



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

VLIV PALIVA HOŘÁKU NA PŘENOS TEPLA V PROCESNÍCH PECÍCH

THE INFLUENCE OF THE FUEL USED IN THE BURNER FOR HEAT TRANSFER IN PROCESS FURNACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petra Jaworská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Skryja, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Studentka: **Bc. Petra Jaworská**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Skryja, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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 paliva hořáku na přenos tepla v procesních pecích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V procesních pecích probíhá spalování paliva přímo v jejich vnitřním prostoru. Procesní pece jsou složeny z hořáku, teplosměnných ploch a pláště pece. Z horkých plynů se teplo přenáší do teplosměnné plochy radiací, konvekcí a zpětnou radiací z žáruvzdorných stěn. Množství přeneseného tepla je ovlivněno, kromě geometrie spalovacího prostoru a materiálu teplosměnných ploch, radiací horkých plynů, které obsahují spaliny a inertní plyny. Cílem této práce bude provést spalovací zkoušky s různými typy paliv. V rámci testů budou sledovány charakteristické vlastnosti spalovacího procesu a přenos tepla v radiační části spalovací komory v závislosti na použitém palivu.

Cíle diplomové práce:

- 1) Studium doporučených podkladů týkajících se problematiky přenosu tepla.
- 2) Spalovací zkoušky s hořákem spalující zemní plyn.
- 3) Spalovací zkoušky s hořákem spalující nízkovýhřevný plyny případně kapalné palivo.
- 4) Vyhodnocení experimentálních dat.

Seznam doporučené literatury:

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

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

HEWITT, C.H., ed. Process Heat Transfer, Begell House, New York, 1994. 1042 s. ISBN 0849399181

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

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 se zabývá vlivem technických plynů CO₂ a N₂ přítomných v palivu na průběh spalování a tvorbu emisí ve spalinách. V teoretické části práce je nastíněn stručný přehled a specifikace způsobů přenosu tepla, základních procesních spalovacích zařízení, použitých technických plynů v experimentální části a pozorovaných emisních látek.

Experimentální část práce je zaměřená na testování vlivu inertních plynů o průtocích 40 m_N³/h a 80 m_N³/h, přidaných k průtoku zemního plynu, na vznik emisí, parametry plamene a s tím spojený předaný maximální tepelný výkon. Zkoušky probíhaly v horizontální, vodou chlazené spalovací komoře na dvou konstrukčně odlišných typech hořáků. Z vyhodnocení zkoušek vyplývá jasný vliv inertních plynů na výrazné ochlazení plamene, přičemž největšího poklesu teplot bylo dosaženo přítomností inertního CO₂ v palivu. Snížení teplotních špiček plamene přispělo k výrazné redukci NO_x v horkých spalinách ve všech testovaných konfiguracích.

Klíčová slova

spalování, nízko-výhřevná paliva, inertní plyny, přestup tepla pecí, teploty v plameni, tepelný tok, emise

Abstract

This diploma thesis is about an influence of technical gases CO₂ and N₂, that are present in a fuel, over overall combustion process and a flue gas emissions. The first part of this thesis discussed issues like heat transfer, basic process combustion utilities, used technical gases in experimental part and finally description of observed pollutants. Second part of thesis describes the experiments themselves.

Experiments were trying to find how selected parameters were influenced by adding 40 m_N³/h or 80 m_N³/h of inert gases to a flow of natural gas. Observed parameters were namely emission volumes, flame parameters and maximal heat duty. Experiments took place in horizontal water-cooled combustion chamber and were performed on two different types of burners. Evaluation of results confirmed clear connection of inert gases on temperature of flame; the biggest temperature drop was observed while inert gas CO₂ was present in fuel. Lowering of temperature spikes also highly influenced presence of NO_x in hot flue gas during all performed trials.

Keywords

combustion, low-calorific fuels, inert gases, furnace heat transfer, flame temperatures, heat flux, emissions

Bibliografická citace

JAWORSKÁ, P. *Vliv paliva hořáku na přenos tepla v procesních pecích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Skryja, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury, a veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citovala.

V Brně dne

.....

Petra Jaworská

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své práce Ing. Pavlu Skryjovi Ph.D. za trpělivost a odbornou pomoc během vedení této práce. Mé velké díky patří Ing. Igoru Hudákovi Ph.D. a Ing. Jiřímu Bojanovskému za cenné rady a pomoc s experimentálním měřením.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině, přátelům a spolužákům za velkou podporu a vytvoření zázemí pro studium a psaní diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	10
1 Specifikace paliva – Zemní plyn.....	11
2 Specifikace technických plynů.....	13
2.1 Dusík.....	13
2.2 Oxid uhličitý.....	14
3 Přenos tepla.....	15
3.1 Konvekce.....	15
3.2 Kondukce.....	16
3.3 Radiace.....	16
3.3.1 Emisivita.....	18
4 Kvalitativní pohled.....	19
4.1 Výhřevnost.....	19
4.2 Spalné teplo.....	19
4.3 Wobbeho číslo.....	20
5 Emise.....	21
5.1 Emise oxidů dusíku.....	22
5.1.1 Termický NO _x	24
5.1.2 Promptní NO _x	25
5.1.3 Palivový NO.....	25
5.2 Emise oxidů síry.....	26
5.3 Emise oxidu uhelnatého.....	27
5.4 Přepočítání mezi jednotkami ppm a mg/m ³	28
5.5 Emisní limity.....	29
6 Měření teplot.....	30
6.1 Termočlánek.....	30
7 Měření tepelných toků.....	32
7.1 Radiační sonda.....	32
7.1.1 Základní technologie.....	32
7.1.2 Specifikace měřicí sondy použité v experimentální části.....	33

8	Pece	34
8.1	Procesní pece	34
8.2	Tepelná bilance pece	36
9	Hořáky	37
9.1	Návrh hořáků	37
9.2	Dělení a specifikace	37
9.2.1	Dělení hořáku dle typu paliva	38
9.2.2	Hořáky s nuceným a přirozeným přívodem okysličovadla	39
9.2.3	Klasifikace hořáků dle mísení paliva s okysličovadlem	40
10	Experimentální část	43
10.1	Popis zkušebního zařízení	43
10.2	Hořák ZPH	45
10.3	Hořák LPH	46
10.4	Plán zkoušek	47
10.5	Výsledky měření – hořák ZPH	48
10.5.1	Teploty v plameni	48
10.5.2	Tepelné toky	51
10.5.3	Emise a charakteristika plamene	53
10.6	Výsledky měření – hořák LPH	55
10.6.1	Teploty v plameni	55
10.6.2	Tepelné toky	58
10.6.3	Měření tepelných toků radiační sondou	60
10.6.4	Emise a charakteristika plamene	62
	Závěr	64
	Seznam použité literatury	65
	Seznam obrázků	69
	Seznam zkratk a symbolů	70

Úvod

Emisní látky vyskytující se ve vzduchu čím dál tím více přispívají ke znečišťování životního prostředí a k znečistění životních podmínek pro lidstvo na Zemi. Tento fakt je stále více prodiskutovávanou problematikou. V průmyslových aplikacích proto dochází k neustálým vývojem nových technologií a principů především v oblasti spalování, vzhledem k vysoké produkci emisí z těchto procesů. Jednou z možností snížení vzniku emisí je spalování nízké – výhřevných paliv. V zastoupení těchto paliv jsou známé především bioplyn, koksárenský plyn, vysokopeční nebo degazační plyn. Tyto plyny se vyznačují nízkou výhřevností do 20 MJ/m_N^3 . Důležitými složkami nízké – výhřevných paliv jsou inertní plyny. Tyto balastní plyny se neúčastní procesu spalování a svou přítomností v palivu ochlazují plamen, a tím napomáhají ke snížení tvorby emisí NO_x . Některé inertní plyny jsou často vedlejším produktem chemického průmyslu, petrochemického průmyslu aj., proto lze zvážit jejich další využití jako příměsí v procesu spalování paliv o vyšších výhřevnostech.

Zemní plyn je ušlechtilým plynem řadícím se mezi paliva s velkou výhřevností. Přimísením inertních složek k zemnímu plynu je možné simulovat situace spalování nízké-výhřevných paliv.

Diplomová práce se zabývá vlivem technických plynů CO a N_2 přítomných v palivu na průběh spalování a tvorbu znečišťujících emisí ve spalínách. V teoretické části práce je nastíněn stručný přehled a specifikace základních procesních zařízení, sloužících ke spalování. Specifikovány jsou také technické plyny a palivo, které byly použity v experimentální části práce. Přiblíženy jsou znečišťující emise a jejich limity, které jsou při procesech spalování důležitým sledovaným parametrem. Experimentální část práce je zaměřena na testování vlivu inertního plynu obsaženého v palivu na parametry plamene a vznik emisí. Spalovací zkoušky byly prováděny na zkušebním zařízení Ústavu procesního inženýrství VUT v Brně. Hlavní součástí zkušebny je horizontální, vodou chlazená spalovací komora, která byla pro zmíněný experiment použita.

Né vždy je však spalování nízké – výhřevných paliv na tradičních hořácích bezproblémové. Pro dosažení rovnocenného výkonu, jaký je při spalování plynů s vyšší výhřevností je nutné, aby hořákem mohlo projít mnohem větší množství nízké – výhřevného paliva. Pro zjištění vlivu vhodné/nevhodné geometrie hořáku na vlastnosti spalování v případně nízké – výhřevných paliv byly provedeny spalovací zkoušky na konvenčním hořáku s dvoustupňovým přívodem paliva (ZPH) a hořáku se speciální konstrukcí pro spalování nízké – výhřevných paliv (LPH).

Předmětem vyhodnocení zkoušek byl vliv přítomnosti inertních plynů v palivu na teplotu, stabilitu a tvar plamene, na velikost a místo působení tepelných toků z horkých spalín na teplosměnné plochy komory a na rozložení teplotních polí v horizontální rovině komory. Sledovány byly také koncentrace emisí CO a NO_x na vstupu horkých spalín do spalínovodu.

1 Specifikace paliva – Zemní plyn

Zemní plyn je hustotou těžší než vzduch, je bez barvy a bez zápachu. Jedná se o vysoce hořlavý plyn s uváděnou vyhřevností (naftového typu) 34 MJ/m_N^3 . [1] Zemní plyn je tvořen širokou škálou sloučenin, sestávajících převážně z nasycených lehkých parafinů (metan, etan), dalších uhlovodíků (propan, butan, pentan, hexan) a inertních plynů, přičemž metan (CH_4) zastupuje nejvýznamější složku v plynu. [2] Obvyklé procentuální zastoupení složek zemního plynu je uvedeno v Tab. 1. Základní fyzikální vlastnosti zemního plynu jsou shrnuty níže v Tab. 1.

Název	Chemický vzorec	Množství [%]
Methan	CH_4	70-90
Ethan, Propan, Butan	$\text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}$	0-20
Oxid uhličitý	CO_2	0-8
Kyslík	O_2	0-0,2
Dusík	N_2	0-5
Sirovodík	H_2S	0-5
Vzácné plyny	Ar, He, Ne, Xe	*stopově

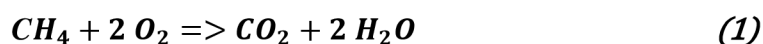
Tab. 1 Obvyklé složení zemního plynu [3]

Specifikace	Jednotky	Hodnoty
Vyhřevnost	MJ/m_N^3	34
Spalné teplo	MJ/m_N^3	37,8
Zápalná teplota	$^\circ\text{C}$	650
Meze výbušnosti	%	5–10
Teplota plamene	$^\circ\text{C}$	1957
Hustota (plyn)	kg/m^3	0,69

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti zemního plynu [1]

Zemní plyn je definován jako poměrně ekologický fosilní zdroj energie, jehož ložiska se nacházejí hluboko pod zemským povrhem. [1] Výhodou zemního plynu v procesu spalování je snadná regulace a měření spotřeby paliva v porovnání se spalováním jiných fosilních paliv, kterými jsou například ropa a uhlí. Také při dosažení dokonalého spalování, jsou koncentrace vzniklých emisí poměrně nižší. [4]

Dokonalým spálením zemního plynu dochází k chemické přeměně plynu na vodní páru a oxid uhličitý. Tento proces je popsán rovnicí [1]:



Vzhledem k charakteru ložisek plynu jsou rozlišeny dva typy zemního plynu. Jedním z nich je zemní plyn karbonský, který je přítomen v uhelných ložiscích a je zadržován v pórech břidlicových, pískovcových nebo jiných sedimentačních hornin. [2] Tento plyn je označován také jako suchý a je specifický vysokým obsahem metanu (95–98 %) s malým množstvím uhlovodíků. Druhým typem je zemní plyn, označován jako přidružený či naftový. Tento typ zemního plynu vzniká společně s ropou a je přítomen v ložiscích ropy, ze kterých je těžen pomocí velmi hlubokých vrtů (3–8 km). [1] Plyn je zde zadržován pod velkými tlaky v kapse mezi surovou ropou a nepropustnými vrstvami země. Zmíněný typ zemního plynu obvykle obsahuje některé nasycené uhlovodíky jako jsou propan a butan, a proto je také často nazýván vlhkým zemním plynem. [2]

Zemní plyn je nedílnou součástí všedního dne člověka. Ve velkých měřících se zemní plyn využívá k výrobě elektrické energie, dále pak k pohonu motorových vozidel, vaření, topení apod. Je také významnou surovinou při výrobě plastů a jiných chemických produktů. [2]

2 Specifikace technických plynů

Technické plyny jsou charakteristické širokou škálou využití, především v průmyslech (v potravinářském, stavebním, chemickém, či procesním), v lékařství, nebo také ve výzkumu a vývoji. Mezi technické plyny patří přednostně plyny, získané destilací zkapalněného vzduchu (dusík, kyslík, argon). Další skupinou jsou plyny vystupující jako vedlejší produkt chemických procesů jako například vodík, oxid uhličitý a acetylén, jejich směsi a čisté a vzácné plyny. [5]

