elsevier, 2007. ISSN: 1359-4311
- [20] RAHMAN, A., AMIN, A., HOSSAIN, A., FLECK, B. *Numerical investigation of two-phase nozzle flow*. Procedia engineering, číslo 90, Elsevier, 2014. ISSN: 1877-7058
- [21] DAHO, T. a kol. *Combustion of vegetable oils under optimized conditions of atomization and granulometry in a modified fuel oil burner*. Fuel, číslo 118. Elsevier, 2014. ISSN: 0016-2361
- [22] OPREA, I., MIHAESCU, L., PRISECARU, T., NEGREANU, G.P., GEORGESCU, M. E., POPA, E. *Experimental research of crude vegetable oil combustion in a small boiler – 55 kW*. Tratat de inginerie termica, 1. vydání. AGIR, 2008. ISSN: 978-973-720-166-9.
- [23] JEDELSKY, J., JÍCHA, M., SLÁMA, J., OTAHAL, J. *Development of an Effervescent Atomizer for Industrial Burners*. Energy&Fuels, 2009, roč. 2009, č. 23, s. 6121-6130. ISSN: 0887-0624.
- [24] LI, Z. a kol. *Mixing and atomization characteristics in an internal-mixing twin-fluid atomizer* Fuel, číslo 97. Elsevier, 2012. ISSN: 0016-2361.
- [25] BĚLOHRADSKÝ, P. *Metody pro určování charakteristických parametrů procesů spalování na bázi experimentů a modelování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 143 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [26] POŘÍZEK, V. *Metody pro potlačení tvorby emisí oxidů dusíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.
- [27] ZELDOVICH, Y. B. *Acta Physicochim. U.S.S.R.*, 1946; 21:577.
- [28] FENIMORE, C. P. *Reactions of fuel-nitrogen in rich flame gases*, *Combustion and Flame*. 1976; 26:249-256.
- [29] PERSHING, D., W. WENDT, J.O.L. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*. 1979; 18:60-67.
- [30] HILL S.C., SMOOT L.D. *Modelling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems*. Progress in Energy and Combustion. Science 2000; 26:417-458.