2.1 Dusík

Za normálních podmínek je dusík bezbarvý plyn, bez zápachu a chuti, který kondenzuje při teplotě $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ na bezbarvou kapalinu. Dusík je nejrozšířenějším prvkem zemské atmosféry, v zastoupení přibližně 78 %, a je součástí veškeré živé hmoty. [5] Za atmosférického tlaku je dusík neškodným plynem, který reaguje s dalšími prvky a sloučeninami pouze za zvýšeného tlaku nebo teploty. [6] Přirozeně se vyskytuje v podobě molekuly, která se díky trojně vazbě projevuje vysokou stabilitou. Z důvodu vysoké stability je dusík charakteristický svým inertním postojem vůči většině činidel. [5] Dusík je získáván převážně frakční destilací zkapalněného vzduchu. Lze jej ve velkých množstvích také získat z procesu spalování uhlíku nebo uhlovodíků a posléze oddělením vzniklé vody a oxidu uhličitého od zbytku vodíku. [5]

Kapalný dusík se využívá v mnoha odvětvích pro chlazení, či zamrazování. Zamrazování pomocí tekutého dusíku je velmi rychlý proces, při kterém nestihne dojít k tvorbě ledových krystalků biologické vody. Toho je využíváno především v potravinářství pro udržení dlouhé čerstvosti potravin nebo například v mikrobiologii při mikroskopickém pozorování preparátů, které tak zůstanou i po rychlém zamražení amorfni. Dusík má významné postavení jako inertní plyn také v chemickém průmyslu. Přítomnost většího množství dusíku v procesu má za důsledek snížení koncentrace kyslíku, a tím omezení vzniku možného požáru a exploze. Působením chladu dusíku lze chemické reakce zcela zastavit nebo alespoň částečně zpomalit. Zmíněným snížením koncentrace kyslíku, tak dusík přispívá k omezení nežádoucích chemických reakcí, způsobujících oxidaci nebo korozi nádob a potrubních tras. [6]

Bezpečnost práce a skladování

Plynný dusík je skladován v ocelových bezezvých lahvích o pracovním tlaku 200 nebo 300 bar. Při úniku do okolí není plyn nijak nebezpečný. Nicméně dojde-li při práci v uzavřených místnostech bez ventilace k jeho většímu úniku, může způsobit pokles koncentrace kyslíku v ovzduší až na samotnou hranici nedýchatelnosti vzduchu. Proto je při práci v uzavřených místnostech důležité dbát na neustálou cirkulaci vzduchu, případně mít možnost použít nezávislá dýchací zařízení. Kapalný dusík je nutné skladovat v tzv. kryogenních nádobách. Jedná se o tlakové dvouplášťové nádoby, schopné odolávat velmi nízkým teplotám tekutého dusíku. Při práci s kapalným dusíkem musí být pracovník opatřen ochrannými pomůckami, především očima a rukou. V případě styku většího množství dusíku s pokožkou může tato tekutina způsobit popáleniny mrazem 2. až 3. stupně. [6]

2.2 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je za normálních podmínek plyn bez barvy, zápachu a bez chuti a svou hustotou je 1,5 x těžší než vzduch. [7] Molekula oxidu uhličitého je poslední formou oxidace dusíku a je velice stabilní. Až při ohřevu nad 2000 °C se rozkládá na kyslík a oxid uhelnatý. [8] Za normálních podmínek se CO₂ vyskytuje jako plyn, případně jako pevná látka, je-li schlazen na -78 °C. V pevném skupenství je oxid uhličitý znám také pod pojmem suchý led. [7] Kapalně formy u oxidu uhličitého lze dosáhnout pouze za vyššího než atmosférického tlaku (nad 500 kPa) díky vysokému trojnému bodu, čímž se odlišuje od ostatních atmosférických plynů. V případě stlačení plynu nad kritickou teplotu (314,12 K) již nelze zkapalnění dosáhnout. Poté jsou vlastnosti CO₂ poněkud odlišné. Zatímco hodnota hustoty odpovídá stavu pevné látky, viskozita a difuzivita se svým charakterem blíží plynům. [8] Ve vyšších koncentracích je oxid uhličitý jedovatý, může způsobit závrať, třes, dýchací potíže, či bolest hlavy. V důsledku dlouhodobějšího působení na člověka má velice vážné zdravotní problémy, způsobující křeče, kóma, poškození mozku a očí a smrt. Pevné a kapalně formy CO₂ způsobují v případě přímého kontaktu s pokožkou omrzliny. [7] Jedná se o málo reaktivní, nehořlavou a nevodivou látku, která dobře rozpouští látky organické. Pro své vlastnosti se běžně využívá v řadě odvětví a průmyslů, ať už v potravinářství (např. jako chladiivo, nebo ve výrobě šumivých nápojů), ve farmaceutickém a chemickém průmyslu nebo jako náplň do hasících přístrojů. [7]

Přírodní cestou je oxid uhličitý emitován (ačkoli v rozptýlené formě) v průběhu různých biologických procesů. Největší produkci lze však očekávat ze spalovacích procesů uhlikatých fosilních a biologických paliv, případně z chemických výrob a fermentačních procesů. [7, 8] U oxidu uhličitého je známou informací, že významně přispívá k intenzifikaci skleníkového efektu. Skleníkový efekt je veřejností chápán pouze negativně, avšak je důležité podotknout, že díky tomuto efektu je udržováno stabilní a příznivé klima vhodné pro život člověka na Zemi. Koncentrace CO₂ v atmosféře je velice nízká, ale závažně se zvyšuje. Z toho důvodu je působení skleníkového efektu již za hranicí, kdy je pro zeměkouli příznivý. [7] Nicméně přítomnost tohoto plynu v atmosféře je pro život na Zemi nezbytná. Oxid uhličitý je součástí přirozených a biochemických cyklů a u zelených rostlin je hlavním zdrojem v procesu fotosyntézy. [7, 8]

Bezpečnost práce a skladování

Oxid uhličitý je dodáván v tlakových lahvích ve formě zkapalněného plynu, který má běžně za těchto podmínek teplotu okolí. Pro uchovávání CO₂ jsou používány ocelové bezešvé lahve o objemech 10–50 litrů. Plyn je v lahvích skladován pod velkým tlakem, proto je doporučeno při manipulaci s lahvemi používat ochranné brýle. Jakmile je plyn z tlakové lahve odebírán, nastane prudký pokles teploty CO₂ vlivem odvodu výparného a expanzního tepla této látky. Výrazný pokles teploty způsobuje ochlazení, až namrzání rozvodů a veškerého příslušenství, s nimiž je látka v kontaktu. V tomto případě je nutné zbát zvýšené pozornosti vzhledem k možnému popálení mrazem. Dalším z rizik u tlakových lahví plněných oxidem uhličitým je možné roztržení lahve v důsledku vzniku koroze vlivem fyzikálně chemických vlastností CO₂ a přítomnosti vody, která není žádoucí. [9]

3 Přenos tepla

Přenos tepla představuje rozhodující úlohu v průmyslových spalovacích procesech. Primárním cílem spalování je efektivní využití uvolněné tepelné energie ze spalování a následné zužitkování vyloučeného tepla v podobě energie jiné. Čím efektivnější procesy přenosu tepla jsou, tím vyšší je celková účinnost systému. S vysokou účinností klesá spotřeba paliva, tím i finanční náklady procesu, ale i emise. Zlepšením tepelné účinnosti je docíleno menšího úniku tepla do okolí, tedy snížení tepelných ztrát, a tím i nižšího tepelného ovlivnění okolního prostředí. Přiblížení k jednotlivým mechanismům přenosu tepla je shrnuto v podkapitolách 3.1, 3.2 a 3.3. [10]

3.1 Konvekce

Konvekce, nebo-li proudění, je proces sdílení tepla způsoben prouděním tekutiny okolo jiného materiálu (pevného, kapalného), kdy teplota tekutiny má vyšší nebo nižší teplotu než dané medium. V průmyslových aplikacích je teplota tekutiny obvykle vyšší než teplota media. [10] Znalost dynamiky tekutin je stěžejní pro získání informací o sdílení tepla konvekcí a je soustředěna především na tření v kapalině a přenos hmoty. [11]

Konvekce je rozlišována na konvekci přirozenou a nucenou. V případě konvekce přirozené (volné) je hnací silou teplotní rozdíl tekutiny a materiálu. Toho je využíváno v případech existence vysokých teplotních gradientů. Obecně existují dvě možnosti, kdy je přirozená konvekce v průmyslových spalovacích systémech důležitá. První je přenos tepla z plamene do systému, kdy rychlosti plynu jsou velice nízké. Druhým případem je přenos tepla z vnějšího pláště spalovací komory do okolního prostředí. [10] Běžněji je však využíváno konvekce nucené. V tomto případě konvekce nastává v situaci, kdy je použit externí zdroj (čerpadlo, kompresor) k uvedení proudící tekutiny do pohybu. [11] Při přenosu tepla nuceným prouděním dochází k nasměrování proudící tekutiny na nebo přes ohříváný materiál. U nízkoteplotních procesů je nucená konvekce často považována za jediný možný mechanismus pro přenos tepla. [10]

Nejčastější případ konvekce nastává mezi proudící tekutinou a povrchem tělesa. Přenos tepla konvekcí je obecně vyjádřen zjednodušenou rovnicí známou jako *Newtonova rovnice*, a to ve tvaru:

$$Q_H = A \cdot \alpha_t \cdot (T - T_w) \quad (2)$$

kde Q_H je předané teplo [W·s],

A je povrch přenosu tepla [m²],

α_t je součinitel přestupu tepla [W/(m²·K)],

T je teplota tekutiny [K],

T_w je teplota povrchu tělesa [K]. [12]

3.2 Kondukce

Princip přenosu tepla kondukcí představuje proces výměny tepla vedením. Pokud se teplotní gradient vyskytuje ve stacionárním pevném či tekutém mediu, nazýváme mechanismus přenosu tepla kondukcí charakterizující teplo vedené skrze médium.

Kondukce představuje proces na úrovni atomové a molekulové aktivity, která může být považována za přenos energie z částic o větší energii k částicím téže látky s energií menší, jenž probíhá skrze interakci mezi těmito částicemi. [13]

Matematická teorie vedení tepla byla poprvé popsána Josephem Fourierem na počátku 19. století. Dle Fourierova zákona lze vyjádřit měrný tepelný tok při vedení tepla jako:

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

kde q je měrný tepelný tok [W/m^2],

k je tepelná vodivost média [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],

$\frac{dT}{dx}$ je teplotní gradient. [12]

Kondukce je důležitým mechanismem při určování tepelných ztrát skrze žáruvzdorné stěny pece a při návrhu pecí kvůli tepelné roztažnosti, ke které dochází při ohřívání pece, zvláště s ohledem na rozdíly v tepelné roztažnosti mezi kovovým pláštěm a žáruvzdornými materiály. [10]

3.3 Radiace

Radiace je mechanismus přenosu tepla, známý také jako záření či sálání. Jedná se o unikátní metodu přenosu tepla viditelným nebo infračerveným zářením, při kterém není zapotřebí hmotného média pro přenos energie a může tak probíhat i skrze absolutní vakuum. V průmyslových pecích může radiace představovat až 90 % z procesu přenosu tepla. Radiace je založena na přenosu energie elektromagnetickými vlnami, které jsou charakteristické jejich vlnovou délkou nebo frekvencí a to v souvislosti:

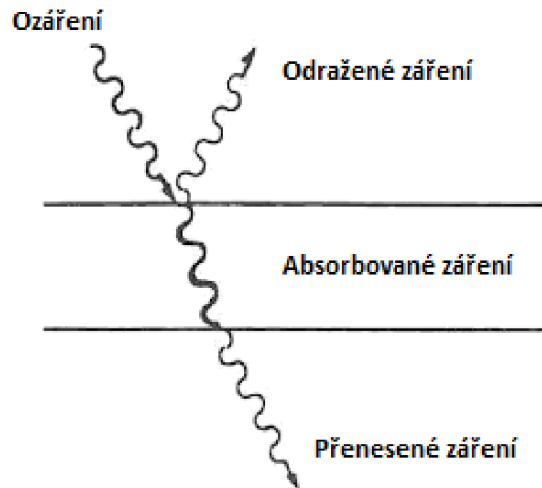
$$\lambda = \frac{C}{\nu} \quad (4)$$

kde λ je vlnová délka [m],

C je rychlost světla [m/s],

ν je frekvence [s^{-1}]. [10]

V průmyslových tepelných aplikacích jsou známy tři formy přenosu tepla zářením – záření z povrchu pevného tělesa, záření z plynného média a záření z částic v plynném médiu (označované také jako světelné záření). [10] Vyzářená energie při kontaktu s pevným, kapalným, či plynným médiem může být zpracována čtyřmi způsoby – absorpcí, odražením, přenesením materiálem nebo kombinací těchto tří možností. Nejčastěji vzniklým způsobem je kombinace, kterou lze vidět na níže uvedeném zjednodušeném obrázku. [10]



Obr. 1 Radiační energie absorbována, odražena a přenesena materiálem [10]

Všechny hmotné objekty, včetně žijících organismů, vyzařují elektromagnetickou energii v míře závislé na jejich povrchové teplotě. Rovnice pro výpočet vyzářené energie je založena na principu ideálního zářiče tzv. černého tělesa, které je schopno absorbovat veškeré elektromagnetické záření, které dopadne na jeho povrch, ale také emitovat maximální možné množství energie pro danou teplotu. [14] Vyzářená tepelná energie absorbovaná reálným povrchem, jako funkce absorptivity povrchu a celkové radiační energie vyzářené daným tělesem, je vyjádřena Stefan-Boltzmannovým zákonem jako:

$$Q_H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

kde Q_H je předané teplo [W·s],

ε je emisivita [-],

σ je Stefan – Boltzmanova konstanta,
 $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ [W/(m² · K⁴)]

A je povrch přenosu tepla [m²],

T je teplota [K]. [12]

3.3.1 Emisivita

Jak již bylo zmíněno černé těleso nejenže absorbuje veškeré záření dopadající na jeho povrch, ale také vyzařuje (emituje) maximální množství energie odpovídající dané teplotě. Reálná tělesa však nedosahují dokonalých hodnot černého tělesa, a proto je zavedena emisivita. Emisivita media (ε) je dána poměrem energie, kterou reálné těleso vyzařuje při konkrétní teplotě (E) ku hodnotě energie, kterou by mohlo emitovat ekvivalentní černé těleso a nabývá hodnot $0 \leq \varepsilon \leq 1$. [15]

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (6)$$

kde ε je emisivita [-],

E je vyzářená energie reálného tělesa [W],

E_b je vyzářená energie černého tělesa [W].

Pro černé těleso lze vyvodit, že $E = E_b$ a emisivita je rovna 1. [15]

4 Kvalitativní pohled

4.1 Výhřevnost

Charakteristika výhřevnosti uvedená r.1997 dle Svobody zní:

„Výhřevnost Q_i je teplo uvolněné úplným spálením jednotkového množství plynu stechiometrickým množstvím kyslíku nebo vzduchu za konstantního tlaku a teploty, přičemž všechny produkty spalování ochlazené na výchozí teplotu jsou v plynném stavu.“ [16]

Výhřevnost paliva lze dopočítat dle vztahu:

$$LHV = \sum_{i=1}^n c_i \cdot LHV_i \quad (7)$$

kde	LHV	je výhřevnost paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$],
	c_i	je objemová koncentrace i – té složky paliva [-],
	LHV_i	je výhřevnost i – té složky paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$]. [12]

4.2 Spalné teplo

Definice spalného tepla dle Svobody (1997) zní:

„Spalné teplo Q_s je teplo uvolněné úplným spálením jednotkového množství plynu stechiometrickým množstvím kyslíku nebo vzduchu za konstantního tlaku a teploty, přičemž všechny produkty spalování ochlazené na výchozí teplotu jsou v plynném stavu kromě vody, která při výchozí teplotě zkondenzuje. Jako výchozí (referenční) teplota spalování se uvažuje 25 °C.“ [16]

Výpočet spalného tepla má obdobný charakter jako výpočet výhřevnosti a lze jej dopočítat podle rovnice:

$$HHV = \sum_{i=1}^n c_i \cdot HHV_i \quad (8)$$

kde	HHV	je spalné teplo paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$],
	c_i	je objemová koncentrace i – té složky paliva [-],
	HHV_i	je spalné teplo i – té složky paliva [$\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$]. [12]

4.3 Wobbeho číslo

Wobbeho index může být specifikován dvěma způsoby podle toho, zda je vypočítán pomocí výhřevnosti paliva nebo spalného tepla. Těmito výpočty je W.index rozlišován na tzv. Wobbeho index nižší a Wobbeho index vyšší.

Výpočet Wobbeho čísla z výhřevnosti:

$$Wb_{\text{nižší}} = \frac{LHV}{\sqrt{SG}} \quad (9)$$

kde LHV je výhřevnost paliva [MJ/m^3],
 SG je relativní hustota paliva [-]. [12]

Výpočet Wobbeho čísla ze spalného tepla:

$$Wb_{\text{vyšší}} = \frac{HHV}{\sqrt{SG}} \quad (10)$$

kde HHV je spalné teplo paliva [MJ/m^3],
 SG je relativní hustota paliva [-]. [12]

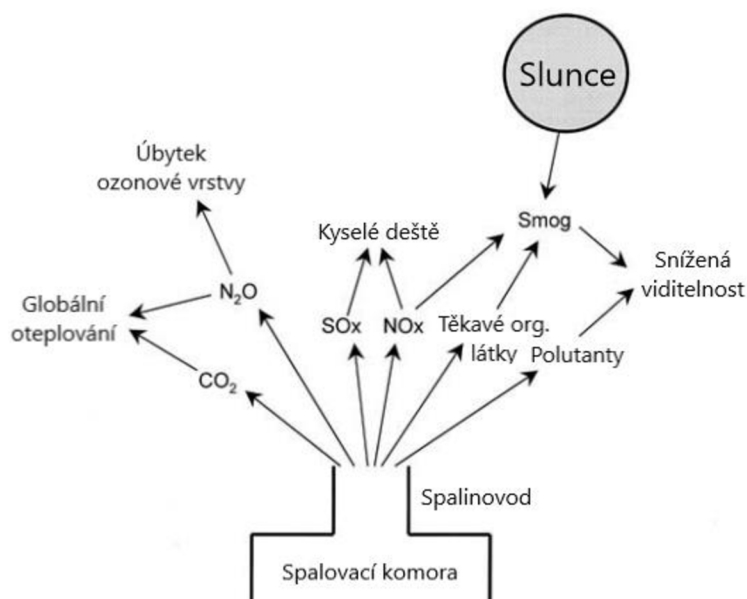
5 Emise

V posledních letech je kladen čím dál tím větší důraz na redukování emisí vznikajících v průmyslových spalovacích procesech. Procesy spalování jsou v mnoha případech provozovány za velmi vysokých teplot a s vysokou úrovní přebytku spalovacího vzduchu. Tyto podmínky jsou důležité k získání vysoké tepelné účinnosti, avšak zapříčiňují vznik vedlejších produktů s negativním dopadem na životní prostředí, jimiž jsou v hlavním případě oxidy dusíku. [17] Kategorie látek znečišťujících ovzduší jsou definovány mnoha způsoby. Jednou z možností, jak tyto látky charakterizovat je rozdělením do tří následujících skupin [17] :

- organických plynů,
- anorganických plynů,
- aerosolů.

Mezi organické plyny jsou zahrnuty uhlovodíky (např. parafíny, aromáty), kyslíkaté deriváty uhlovodíků (např. alkoholy, kyseliny) a halogenderiváty (např. tetrachlorethan, trichlorethylen). Tyto organické látky přispívají k tvorbě oxidantů, způsobují snížení viditelnosti, a ve větších koncentracích mohou způsobovat podráždění očí. Další definovanou skupinou jsou anorganické plyny, jejichž množství je, v důsledku jejich negativního dopadu na životní prostředí, pozorně sledováno. Jedná se především o oxidy dusíku (NO, NO₂), oxidy síry (SO, SO₃) a oxid uhelnatý, které mohou způsobit závažné zdravotní potíže a výrazné poškození vegetace. Zejména jsou sledovány emitovaná množství znečišťujících látek oxidu uhelnatého (CO) a oxidů dusíku. Třetí skupinou jsou aerosoly. Aerosoly mají velký vliv na snížení viditelnosti, vzhledem k tomu, že se jedná o kapalně částice, které mohou představovat kapičky kyselin a barev a pevné částice (např. saze, oxidy kovů). [17] Na Obr. 2 lze vidět zjednodušený diagram, znázorňující působení znečišťujících látek v atmosféře. Existuje však mnoho dalších, které mohou být přítomny ve specifických aplikacích. Takovými zástupci mohou být například těžké kovy, radioaktivní materiály, pachy apod.

K dosažení cílených emisních hodnot a zároveň optimálního výkonu hořáku je nutné získat rovnoměrné stabilní spalování v zóně hořáku. Jedná se o jeden z nejtěžších a časově nejnáročnějších úkonů celého procesu. Významný vliv na tvorbu znečišťujících látek má volba paliva, a s tím spojená geometrie hořáku. Emisní obavy vyvolává především spalování těžkých topných olejů, při jejichž spalování jsou produkovány tuhé znečišťující látky. Plynná paliva hoří naopak čistě, bez tvorby částic sazí a s minimálními emisemi SO_x, za to s možností vysoké produkce NO_x. [10] Bližší specifikace vzniku, vlastností a účinků jednotlivých znečišťujících látek jsou uvedeny v následujících podkapitolách 5.1, 5.2 a 5.3.



Obr. 2 Emisní znečištění ovzduší [17]

5.1 Emise oxidů dusíku

Dusík jako takový je jedním z nejrozšířenějších a nejvýznamnějších prvků na Zemi. V kombinaci s kyslíkem tvoří oxid dusíku různých forem, které mají vážné negativní účinky na životní prostředí. Tyto oxidy dusíku jsou označovány obecným chemickým vzorcem NO_x a mezi jejich nejrozšířenější zástupce patří oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2), oxid dusný (N_2O), a méně časté tetraoxidy dusíku (N_2O_4) a oxidy dusičné (N_2O_5). [17] Jak již bylo zmíněno, tvorba emisí NO_x má významně negativní vliv na životní prostředí. Oxidy dusíku zapříčiňují znečištění ovzduší ve formě smogu, způsobují úbytek ozónu v horní atmosféře nebo vytvářejí tzv. kyselé deště. To všechno nepříznivě ovlivňuje environmentální stav naší zeměkoule, její vegetaci a zdraví lidské populace. [18] V každém procesu spalování dochází ke vzniku NO_x . Ze všech původců, podporujících vznik oxidů dusíku, spadá pod průmyslové aplikace pouhých 5 % celkové produkce NO_x a až 44 % produkce pochází z dálničního provozu a terénních vozidel. I přes to je nezbytné jejich množství v průmyslu přísně kontrolovat, a snažit se o jejich redukci. Emisní limity hrají důležitou roli ve vývoji nových průmyslových aplikací, které musí při zachování požadovaných výkonů tyto limity splňovat. Jedním z nejjednodušších zásahů pro snížení tvorby oxidů dusíku u stávajících aplikací je možnost nahrazení spalovacího vzduchu čistým kyslíkem. Při přísném dodržení podmínek spalování tak může být dosaženo snížení produkce emisí NO_x . Oxidy dusíku opouštějí proces kominem ve spalinách při vysokoteplotních aplikacích nejčastěji ve formě NO. [18] V důsledku chemických reakcí a podmínek procesu těsně po vzniku spalin převládá množství vzniklých NO nad množstvím NO_2 . Poté v důsledku postupného ochlazování spalin dochází k oxidaci NO na NO_2 . V celkové produkci představuje tvorba oxidu dusnatého až 95 % ze vzniklých NO_x . [19]

NO

Oxid dusnatý je bezbarvý, pro člověka jedovatý plyn, který způsobuje podráždění očí a krku, nevolnost, bolesti hlavy a postupnou ztrátu sil. NO je v těle člověka přítomnou nezbytnou součástí organismu, má významnou roli v medicíně a je například signální molekulou pro kardiovaskulární systém člověka. [17] Jak již bylo zmíněno, oxid dusnatý je nejčastější sloučeninou vznikající během procesního spalování, která při styku s tzv. nízkou atmosférou velice rychle reaguje s kyslíkem za vzniku ozónu (O_3) a oxidu dusičitého (NO_2). Vzniklý ozón, označován jako přízemní, představuje pro člověka riziko spojené se zdravotními problémy dýchacích cest a pro vegetaci riziko představující vážné omezení fotosyntézního děje. [20, 21]

NO₂

Oxid dusičitý je červenohnědý, vysoce reaktivní plyn s dusivým zápachem. Jeho vdechnutí může člověku způsobit stejné potíže jako oxid dusnatý a navíc je vysoce toxický. Výpary NO_2 jsou silně dráždivé pro plicní trakt a při jejich dlouhodobém vdechování způsobují vážné, někdy až smrtelné problémy spojené s onemocněním plic. U koncentrace NO_2 přítomné v atmosférickém vzduchu nebyl prokázán přímý vliv na zdraví člověka. [17] Naopak ozón, společně se směsicí NO_2 s nespálenými uhlovodíky, při kontaktu se slunečním zářením přispívá ke vzniku tzv. fotochemického smogu, který je pro lidské zdraví karcinogenní, způsobuje dýchací potíže a snížení imunity. NO_2 při kontaktu s vodou se rozkládá, za vzniku kyseliny dusité (HNO_2) a kyseliny dusičné (HNO_3), které jsou vysoce korozivními sloučeninami. Oxid dusičitý je ve větších koncentracích běžně přítomen v městském vzduchu a při styku s deštěm vznikají tzv. kyselé deště, které svým korozivním charakterem škodí všemu, na co dopadnou (rostlinám, budovám, mostům apod.). V jiném případě při kontaktu s alkoholy, uhlovodíky, palivy a organickými materiály může oxid dusičitý explodovat. NO_2 je také silným oxidačním činidlem. [21, 22]

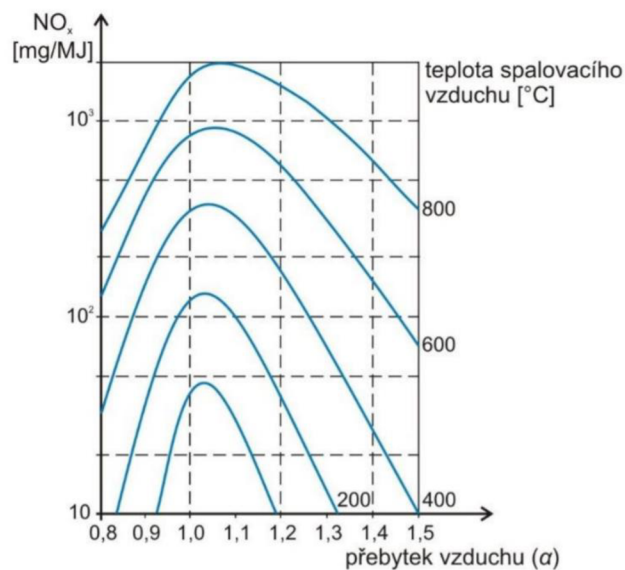
N₂O

Oxid dusný je za normálních podmínek bezbarvý, nehořlavý plyn s mírně nasládlou vůní. Je to silný skleníkový plyn, s potenciálem absorbovat infračervené záření zemského povrchu. Tento efekt je nepřehlédnutelnou součástí problematiky globálního oteplování Země. Také jeho reakcí s ozónem přispívá k porušování ozónové vrstvy ve vyšší atmosféře (stratosféře), která odráží od Země silné kosmické záření a částečně pohlcuje záření ultrafialové. Emise nejsou v porovnání s jinými látkami tak významné, je ale zapotřebí jejich stále monitorování. Dbát na vznik N_2O při spalovacích procesech je důležité především u nízkoteplotních aplikací, které probíhají mezi 705–950 °C, a to zejména při spalování tuhých paliv. [17, 23] Oxid dusný je hojně využíván v medicíně. Vzhledem k tomu, že vysoké koncentrace oxidu dusného mohou způsobit u člověka bezvědomí, používá se v kombinaci s kyslíkem pro celkovou narkózu, případně jako analgetikum a jiné. Dále má významné zastoupení v potravinářském průmyslu (hnačí plyn ve spreji, atmosféra v uzavřených obalech). [23]