- [31] Plynárenská příručka – 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě, Praha, GAS s.r.o., 1997, ISBN 80-902339-6-1.
- [32] ČESKO, vyhláška č. 415/2012. Vyhláška č 415/2012 ze dne 21. listopadu 2012. In: sbírka zákonů České republiky. 2012 [online]. Dostupný z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [33] HUDÁK, I. *Vliv inertních plynů na charakteristické parametry spalování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 134 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.
- [34] BAUKAL, Ch. E., Jr, ed. *Oxygen-Enhanced Combustion*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2013. 792 s. ISBN 978-1-4398-6228-5.
- [35] SUCHÁNEK, P. *Zkoušky rozprašovacích hlav kapalných paliv*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.
- [36] LUND, M. T., SOJKA, P. E., LEFEBVRE, A. H., GOSSELIN, P. G. *Effervescent atomization at low mass flow rates. Part 1: the influence of surface tension*. *Atomization Spray*, 3 (1993), pp. 77-89
- [37] BORMAN, G. L., RAGLAND, K. W., *Combustion Engineering*, McGraw-Hill, 1998, ISBN 0-07-006567-5
- [38] LEFEBVRE, A. H., *Atomization and Sprays*, CRC Press, 1989, ISBN 0-89116-603-3
- [39] BAYVEL, L., ORZECOWSKI, Z., *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, 1993, ISBN 0-89116-959-8
- [40] LAXA, V. *Technická ekologie: Stanovení emisních koncentrací ve spalinách plynového hořáku*. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2006. 5 s.
- [41] KERLIN, T. W., JOHNSON, M. *Practical Thermocouple Thermometry* [online]. 2nd Edition. B.m.: International Society of Automation, 2012 [vid. 2017-03-02]. 181 s. ISBN 978-1-937560-27-0. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPTTE0002/practical-thermocouple/practical-thermocouple>
- [42] BEVINGTON, P., ROBINSON, D. K., *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, USA, McGraw-Hill, 2002, ISBN 0-07247227-8.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Dlouhodobý vývoj spotřeby elektřiny v ČR	10
Obrázek 2	Dlouhodobý vývoj světové spotřeby energie dle paliva	11
Obrázek 2.1	Závislost vzniklého množství NO na přebytku a teplotě spalovacího vzduchu	17
Obrázek 5.1.	Atomizéry s jednoduchou tryskou: cylindrická, prstencová a radiální tryska	29
Obrázek 5.2.	Deflekční atomizéry	29
Obrázek 5.3.	Dva základní tvary rozprašené kapaliny u vířivých atomizérů (dutý a plný kužel)	29
Obrázek 5.4.	Schéma duplexního atomizéru	30
Obrázek 5.5.	Typy diskových rotačních atomizérů (disk, miska, pohár)	30
Obrázek 5.6.	Lopatkový atomizér	30
Obrázek 5.7.	Schéma effervescentního atomizéru (1. plyn, 2. kapalina).....	32
Obrázek 6.1	Spalovací komora	33
Obrázek 6.2	Schéma kombinovaného hořáku	35
Obrázek 8.1	Závislost tvorby NO na GLR a typu atomizačního média.....	41
Obrázek 8.2	Závislost CO na GLR a typu atomizačního média	41
Obrázek 8.3	Porovnání závislosti mezi teplotou spalin a GLR při atomizaci tlakovým vzduchem a přehřátou párou	42
Obrázek 8.4	Zobrazení tepelných toků v jednotlivých sekcích při atomizaci tlakovým vzduchem	44
Obrázek 8.5	Zobrazení závislosti tepelných toků na axiální vzdálenosti od trysky při atomizaci tlakovým vzduchem	45
Obrázek 8.6	Zobrazení tepelných toků v jednotlivých sekcích při atomizaci přehřátou párou	45
Obrázek 8.7	Zobrazení závislosti tepelných toků na axiální vzdálenosti od trysky při atomizaci přehřátou párou	46
Obrázek 8.8	Závislost generovaného napětí na teplotě pro jednotlivé typy termočlánků	47
Obrázek 8.9	Rozložení teplot spalin uvnitř spalovací komory při atomizaci přehřátou párou	49
Obrázek 8.10	Rozložení teplot spalin uvnitř spalovací komory při atomizaci tlakovým vzduchem	49
Obrázek 8.11	Plamen při spalování kapalného paliva.....	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Mechanismy vzniku NO a NO ₂ při spalování	18
Tabulka 3.1	Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkonu od 0,3 do 50 MW platné do 31. prosince 2017.....	22
Tabulka 3.2	Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkonu od 0,3 do 50 MW platné od 1. ledna 2018.....	22
Tabulka 3.3	Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém tepelném příkonu 50 MW a vyšším	23
Tabulka 5.1	Rozdělení jednotlivých typů atomizace dle druhu používané energie.....	26
Tabulka 5.2	Vybrané fyzikální a chemické vlastnosti paliv	28
Tabulka 5.3	Srovnání fyzikálně-chemických vlastností paliv rostlinného a ropného původu.....	28
Tabulka 6.1	Vlastnosti MEŘO.....	36
Tabulka 6.2	Výsledky atmosférické destilace MEŘA	37
Tabulka 7.1	Plán měření	39
Tabulka 8.1	Výběr některých hodnot parametrů nastavení spalovacího systému při atomizaci tlakovým vzduchem	40
Tabulka 8.2	Výběr některých hodnot parametrů nastavení spalovacího systému při atomizaci přehřátou párou.....	40
Tabulka 8.3	Přestup tepla a účinnost při atomizaci tlakovým vzduchem a přehřátou párou	43
Tabulka 8.4	Označení jednotlivých typů termočlánků	47
Tabulka 8.5	Geometrický a vizuální popis plamene v závislosti na použitém atomizačním médiu.....	49
Tabulka 8.6	Výpočet absolutní a relativní chyby při výpočtu odvedeného tepla v případě atomizace tlakovým vzduchem	51
Tabulka 8.7	Výpočet absolutní a relativní chyby při výpočtu odvedeného tepla v případě atomizace párou	51