5.1.1 Termický NO_x

Termický NO_x vzniká při vysokoteplotních reakcích atmosférického dusíku s kyslíkem v oblastech plamene chudých na palivo podle tzv. Zeldovichova mechanismu. [17] Pokud se teplota spalovacího procesu dostane nad hranici 1100 °C, stává se vznik termických NO_x v procesu dominantním mechanismem přeměny. Rychlost reakce, při které dochází ke vzniku NO_x, je výrazně závislá na teplotě jádra plamene a stechiometrickém poměru v primární spalovací zóně hořáku. Z toho plyne, že vznik těchto oxidů dusíku nabývá, je-li v procesu použit předehřev spalovacího vzduchu, stupňovitý přívod spalovacího vzduchu nebo obohacování vzduchu kyslíkem, které slouží ke zvyšování teploty plamene. [17]

Zmíněná závislost vzniku termických NO_x na množství přebytku spalovacího vzduchu a jeho teplotě je graficky znázorněna na Obr. 3. Se zvětšujícím se přebytkem vzduchu (kyslíku) dochází ke zvyšování teploty plamene se současným nárůstem tvorby termických NO_x. Vzhledem k exponenciální závislosti vzniku NO_x na teplotě spalovacího vzduchu je dle diagramu dosaženo maximální tvorby oxidů dusíku při přebytku vzduchu $\alpha = 1,05-1,1$. S dále se zvyšující koncentrací O₂, koncentrace N₂ klesá a tvorba NO_x se naopak zpomaluje. [24]



Obr. 3 Závislost vzniku termického NO_x na přebytku spalovacího vzduchu a jeho teplotě [24]

Vznik termických NO_x je vyjádřen dle Zeldovichova rozšířeného mechanismu pomocí následujících reakcí [17]:



Rovnice (1) zastupuje stěžejní reakci mechanismu. Reakce je charakteristická vysokou vazebnou energií molekuly dusíku ($N \equiv N$), a tím silnou citlivostí na teplotu v průběhu reakce. Společně s rovnicí (2) tvoří základní dvou – krokový mechanismus. V procesech nad 1300 °C, kdy je spalovací směs bohatá na palivo, je rovnice (2) výrazně potlačena. V této situaci, je mechanismus možné doplnit o třetí rovnici (3), která zahrnuje i vliv hydroxylových radikálů ($\cdot OH$) na vznik NO_x . V jiných případech může být rovnice (3) zanedbána. [17, 24]

5.1.2 Promptní NO_x

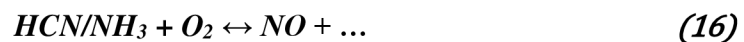
Tvorba promptních NO_x je velmi důležitým mechanismem při procesech nízkoteplotního spalování, avšak ve srovnání s termickými NO_x , souvisejícími s vysokoteplotními procesy, nejsou v celkovém měřítku až tak významné. Vpozorováním bylo zjištěno, že oblasti plamene bohaté na palivo značně přispívají k tvorbě těchto oxidů. Vznik těchto oxidů dusíku probíhá rychlou reakcí v místech obálky plamene. [12, 21] Mechanismus promptních NO_x je poměrně komplikovaný a je tvořen stovkami reakcí. Stěžejním krokem je rychlá reakce dusíku a kyslíku obsažených v přivedeném spalovacím vzduchu s uhlovodíkovými radikály, vzniklými jako meziprodukty spalovacího procesu. [21] Dle Femina, který s touto teorií přišel, je tvorba promptních NO_x popsána následujícími rovnicemi [12]:



5.1.3 Palivový NO

Palivové NO_x vznikají v případě použití méně kvalitních paliv, které obsahují organicky vázaný dusík. Jedná se především o kapalná a pevná paliva jako jsou těžké topné oleje, odpadní oleje, uhlí a koks, z jejichž spalování vzniká přes 80 % palivového NO ze vzniklých NO. Konverze palivového dusíku je méně závislá na teplotách, ale je výrazně ovlivněna stechiometrií, která je do značné míry určena bilancí paliva a spalovacího vzduchu. [21, 25]

Mechanismus je založen na oxidaci organických sloučenin dusíku obsažených v palivu. Dusík je často složitě navázán na molekuly paliva, a proto není reakce vzniku palivového NO přímá, ale je složena z několika postupných reakcí, u nichž nejvýznamnějšími meziprodukty jsou kyanid (HCN) a čpavek (NH_3). Vznik palivového dusíku oxidací zmíněných meziproduktů je vyjádřen v následující reakci [21, 24]:



Vzhledem k tomu, že je palivový dusík vázán slaběji než je trojnásobná vazba atomů v molekule dusíku a ke vzniku termických NO je nutné tuto vazbu přerušit, převládá v procesu spalování díky jednodušším reakcím tvorba palivových NO před termickými NO. Avšak dojde-li v procesu ke snížení vzniku dominujících termických NO, tvorba palivových NO naroste. [24]

5.2 Emise oxidů síry

Síra, jako samotný prvek, se chová inertně a je téměř neškodná pro lidský organismus a v přirozeném prostředí se vyskytuje nejčastěji ve formě síranů (např. CaSO_4). Vyskytuje-li se síra v podobě oxidů, představuje již problém, se škodlivými dopady na životní prostředí. Pokud jsou koncentrace oxidů síry v atmosféře příliš vysoké, mohou u člověka způsobit dýchací problémy. [17] Oxidy síry, označované jako SO_x , vznikají primárně jako důsledek spalování paliv, vyznačujících se vyšším obsahem síry. Až 85 % emisí SO_x , vyskytujících se v atmosféře, má původ ve spalovacích procesech. Velký podíl na jejich tvorbě mají elektrárny, spalující velká množství uhlí, obsahující větší množství síry. Dalšími palivy, při jejichž spalování vznikají oxidy síry, jsou těžký topný olej, benzín, nebo koks. [17] V případě spalování ušlechtilých plynů není tvorba oxidů síry nijak zásadním problémem z důvodu malého, někdy až žádného množství tohoto prvku v plynu. [21] Emise SO_x se řadí mezi skupinu znečišťujících látek ovzduší, které jsou schopny migrovat od zdroje jejich vzniku, do okolních lokalit na dlouhé vzdálenosti. [17] Nejčastějšími oxidy, vznikajícími ve spalovacím procesu, jsou oxid siřičitý (SO_2) a oxid sírový (SO_3). Oxid sírový vzniká především při nízkých teplotách spalování paliva, zatímco vysokoteplotním procesům dominuje tvorba SO_2 . Reakce SO_x uvnitř spalovací komory mohou v některých situacích omezit i tvorbu palivových oxidů dusíku. [17] Dalšími uváděnými zástupci SO_x jsou SO , S_2O a SO_4 . Množství emisí SO_x lze redukovat dvěma způsoby, buď odstraněním síry z přiváděného paliva nebo odstraněním již vzniklých SO_x z horkých spalin pomocí tzv. suchého a mokrého praní. [21]

SO_2

Oxid siřičitý je bezbarvý a nehořlavý plyn se štiplavým zápachem, často používaný jako redukční činidlo. V průmyslu je oxid siřičitý používán k výrobě kyseliny sírové. [26] V přirozeném prostředí je SO_2 produkováno vulkanickými erupcemi nebo lesními požáry, avšak největším zdrojem tvorby oxidů jsou spalovací procesy. [17] Za běžných spalovacích podmínek je veškerá síra obsažená v kapalném palivu přeměněna chemickou reakcí ve spalovací komoře na SO_2 , a poté v této formě odvedena spalinovodem ven z procesu. [21] U pevných paliv probíhá tato přeměna na SO_2 pouze u 95 % množství síry. [26] V atmosféře SO_2 snadno reaguje s vodou za vzniku kyseliny sírové (H_2SO_4), která má silný korozivní charakter, přičemž rozpustnost je silně závislá na teplotě. Stejně jako v případě oxidu dusičitého, i oxid siřičitý při kontaktu s vodou v atmosféře, způsobuje kyselé deště, které mohou způsobit značné škody na životním prostředí. Vyskytuje-li se SO_2 ve vzduchu ve větších koncentracích, způsobuje u člověka silné dušení. [21]

Oxid siřičitý vzniká za vysokých spalovacích teplot oxidací síry s kyslíkem obsaženým ve spalovacím vzduchu. Reakce uvnitř komory probíhá dle rovnice [17]:



SO₃

Oxid sírový je látka v tuhé nebo kapalné podobě, dobře rozpustná ve vodě, vznikající také jako meziprodukt při výrobě kyseliny sírové. [26] Oxid sírový vzniká částečnou oxidační reakcí SO₂ ve spalovacím procesu podle rovnice (2). Uvedená reakce může za správných okolností nastat i po opuštění spalovací komory v atmosféře. [17]

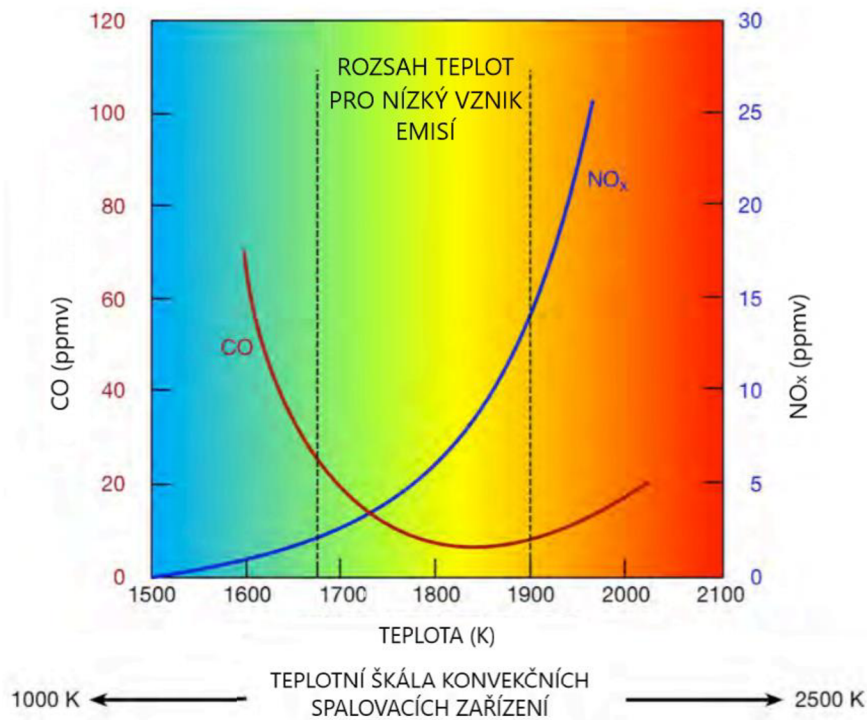


Emise oxidu sírového nejsou příliš významné vzhledem k jeho nízkým koncentracím ve spalinách, které představují pouhé 2 % z celkových SO_x, čemuž naznačuje i poměr SO₃/SO₂ v kouřových plynech z elektráren dosahují hodnot 1/40–1/80. [26]

5.3 Emise oxidu uhelnatého

Oxid uhelnatý, známý pod názvem svítíplyn, je bezbarvý, toxický plyn bez zápachu, který u člověka způsobuje dusivost a vážné zdravotní problémy. Ve vyšších koncentracích je jedovatý a může způsobit smrt. [17] CO se v atmosféře rozkládá fotochemickými reakcemi nejčastěji s hydroxylovými radikály, za vzniku methanu a přízemního ozonu, který je klíčový pro vznik škodlivého fotochemického smogu. Nicméně konečným produktem vycházejících z reakcí oxidu uhelnatého je oxid uhličitý, který je jedním z tzv. skleníkových plynů. [27] Nejčastější původ oxidu uhelnatého, vyskytujícího se v atmosféře, je z automobilových emisí. Jen malá část tvorby CO pochází z průmyslových aplikací, nicméně jsou emise CO ve spalovacích procesech pozorně sledovány. [17] Podnětem pro vznik CO je neúplné spálení uhlíkatých paliv. Koncentrace oxidu uhelnatého stoupá při nižších teplotách, které jsou pro vznik CO příznivé.

K největší tvorbě CO v průběhu spalování dochází při najíždění spalovacího procesu z důvodu velmi nízkých teplot. Tvorbu CO lze omezit správným nastavením parametrů spalovacího procesu, a to především poměrem paliva a spalovacího vzduchu. [17] Dojde-li k navýšování teplot, dokonalé podmínky pro vznik CO klesají, avšak tvorba oxidů dusíku, v závislosti na vyšších reakčních teplotách roste. [28] Tato závislost tvorby emisí CO a NO_x na teplotě spalování je zobrazena na Obr. 4 .



Obr. 4 Závislost tvorby emisí CO a NO_x na teplotě procesu spalování [28]

5.4 Přepočet mezi jednotkami ppm a mg/m_N³

Koncentrace vzniklých emisí jsou obvykle uváděny v jednotkách ppm, které vyjadřují jednu miliontinu celku. Tyto jednotky jsou získávány z měření, ale jejich použití, dle normy ČSN ISO 80000-1 článek 6.5.5, je technicky nesprávné. [29] Koncentrace emisí jsou tak často převáděny na používanější jednotku mg/m_N³.

Převod jednotek ppm na mg/m_N³ je prováděn dle následující rovnice [30]:

$$\text{koncentrace [mg/m}_N^3\text{]} = \text{koncentrace [ppm]} \cdot \frac{\text{molekulová hmotnost [kg/kmol]}}{\text{molární objem [m}_N^3\text{/kmol]}} \quad (19)$$

5.5 Emisní limity

Emisními limity jsou chápána jako nejvyšší přípustná množství znečišťujících látek uvolňována do ovzduší ze stacionárního zdroje. Pro každou znečišťující látku, příp. skupinu látek, jsou specifikovány konkrétní hodnoty maximálních povolených koncentrací dle Vyhlášky č. 415/2012 Sb. – o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. V případě jednorázového měření jsou emisní limity považovány za dodržené, je-li průměr hodnot jednotlivých měření koncentrace znečišťující látky menší nebo roven hodnotě odpovídajícího emisního limitu (viz.Tab. 2) a zároveň žádná hodnota koncentrace měřené látky nepřekročí 120 % maximální hodnoty limitu. [31]

V níže uvedené tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny emisní limity pro stacionární zdroje s výkonem menším než 50 MW. Tabulka obsahuje hodnoty zmíněné v příloze č.2, část II, k vyhlášce č. 415/2012 Sb. zákonu č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, s platností od 20. prosince 2018 do 31. prosince 2024. Specifické emisní limity jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku 3 % v případě kapalných a plynných paliv a 6 %. [31]

Palivo	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	-	600	100	400	-	500	50	500	1500 ¹⁾	500	30	300 500 ³⁾
Kapalné	-	200	-	80	-	200 450 ⁴⁾	50	80	1500 ⁴⁾	200 450 ⁴⁾	30	80
Plynné a zkapalněný plyn	-	100 ²⁾	-	50	-	100 ²⁾	-	50	-	100 ²⁾	-	50

Tab. 2 Specifické emisní limity pro stacionární zdroje platné od 20.12.2018

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 provozovatel prokáže, že nelze této hodnoty z technických důvodů dosáhnout použitím nízkoemisních hořáků, platí specifický emisní limit 200 mg.m⁻³.

3) Platí v případě spalování biomasy ve stacionárních zdrojích s výjimkou spalování výlisků z biomasy.

4) Vztahuje se na spalování těžkého topného oleje a jemu podobných kapalných paliv. [31]

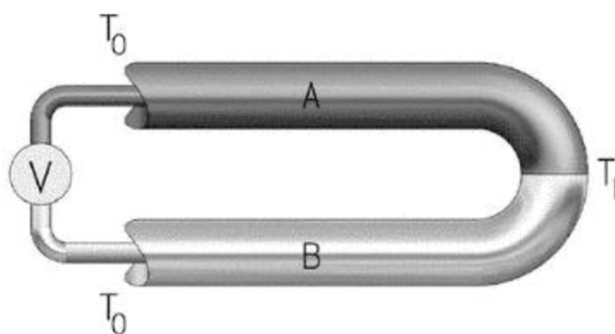
6 Měření teplot

Teplota přímo i nepřímo ovlivňuje řadu důležitých proměnných ve spalovacích procesech, kterými mohou být přenos tepla, účinnost nebo ekonomické náklady. Příkladem je vliv teploty plamene či spalovacího vzduchu, které významně ovlivňují emise NO_x a tepelnou účinnost spalovacího procesu. Vyšší teplota, než je potřebná teplota produktu, může mít nepříznivé důsledky z hlediska nákladů na chlazení produktu po procesu spalování, zvýšenou spotřebu paliva apod. Nízké teploty ve spalovací komoře způsobují bezpečnostní problémy u některých technologií (např. u bezplamenového spalování), a při spouštění mohou také významně ovlivnit produkci emisí. Oproti tomu přes příliš vysoké teploty spalovací komory mohou způsobit poškození zařízení uvnitř komory a obložení. [32]

6.1 Termočlánek

Nejběžnějším zařízením pro měření teploty v průmyslových spalovacích procesech je termočlánek, který je levnou variantou snímačů a je snadno použitelný pro širokou škálu teplot a to v rozmezí od -270 °C do 2320 °C . [33] Termočlánek je charakteristický dvěma kovovými drátky rozdílných materiálů, které jsou spojeny v jednom bodě, v němž dochází ke generaci elektromotorické síly popsané Seebecovým jevem. Hodnota této síly je přímo závislá na teplotě v bodě spoje kovů. [32]

Princip měření teploty termočlánekem spočívá v měření vzniklého termoelektrického napětí dvou rozdílných vodičů na jejich otevřeném konci. [12] Elektronů nacházející se v prostředí o vyšších teplotách vypovídají vyšší kinetickou energií než elektrony v prostředí o teplotách nižších. Elektronová difuze skrze tyto oblasti zapříčiňuje vznik elektrického potenciálu podél vodiče, jenž je vystaven teplotnímu diferenciálu. Vzhledem k rozdílnosti obou vodičů vytvářejí tyto vodiče rozdílný elektrický potenciál. Měřicí zařízení, jenž je připojeno k otevřenému konci obou vodičů tzv. referenčnímu konci, zpracovává rozdíl vzniklých potenciálů a vyhodnocuje měřenou teplotu odpovídající tomuto rozdílu. Velikost tohoto účinku závisí na vlastnostech vodiče a jeho absolutní teplotě. [33] Obr. 5 popisuje spojené vodiče, u nichž lze vidět homogenní část ovlivněnou teplotou T_0 na jednom konci a teplotou T_1 na konci druhém, vykazující napěťový rozdíl V mezi nimi.



Obr. 5 Schéma termočláneku [33]

Generované napětí V je popsáno rovnicí:

$$V = S(T_1 - T_0) \quad (20)$$

kde V je rozdíl napětí [mV],
 S je Seebeckův koeficient [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$],
 T je teplota [$^\circ\text{C}$]. [12]

Dle tepelné odolnosti materiálu lze zařadit vlastnosti termočlánků do třech kategorií. Jednotlivé kategorie tvoří tři skupiny kovů – základní kovy (Cu, Ni, Fe), které jsou cenově nejdostupnější, žáruvzdorné kovy (W, Re) používané pro vysoké teploty a třetí skupinou jsou vzácné kovy (Pt, Rh) používané pro vysoké teploty a přesnost. [33] Nejběžněji využívané typy termočlánků, specifikované složením vodičů, jsou uvedeny v Tab. 3 [12]:

Označení typu termočlánku	Složení vodičů
J	Fe vs. slitina Cu-Ni
T	Cu vs. slitina Cu-Ni
K	slitina Cr-Ni vs. slitina Ni-Mn-Si-Al
E	slitina Cr-Ni vs. slitina Ni-Cu
N	slitina Cr-Ni-Si vs. slitina Ni-Si-Mg
C	slitina W-Re vs. slitina W-Re
S	slitina Pt-Rh vs. Pt
R	slitina Pt-Rh vs. Pt.
B	slitina Pt-Rh vs. slitina Pt-Rh

Tab. 3 Typy termočlánků a jejich složení [12]

7 Měření tepelných toků

Kontinuálním měřením tepelných toků lze dosáhnout optimálního řízení procesů a rychlé reakce v případě mimořádných situací. Měření tepelných toků je proces, který je závislý na pečlivém návrhu konstrukce zařízení. Vhodným rozvržením implementace senzorů a kalibračních systému je dosaženo dobré přesnosti měření, avšak celkový charakter měření a rozvrhnutí měřících zařízení je vždy přizpůsobeno cílenému měřenému toku. Tepelné toky lze rozdělit na konvekčního, kondukčního a radiačního typu. Konvekční a kondukční toky jsou získávány způsobem, při kterém tepelný tok proudí skrze snímací čidlo. U konvekčních tepelných toků je následně zachycené tepelné proudění překonvertováno na kondukční tok. Radiační tepelný tok je ve většině aplikací velmi významnou měřenou veličinou, jehož hodnota je získávána senzorem obsahujícím černý radiační absorber, který poté přemění radiační energii na elektrický signál. [34]

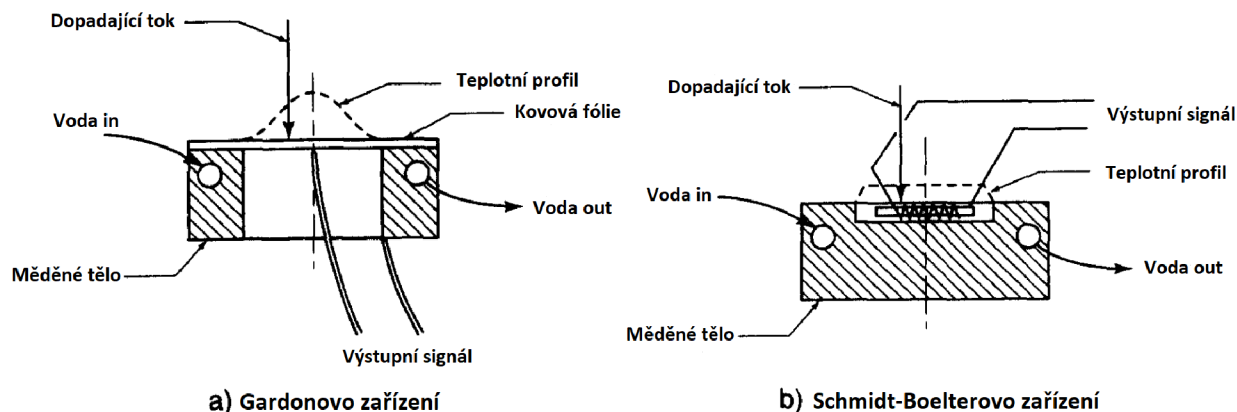
7.1 Radiační sonda

Radiační sonda je přenosný samostatný přístroj sloužící k měření tepelných toků z plamene v pecích. Měření lze provést pomocí diferenciálních teplotních čidel, které měří prostorový teplotní gradient, který je úměrný tepelnému toku. Snímače tohoto typu jsou vybaveny černým absorberem a jsou určeny k měření tepelných toků, u nichž převládá radiace. Jednotlivé typy mohou být rozlišovány dle jmenovitého rozsahu měření, citlivosti, urovně kalibrační referenční intenzity nebo doby odezvy. Hodnoty zachycené sondou jsou přímo závislé na okolních vlivech jako jsou rovina měření, orientace sondy vůči toku nebo účinek usazování popela například v kotlových pecích. Omezením může být nedostupnost některých oblastí pece pro měření. Přímé měření tepelných toků je pro senzory vzhledem k jejich tepelné odolnosti náročné, a pokud nejsou schopny odolávat danému tepelnému prostředí, mohou být aplikovány sondy s vodním chlazením. [34, 35]

7.1.1 Základní technologie

Existují dvě základní technologie senzorů pro měření celkových tepelných toků, ze kterých posléze vychází další konstrukční typy pro specializované aplikace. Jedním z nich je Gardonova technologie (Obr. 6 a), která pracuje s principem radiačního tepelného toku v kovové folii. Pomocí tohoto toku je vyvolán teplotní rozdíl mezi horkým spojem – středem folie, a druhým obvodovým spojem s vodou chlazeným prostředím. [36]

Princip měření dle Schmidt – Boelterovy technologie (Obr. 6 b) je druhým typem snímání, využívajícím v rámci snímání elektronické zařízení tvořené sériově zapojenými termočlánky, pracující s tepelným odporem. Napříč tenkým pláštěm tepelně stabilního materiálu, umístěného mezi tělem měřícího zařízení a snímacím povrchem, vzniká teplotní rozdíl, který vyvolává napěťový signál již zpracovatelný měřícím zařízením. Elektrický obvod je od vodou chlazené části izolován. Gardonova technologie vyžaduje pro stejnou úroveň napěťového signálu větší teplotní rozdíl oproti Schmidt – Boelterovu principu a je to jedna z mála vlastností, která tyto dva typy odlišuje. Přesnost dostupných měřících metod se pohybuje v řádu procent. Měření Gardonovým snímačem umožňuje docílit přesnosti měření $\pm 2\%$ a je to nejlepší hodnota, které lze dosáhnout při měření tepelného toku pomocí radiačních sond. [36–38]



Obr. 6 Schématické průřezy dvou typů zařízení, sloužících k měření tepelných toků [36]

7.1.2 Specifikace měřící sondy použité v experimentální části

Při procesu měření byl použit senzor firmy Hukseflux, model SBG01. Senzor je vodou chlazený a vyznačuje se konstrukcí spojující kladné vlastnosti Gardon a Schmidt – Boelter technologie. Pomocí elektronického zařízení, dle Schmidt – Boeltera, je v průběhu měření generováno výstupní napětí, které je přímo úměrné přijatému ozáření. Dále je senzor charakteristický robustními vodními trubkami, povlakem absorbéru odolným proti poškrábání a možným bezpečným skladováním díky ochrannému krytu. Tepelné toky jsou u této sondy měřeny v rozmezí 5 až 200 x 103 W/m². [39 s. 01]



Obr. 7 Model sondy použitý v experimentální části [39]

8 Pece

Pec je zařízení, ve kterém dochází ke vzniku tepla a jeho přenosu do materiálu, s cílem dosáhnout jeho chemických, či fyzikálních změn. Existují dvě kategorie topných pecí. První z nich jsou kotle, které slouží především ke spalování tuhých paliv za účelem generace páry pro výrobu elektrické energie. Druhým zástupcem jsou pece procesní, zkontruovány k ohřevu média, pro jeho následovné zpracování v technologických procesech. [40]

8.1 Procesní pece

Procesní pece jsou v praxi velká komplexní zařízení o vysokých investičních nákladech, tvořící 10–30 % z celkových nákladů výrobního technologického procesu. Pece obecně jsou energeticky náročnými zařízeními. Ve výrobních linkách jejich spotřeba představuje až 75 % celkového energetického příkonu. [41]

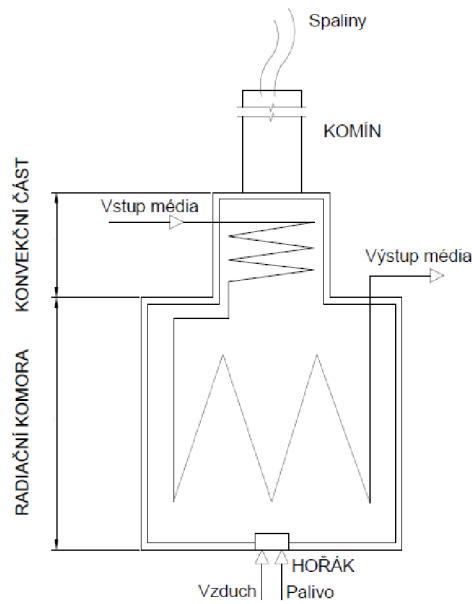
Procesní pec tvoří 4 základní prvky, a to

- hořák,
- teplosměnné plochy (zpravidla trubkový systém),
- plášť pece (vyzdívky a izolace),
- měření a regulace. [41]

Vyzdívky a izolace tvoří zejména šamotové cihly, žárobeton či vláknité keramické desky a slouží k omezení úniku tepla do okolí.