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	jednotka	název veličiny
A	m ²	plocha
$\alpha_{\text{měř}}$	-	přebytek vzduchu aktuální
α_{ref}	-	přebytek vzduchu referenční
c	obj. %, ppm	koncentrace
c_p	J/kg·K	měrná tepelná kapacita
C_D	m	výpustní koeficient trysky
$[C]_{\text{ref}}$	mg/m _N ³	koncentrace látky vzhledem k referenčnímu přebytku vzduchu
$[C]_{\text{měř}}$	mg/m _N ³	koncentrace látky vzhledem k aktuálnímu přebytku vzduchu
D	m	průměr spalovací komory
dt	°C	diferenciál teploty
GLR	%	poměr plynu a kapaliny
HHV	MJ/kg	výhřevnost
l	m	délka
LHV	MJ/kg	spalné teplo
m	kg/s	hmotností průtok
M_m	kg	molární hmotnost
P	kW	výkon
p	Pa, bar	tlak
q	W/m ²	hustota tepelného toku
Q	m _N ³ /h	průtok
Q	kW	výkon
R ²	-	koeficient determinace
SMD	m	střední velikost částic (sauter mean diameter)
t	°C	teplota
ΔT	°C	teplotní rozdíl
V	l/h	objemový průtok
V_m	m ³	molární objem
wt %	%	hmotnostní zlomek
η	-	účinnost
η	Pa·s	dynamická viskozita
ν	mm ² /s	kinematická viskozita
ρ	kg/m ³	hustota

zkratka	popis
CFD	computational fluid dynamics
CME	methylester canoly (canola methyl-ester)
ELHO	extra lehký topný olej (extra light heating oil)
FAME	methylester řepkového oleje (fat acid methylester)
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
LNG	zkapalněný zemní plyn (liquefied natural gas)
LTO	lehký topný olej
MEŘO	methylester řepkového oleje
ppm	počet částic na jeden milion (parts per million)
RME	methylester řepkového oleje (rapeseed oil methyl-esters)
SCR	selektivní katalytická redukce (selective catalytic reduction)
SNCR	selektivní nekatalytická redukce (selective non-catalytic reduction)
TTO	těžký topný olej
TZL	tuhé znečišťující látky
ZP	zemní plyn

Symbole řecké abecedy

symbol	jednotka	název veličiny
α	-	přebytek vzduchu
α_t	W/(m ² ·K)	je součinitel přestupu tepla
ε	-	je emisivita (poměrná zářivost)
σ	W/(m ² ·K ⁴)	Stefan-Boltzmannova konstanta
ρ	kg/m ³	hustota chladicí vody v i-té sekci
η	-	účinnost
π	-	Ludolfovo číslo
σ^2	-	rozptyl
ρ_{AB}	-	korelační koeficient

SEZNAM CHEMICKÝCH PRVKŮ A SLOUČENIN

C	uhlík
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
C _x H _y	uhlovodík
H ₂ O	voda
HCN	Kyanovodík
HO ₂	peroxidovým radikálem
CH	uhlovodíkové radikály
CH ₂	methylen
CH _Y	uhlovodíkové radikály
N ₂	dusík
NO	oxid dusnatý
N ₂ O	oxid dusný
N ₂ O ₅	oxid dusičný
NH ₃	amoniak
NO ₂	oxid dusičitý
NO _x	oxidy dusíku
O ₂	kyslík
OH	hydroxid
S	síra
SO ₂	oxid siřičitý
SO _x	oxidy síry
TiO ₂	oxid titaničitý
V ₂ O ₅	oxid vanadičný