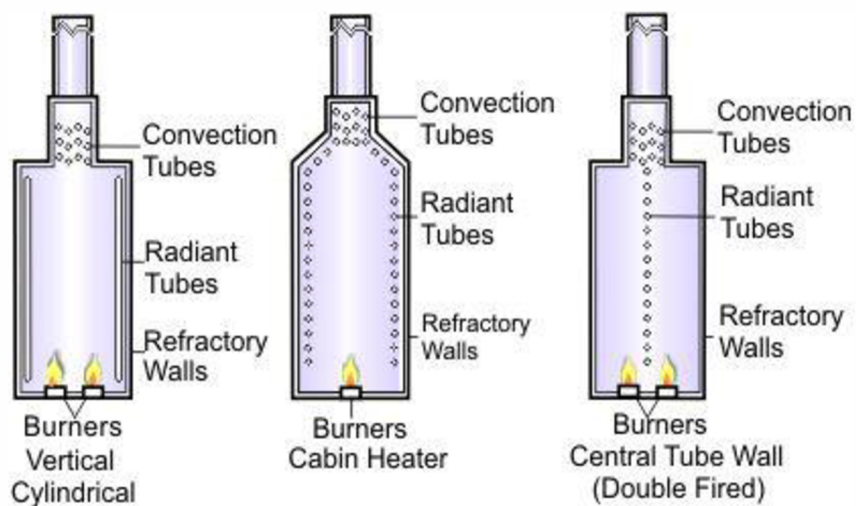
Trubkové pece jsou typově klasifikovány do několika kategorií dle jejich charakteristik. Základní rozdělení je vztaženo na konstrukční uspořádání radiální komory, kdy jsou pece děleny na tři základní typy – vertikální válcové pece, šachtové pece a pece kubické. Druhým nejdůležitějším dělením je dělení podle hlavního mechanismu sdílení tepla v zařízení na: radiálně – konvekční pece (válcové i šachtové pece), radiální pece (především válcové) a konvekční pece (především šachtové). [41] Dále lze pece klasifikovat dle rozdílných tepelných výkonů, typu paliva pro hořáky, rozdílného ohřivaného pracovního média, dle rozdílných vlastností produkovaných spalin nebo konstrukčního provedení konvekční komory a teplosměnných ploch. [41] Obr. 8 zobrazuje základní schéma procesní trubkové pece.

Zdrojem tepla uvnitř pece je proces spalování nejčastěji kapalného nebo plynného paliva nebo jejich kombinací. Zmíněné hoření paliva probíhá přímo ve vnitřním prostoru pece. Teplo je přenášeno do materiálu radiací a konvekcí prostřednictvím vyprodukovaného horkého plynu během procesu spalování. Tekutiny jsou obvykle zahřívány nepřímo, a to jejich vedením v trubkách uvnitř pece. V konvekční části peci jsou pro trubkový systém využívány také trubky s žebrováním, či trnováním, což má za následek zvětšení jejich povrchu, a tím i zvýšení účinnosti pece. Příným kontaktem mohou být ohřívány i pevné látky. [40, 41]



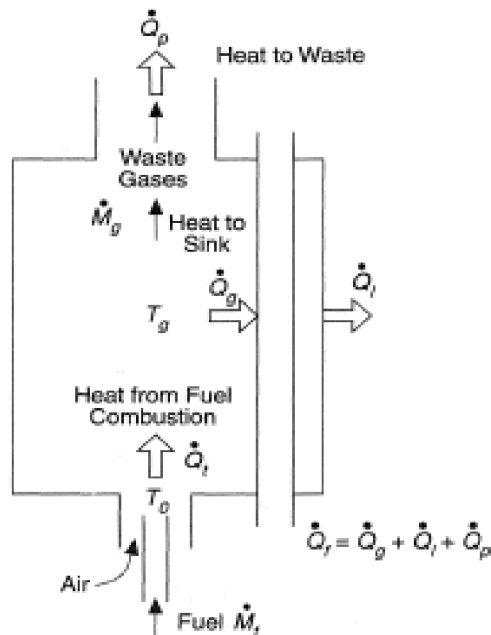
Obr. 8 Schéma uspořádání pece

V procesních pecích je jako palivo obvykle využíván olej a plyn. Proces ohřevu je navržen tak, aby ohřívané médium přijalo pouze požadované množství tepla na určitou dobu. Toho může být docíleno charakterem uspořádáním trubek v radiční části pece, správným ovládáním průtoku média uvnitř trubek a ovládáním rychlosti samotného procesu spalování. Jednotlivé typy uspořádání trubkových pecí jsou zobrazeny níže na Obr. 9 [40]



Obr. 9 Schémata tři základních uspořádání trubek v procesních pecích [42]

8.2 Tepelná bilance pece



Obr. 10 Tepelná bilance procesní pece [42]

Na Obr. 10 je zobrazeno jednoduché schéma procesní pece, které popisuje šíření tepla vzniklého spálením paliva (*Fuel* na Obr. 10). Vzniklé teplo Q_f prochází komorou směrem od hořáku ke spalínovodu. Část tepla je pohlcená trubkami, kterými proudí ohřívané procesní medium (Q_g) a část tepla odchází do stěn komory (Q_l). Zbylé teplo, označované také jako odpadní, dále pokračuje spalínovodem ven z procesu. Celková tepelná bilance je tedy:

$$\dot{Q}_f = \dot{Q}_g + \dot{Q}_l + \dot{Q}_p \quad (21)$$

kde \dot{Q}_f je teplo uvolněné spálením paliva [J],

\dot{Q}_g je teplo pohlcené pracovním mediem v trubkách [J],

\dot{Q}_l je teplo pohlcené stěnami komory [J],

\dot{Q}_p je odpadní teplo z procesu [J].

9 Hořáky

Průmyslový hořák je zařízení, používané k řízenému spalování paliva společně s okysličovadlem, za účelem výroby tepla nadále využitého nejčastěji pro výrobu páry nebo topného vzduchu. Tepelná energie je získávána přeměnou chemické energie paliva. Proces spalování závisí na pečlivé rovnováze čtyř parametrů, které souvisí s výběrem geometrie hořáku – palivu, množství kyslíku, tepla a reakcích chemického řetězce. Geometrie hořáků a provozní podmínky ovlivňují samotnou kvalitu spalování, tvorbu emisí, stabilitu plamene, tvar plamene a tepelné zatížení stěn komory. Ačkoliv jsou výkony a specifické konstrukce hořáků různé pro jednotlivé aplikace, existují pro tyto procesní hořáky univerzální požadavky, jejichž dodržení je nezbytné. Těmito požadavky jsou bezpečnost provozu hořáku, výkon, spolehlivost a udržitelnost. [32, 43]

9.1 Návrh hořáků

Z důvodu přísnějších předpisů v oblasti životního prostředí jsou kladeny větší požadavky na snížení emisí NO_x , CO, tuhých znečišťujících látek, apod., produkovaných hořáky. V mnoha případech je ale snižování emisí ve vzájemném rozporu se zvyšováním účinnosti samotného spalovacího procesu. Dosažení vysoké účinnosti spalování vyžaduje zvýšenou pozornost u návrhu a volby každé významné komponenty spalovacího systému. Pro splnění těchto požadavků a emisních podmínek nastala řada změn v tradičních návrzích hořáků. [15]

9.2 Dělení a specifikace

Hořáky lze rozdělit dle různých kritérií a cílených aplikací. Níže v kapitole jsou blíže specifikovány tyto skupiny dělení:

Hořáky dle typu spalovaného paliva

- Plynové
- Olejové
- Kombinované
- Hořáky pro tuhá paliva

Hořáky dle způsobu mísení paliva s okysličovadlem

- Hořáky ejekční (s předmísením)
- Hořáky difúzní (s mísením ve spalovací komoře)
- Hořáky s částečně předmísenou směsí
- Hořáky se stupňovitým přívodem paliva/okysličovadla

Hořáky dle způsobu přívodu spalovacího vzduchu

- S přirozeným přívodem spalovacího vzduchu
- S nuceným přívodem spalovacího vzduchu

Na další kategorie lze hořáky dělit podle způsobu atomizace, viskozity kapalného paliva, tvaru plamene, či tlaku ve spalovací komoře apod.[44]

9.2.1 Dělení hořáku dle typu paliva

Ve většině případů je konstrukce hořáku optimalizována na základě volby paliva. Palivo má významný vliv na mechanismy přenosu tepla mezi plamenem a zátěží. S ohledem na minimalizaci emisí je výběr konstrukce hořáků podle typu paliva velice významný. V hořácích lze spalovat paliva plynná, kapalná a tuhá. Některé konstrukce hořáků dovolují spalování paliv o různých skupenstvích, a to střídavě, či současně. Poté se jedná o tzv. hořáky kombinované. [10, 32]

Plynové hořáky

Plynové hořáky jsou převládajícím typem používaným v široké škále aplikací. Jsou konstrukčně jednoduché. Vzhledem k tomu, že není potřeba plyny před procesem spalování odpařovat, jak tomu je u kapalných paliv, pokládají se plynná paliva za méně náročná. Nejběžněji využívaným plynem v procesu spalování je, vzhledem k jeho dostupnosti a ceně, zemní plyn. Jako významné složky plyných paliv, například petrochemického průmyslu, lze zmínit vodík, metan, propan, dusík, či oxid uhličitý. [32]

Olejové hořáky

Kapalné palivo je u většiny hořáků potřeba rozprašit do dostatečně malých kapiček, které jsou schopny se zcela a rychle odpařit. Toto kapalné rozprašování probíhá pomocí různých typů atomizace. K rozprašení je běžně využíváno páry, stlačeného vzduchu, či tlakového rozprašení. Tento požadavek redukuje možnosti úpravy konstrukce hořáku pro snížení emisí. Nedokonalé rozprašení má za následek vysoké nespálené uhlovodíkové emise a snižuje účinnost konkrétního spalování. Základními kapalnými palivy jsou lehké a těžké topné oleje a nafta, které obsahují vázaný dusík a síru přispívající k negativní tvorbě emisí (NO_x , SO_x). [32, 44]

Kombinované hořáky

Kombinované hořáky mohou být dvou až více palivové. Nejběžnější typy disponují olejovou i plynovou konstrukční částí a jsou využívány v aplikacích s potřebou přepínání mezi plyným a kapalným palivem. V jiném případě lze obě paliva spalovat i současně. Z ekonomických důvodů, vzhledem k levným dodávkám zemního plynu, jsou pro průmyslové aplikace využívány především hořáky plynové. V případě, kdyby došlo k přerušení dodávky zemního plynu, lze toto palivo pro stejný typ hořáku nahradit záložním topným olejem. [10, 32, 44]

Hořáky na pevná paliva

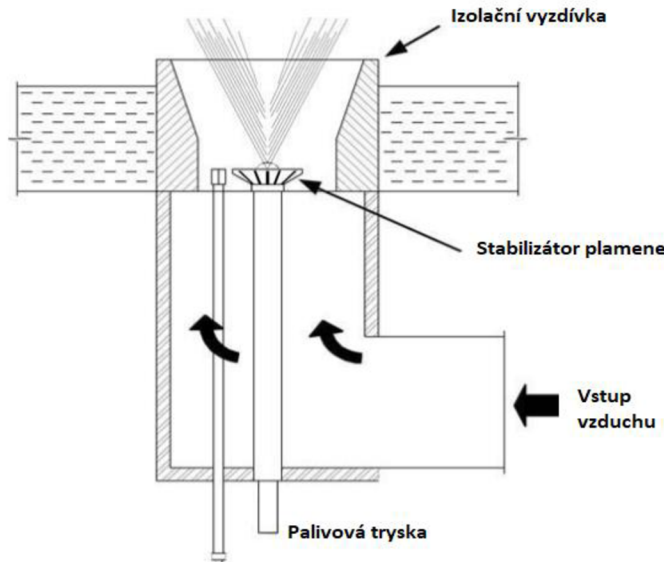
Hořáky pro pevná paliva pracují na principu spalování jemného prášku v kotlech. K získání této jemné frakce je zapotřebí větší měrné práce, čímž roste ekonomická stránka celkového provozu. Hlavním krokem k dokonalému spalování je dosažení dobrého promíchání spalovacího materiálu s oxidizačním prostředkem. Nejvyužívanějšími zdroji paliva jsou uhlí, pro výrobu elektrické energie, a koks, využitý při hutnických procesech. Součástí tuhých paliv jsou často nečistoty a nebezpečné chemikálie, které přispívají k tvorbě škodlivých emisí během spalování. [32, 44]

9.2.2 Hořáky s nuceným a přirozeným přívodem okysličovadla

Okysličovadlo je dopravováno do hořáku nuceným nebo přirozeným tahem. Pokud je okysličovadlo přiváděno pod tlakem (pomocí přetlaku před hořákem), jedná se o hořáky s nuceným tahem. Okysličovadlo může být přivedeno dmychadlem či ventilátorem, které jsou součástí samotného hořáku nebo mohou být umístěny mimo něj. U rozsáhlých aplikací může být na jedno zařízení napojena celá skupina hořáků, tzv. výkonnové hořáky. Případ hořáku s nuceným tahem nabízí variabilitu okysličovacích médií, např. předehřátého vzduchu a výfukových spalin. [32, 44]

U hořáků s přirozeným tahem dochází k nasávání vzduchu záporným tahem (podtlakem), který vzniká ve spalovací komoře, a hnací silou přiváděného paliva. Vzhledem k tomu, že dochází k nasávání vzduchu z okolního prostředí, nemůže být jako okysličovadlo použito nic jiného nežli atmosférický vzduch. Navzdory jednoduché konstrukci je v tomto případě obtížnější regulace přiváděného vzduchu. Pro tyto případy může být zabudována kontrolní klapka pro řízení toku přiváděného vzduchu. Docházet může i k neúplnému promísení paliva a vzduchu při malých rychlostech proudění.

Plameny hořáku s přirozeným tahem jsou delší než u hořáků s tahem nuceným. Důsledkem je působení tepelného toku z plamene na delší spalovací prostor, a tím vznik nižších teplot plamene. [32, 44]



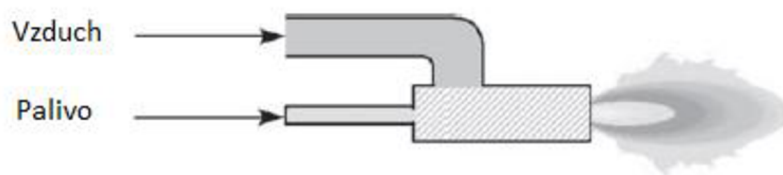
Obr. 11 Schéma hořáku s přirozeným tahem [45]

9.2.3 Klasifikace hořáků dle mísení paliva s oksyličovadlem

Na účinnost hořáku má největší vliv promíchání paliva s oksyličovadlem, jenž se projeví v úplném spalování, zejména tak v případě spalování nízko – výhřevných paliv. Palivo s oksyličovadlem musí být namícháno tak, aby byla maximalizována účinnost spalování, čímž je snížena i potřebná hodnota přebytečného spalovacího vzduchu a současně minimalizovány znečišťující emise. [45] Hořáky a plameny jsou klasifikovány podle typu použitého oksyličovadla, z pravidla bývá nejčastěji používán vzduch. Pro aplikace o vyšších teplotách je oksyličovadlem čistý kyslík. V jiných případech může být použit vzduch obohacen navíc o kyslík. [32]

Hořáky ejekční

Ejekční hořáky pracují již s předmíseným spalovacím médiem. Spalovací směs, tvořená palivem a oksyličovadlem, je kompletně promíchána uvnitř hořáku již před počátkem spalování. Aby nemohlo dojít ke zpětnému zašlehnutí plamene do hořáku, a tím k jeho poškození, je nezbytné, aby rychlost vzniklé směsi byla vyšší než rychlost samotného hoření. Hořáky s předmíseným vstupním médiem jsou charakteristické kratším a intenzivnějším plamenem. Kratší plamen a vyšší teploty v plameni zvyšují rychlost ohřevu, ale způsobují nerovnovážený ohřev teplosměnných ploch s vyššími emisemi NO_x . Hořáky jsou významné radiacním přenosem tepla z plamene. [7, 14]



Obr. 12 Zjednodušené schéma ejekčního typu hořáku [45]

Hořáky difúzní

Difúzní hořáky pracují na principu difúzního plamene. Palivo a oksyličovadlo je vedeno až na vyústění hořáku do spalovací komory. Plyn vystupuje z hořáku a do styku s kyslíkem přichází až ve spalovací komoře. Nehrozí tak riziko zpětného prošlehnutí. Díky tomuto aspektu je z pohledu bezpečnosti difúzní princip směřování využíván u hořáků typu palivo – kyslík. Spalováním směsi dochází ke vzniku difúzního plamene, který je charakteristický nižší teplotou jádra, a ve srovnání s plamenem předmísené spalovací směsi, je delší. Teploty a tepelné toky jsou lépe rozloženy podél celého spalovacího prostoru. To může mít pozitivní vliv na nižší tvorbu emisí NO_x . [7, 14]



Obr. 13 Zjednodušené schéma difúzního typu hořáku [45]

Hořáky s částečně přemísenou směsí

Tato konstrukce hořáku kombinuje principy obou již zmíněných typů. Uvnitř hořáku dochází ke smísení pouze části paliva a okysličovadla domísení zbytku směsi nastává až v sekci hoření. Tento typ hořáku je využíván pro jeho bezpečnost a stabilitu procesu. Částečné přemíchání paliva s okysličovadlem zajistí stabilní hoření plamene. Naopak druhotné přivedení okysličovadla až do spalovací komory, působí proti prošlehnutí plamene dovnitř hořáku. Délka plamene, teplota a tepelné toky odpovídají hodnotám mezi injekčními a difúzními hořáky. [32]

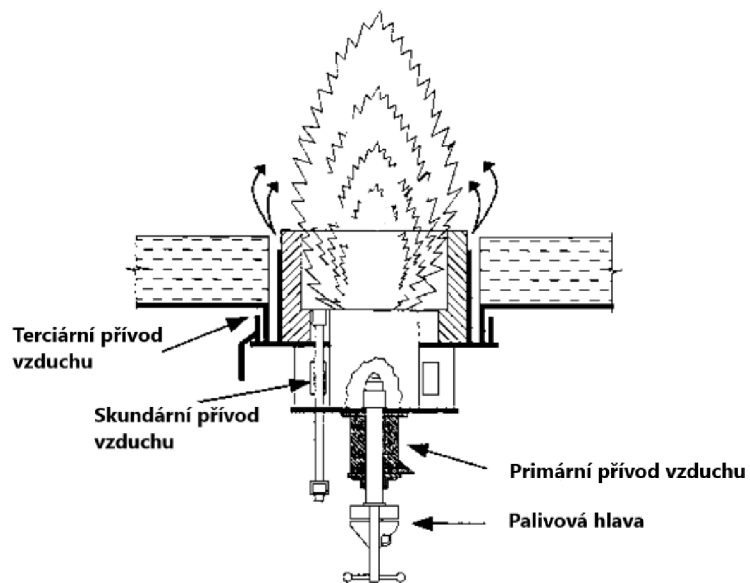


Obr. 14 Zjednodušené schéma hořáku s částečně přemísenou směsí [45]

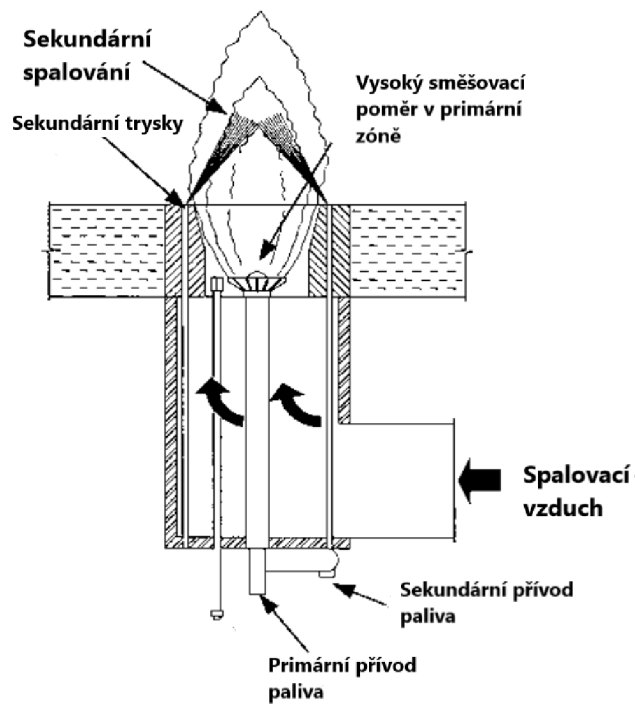
Stupňovitý přívod vzduchu nebo paliva

Další klasifikace hořáků dle směšování paliva s okysličovadlem se vyznačuje stupňovitým přívodem okysličovadla či paliva do plamene. V prvním kroku je běžným způsobem přivedena část okysličovadla/paliva do spalovací komory, ve které nastane neúplné spalování paliva. Poté je sekundárními (někdy i terciálními) tryskami hořáku přivedena další část okysličovadla/paliva. [32]

Postup přivádění média ve stupních, se často provádí za účelem snížení emisí NO_x za vzniku delších plamenů, které jak již bylo zmíněno jsou charakteristické nižší teplotou plamenového jádra a ustálenější produkcí tepelného toku. Větší délka plamenů může, důsledkem vlastní interakce, působit negativně na spalovací proces, což se naopak odráží ve zvýšení produkce emisí NO_x . [32]



Obr. 15 Schéma hořáku se stupňovitým přívodem vzduchu [45]

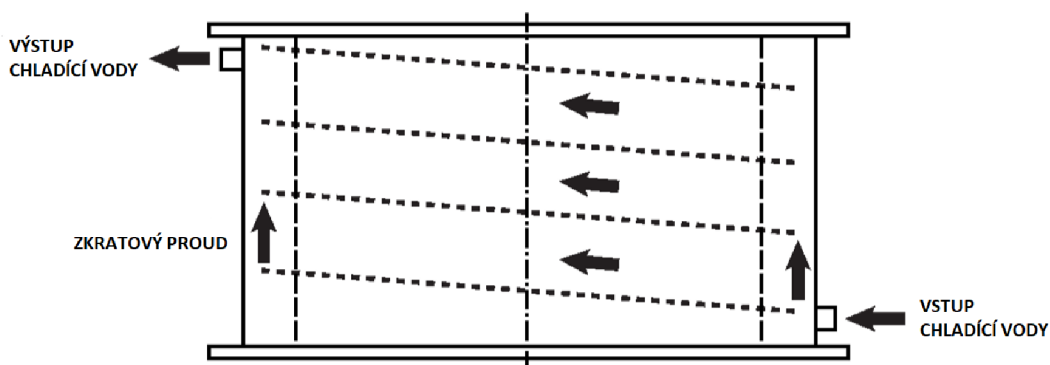


Obr. 16 Schéma hořáku se stupňovitým přívodem paliva [45]

10 Experimentální část

10.1 Popis zkušebního zařízení

Aparátem pro zkoušky hořáků na Ústavu procesního inženýrství VUT v Brně je horizontální vodou chlazená spalovací komora o délce 4 metry a vnitřním průměru 1 metr. Vodou chlazený plášť je rozdělen do sedmi sekcí, chlazených vodou protékající konstrukcí šroubovice v meziplášťovém prostoru, jejíž vstupní a výstupní teploty a průtoky lze zaznamenávat pro každou sekci separátně. To poskytuje jednu z metod vyhodnocení tepelných toků, ovlivňujících podél celé délky plamene stěny komory. Zmíněná konstrukce šroubovice je pevně přivařená k vnitřnímu plášti komory a její schématické znázornění lze vidět na Obr. 18. Rozdělením komory na samostatné sekce a volbou konstrukce šroubovice pro vnitřní tok je dosaženo dobré cirkulace vody, a tím i lepšího a rovnoměrného chlazení pláště. Sekce jsou rozděleny po 0,5 metrech, poslední sekce má délku jednoho metru. Spalovací komora je vybavena inspekčními otvory sloužícími k pozorování plamene, případně k instalaci měřicího zařízení. Inspekční otvory jsou opatřeny pro každou separátní sekci na obou stranách komory. Další dva otvory jsou umístěny v čele komory, s možností pozorování zážehu plamene a jeho čelního profilu.

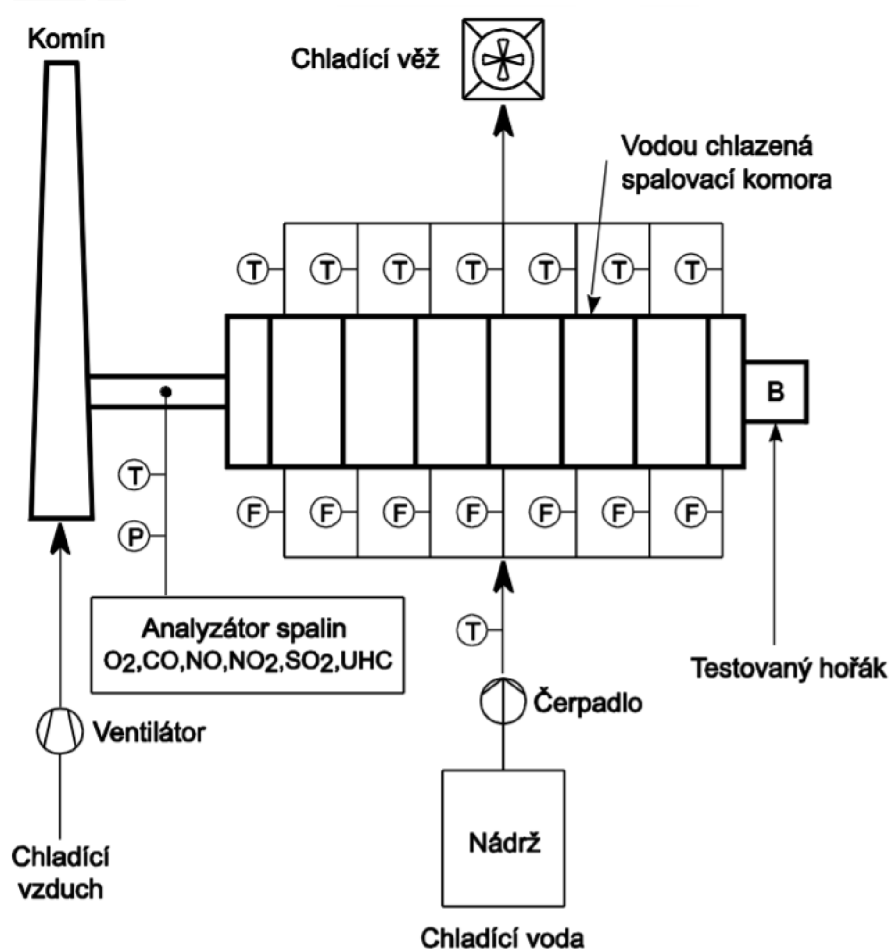


Obr. 18 Schématické znázornění cirkulace vody v separátní sekci spalovací komory [47]

Zkušebna umožňuje provedení zkoušek hořáků na kapalná a plynná paliva, ale také hořáků kombinovaných (viz.9.2.1). V závislosti na konfiguraci hořáku je spalovací komora omezena maximálním tepelným výkonem 1,8 MW a je možné udržovat uvnitř komory stálý podtlak (400 Pa) nebo přetlak (600 Pa). Pro přívod spalovacího vzduchu je zkušebna vybavena vysokotlakým ventilátorem o maximálním výkonu 2500 m³/h při přetlaku 4 kPa.

V průběhu provozu spalovací komory lze díky systému sběru dat zaznamenávat a ukládat informace jednotlivých médií podílejících se na spalovacím procesu. Měřit lze tlaky médií v přívodních potrubích, teploty a průtočná množství paliva, spalovacího vzduchu (okysličovadla)

a chladící vody, teploty ve spalovacím prostoru, a také informace o vlastnostech spalin na výstupu ze spalovacího procesu. Zmíněné spaliny porudí ven skrze kouřovod, ve kterém jsou umístěny tři jímky pro měření tlaku v komoře, teplot a složení spalin. Pomocí analyzátoru mohou být monitorovány koncentrace O_2 , NO_x , CO , SO_x a C_xH_x . Veškerá systémem zaznamenaná a dopočítaná data lze přímo v průběhu zkoušky také vizuálně kontrolovat na ovládacím panelu. Pro dosažení ustálení procesu, a tím kvalitní přesnosti měření, je zapotřebí počítat s minimální dobou náběhu celého zařízení 30 minut.



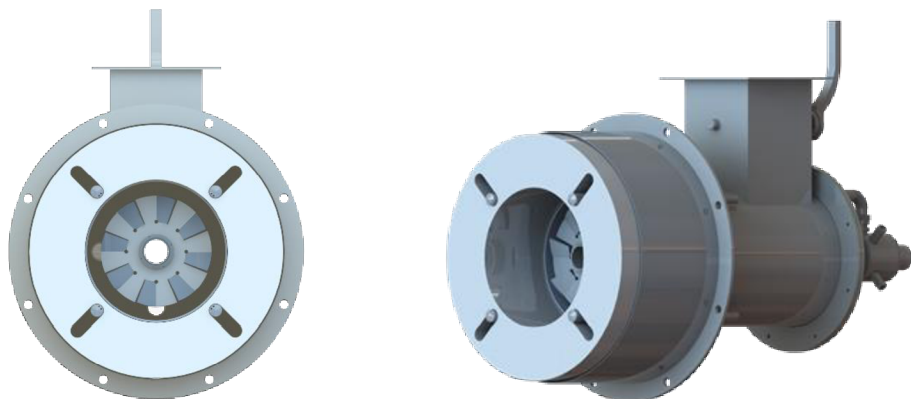
Obr. 19 Technologické schéma zkušebny [12]

10.2 Hořák ZPH

Hořák ZPH je určen pro spalování ve dvoustupňovém režimu přívodu paliva, a taktéž zastupuje skupinu kombinovaných hořáku typu olej – plyn. Ačkoliv je hořák specifikován jako dvoustupňový, geometrie hořákové hlavy umožňuje vedení paliva sekundárním i pouze primárním stupněm. Maximální výkon primárního stupně hořáku lze ovlivnit vhodnou volbou průměru vyměnitelné clony hořáku. K zapálení hořáku je nezbytný hořák s přirozeným sáním atmosférického vzduchu a maximálním výkonem 18 kW.

Geometrie

Centrální částí hořáku prochází nosná trubka, sloužící k rozvodu plynu, na kterou je přichyceno osm šikmých lopatek vířiče. Hořáková hlava je tvořena primární částí, ve které je umístěno dvanáct primárních trysek, rozmístěných do dvou kruhových polí na vnitřním průměru hořáku. V sekundárním stupni distribuce paliva se nachází dalších osm trysek, které lze díky konstrukci hořákové hlavy posunovat a natáčet v radiálním i tangenciálním směru podél osy hořáku. Orientaci trysek lze také měnit ve směru vířivého pohybu plamene nebo ve směru opačném. Trysky mohou být umístěny v radiální vzdálenosti od osy hořáku v rozmezí od 180 mm do 230 mm. Primární trysky mají vliv na rovnoměrnost a stabilitu proudění paliva, zato správná orientace a nastavení sekundárních trysek působí pozitivně na ideální promísení paliva a spalovacího vzduchu.



Obr. 20 ZPH hořák – 3D model

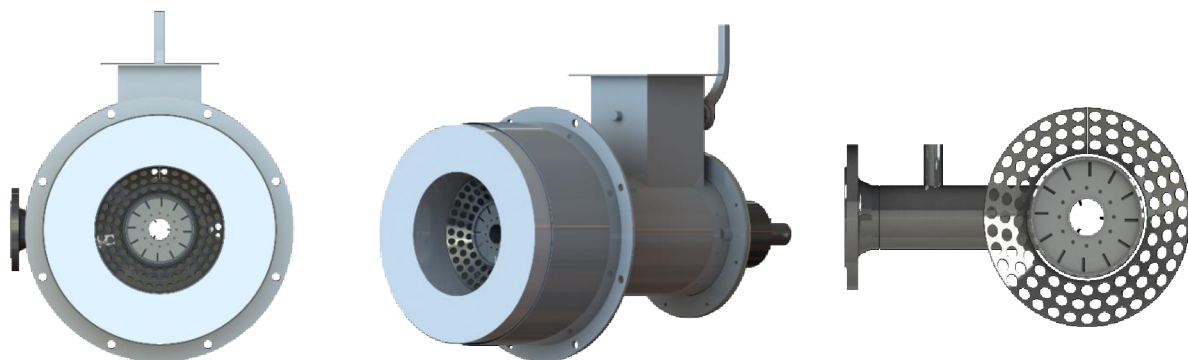
10.3 Hořák LPH

Hořák LPH o maximálním výkonu 1500 kW je zástupcem kombinovaných hořáků typu olej-plyn spalujících nízkou – výhřevná paliva. Při spalování nízkou – výhřevných paliv je, pro dosažení požadovaných výkonů, nutné prohnat hořákem větší množství paliva, než je tomu u hořáků spalujících paliva běžná. Z toho důvodu musí být konstrukce hořáku přizpůsobena průtokům většího množství paliva. Zvolený hořák je specifický svou konstrukcí vestavby, která byla nově navržena a patentována r.2017 výzkumným týmem Ústavu procesního inženýrství VUT v Brně. Vestavba byla vyvinuta s cílem pokrytí nedostatků spojených s provozem procesních hořáků v průběhu spalování nízkou – výhřevných paliv. Hořák zajišťuje dostatečnou stabilitu plamene a zamezuje utržení plamene nebo prohoření plamene do těla hořáku.

Geometrie

Centrální částí hořáku prochází nosná trubka, která je důležitá pro připojení víříče, jehož naklonění lopatek částečně ovlivňuje proud vzduchu a nasměrovává jej ke středu plamene. Konstrukce byla navržena tak, aby k nosné trubce bylo možné připojit vedení atomizéru, sloužícímu k rozprášení kapalných paliv. Tyto kroky optimalizace vedou k dosažení dokonalého spalování.

Ačkoliv je hořák specifikován jako jednostupňový, geometrie hořákové hlavy umožňuje vedení paliva primárním i sekundárním stupněm. Pomocí trysek, rozmístěných do kruhu u vnitřního obvodu hořákové hlavy, je dosaženo rovnoměrného proudění paliva podél osy hořáku tak, aby jádro plamene bylo dostatečně stabilizováno. Tato sekce tvoří primární stupeň distribuce paliva hořáku. V sekundárním stupni, na vnějším obvodu, jsou rozmístěny drážky, jimiž proudí palivo hořákovou hlavou pod úhlem, který mění jeho proud do tangenciálního rotačního směru podél osy hořáku a má tak významně pozitivní vliv na promíchání paliva se spalovacím vzduchem. Za současného maximálního výkonu a nízké výhřevnosti je potřebné dbát i na minimalizaci tlakových ztrát způsobených prouděním paliva. Toho bylo dosaženo zvětšením průměru přívodního potrubí. [48]



Obr. 21 LPH hořák – 3D model

10.4 Plán zkoušek

Jak již bylo zmíněno v úvodu, pro získání komplexnějšího pohledu na výsledky spalování paliva s obsahem inertních plynů, byly provedeny zkoušky pro dva typy hořáků. První testování proběhlo na kombinovaném konvenčním hořáku ZPH. Druhým typem hořáku byl hořák LPH, speciálně konstrukčně upravený hořák pro spalování nízko – výhřevných paliv. Zkoušky obou hořáků probíhaly při stanoveném výkonu 500 kW. Spalován byl v první řadě čistý zemní plyn, který byl použit k zapálení hořáku a následnému vyhřátí spalovací komory. V první fázi byl také nastaven proud spalovacího vzduchu na takové množství, aby koncentrace O_2 v suchých spalinách odpovídala hodnotě 3 %, čemuž je roven přebytek spalovacího vzduchu $\alpha = 1,15$. Hodnoty získané z průběhu spalování zemního plynu posloužily jako výchozí parametry k vyhodnocení a porovnání následných testovaných konfigurací zahrnující vliv přítomnosti inertních plynů. Po ustálení provozních parametrů a dostatečném vyhřátí komory byly do paliva postupně přidávány průtoky inertních plynů N_2 a CO_2 . V prvním kroku byl do paliva přidán průtok $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 . Po ustálení provozu, naměření a získání všech potřebných hodnot, byl průtok inertního plynu navýšen na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 . Stejný postup platil v případě přidání inertního plynu CO_2 .

Sledován byl vliv inertních plynů na tvar a teplotu plamene u jednotlivých typů hořáků. K měření teplot plamene posloužily vodou chlazené termočlánky typu R (slitina Pt-Rh vs. Pt), instalované v inspekčních otvorech ve směru délky horizontální osy komory. Termočlánky byly postupně zasouvány směrem k plameni z počáteční nejvzdálenější pozice 0,05 m. Poté následoval posun termočlánků na pozice – 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m a 0,5 m. Sběr dat vystupujících z termočlánků byl prováděn pomocí dataloggeru midi LOGGER GL2220 společnosti Graphtec. Data byla logována po dobu 30 nebo 60 sekund pro každou pozici a konfiguraci. O rozložení teplotních polí uvnitř spalovací komory pojednávají kapitoly 10.5.1 a 10.6.1.

Dalším cílem zkoušek hořáků bylo zjištění tepelných toků působících na stěny komory v jednotlivých sekcích. Tepelné toky zkoušek obou hořáků byly vypočteny nepřímou metodou. Pomocí naměřených průtoků chladicí vody a hodnot vstupních a výstupních teplot z každé sekce, bylo možné vypočítat tepelné toky působící po celé délce komory. K výpočtům tepelných toků byl použit program excel. Získané charakteristiky jsou popsány v kapitolách 10.5.2 a 10.6.2. V těchto kapitolách jsou také vykresleny křivky toků pro jednotlivé průtoky inertních plynů uváděné v jednotkách $[\text{m}_N^3/\text{h}]$ *(jednotky jsou uvedeny z důvodu chybového zobrazení legendy u grafů). Tepelné toky lze získat i přímým měřením pomocí radiační sondy. Pro porovnání hodnot získaných z obou uvedených metod, a posouzení jejich odchylky, bylo provedeno měření na hořáku LPH o stejném nastavením spalovacího procesu pro obě tyto varianty měření tepelných toků. Spalován byl zemní plyn společně s průtokem $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ inertního oxidu uhličitého. Výsledné hodnoty tepelných toků, získané pomocí každé z metod, jsou uvedeny v kapitole 10.6.3.

Posledním bodem zkoušek bylo vyhodnocení charakteristických vlastností plamene a jeho stability. Dále také zhodnocení vlivu přítomnosti inertního plynu v palivu o různých množstvích na tvorbu emisí NO_x a CO a maximální teplotu spalin na výstupu do spalinovodu.

10.5 Výsledky měření – hořák ZPH

Teploty v plameni byly u hořáku ZPH měřeny pomocí osmi termočlánků umístěných v inspekčních otvorech, rozmístěných po celé délce komory, tzn. pro každou sekci. První základní nastavení odpovídá spalování čistého zemního plynu bez příměsí. Poté byly k palivu přidávány inertní plyny CO_2 a N_2 v průtocích $40 \text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$ a $80 \text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$. Data byla logována vždy po dobu 60 sekund pro každou pozici a konfiguraci.

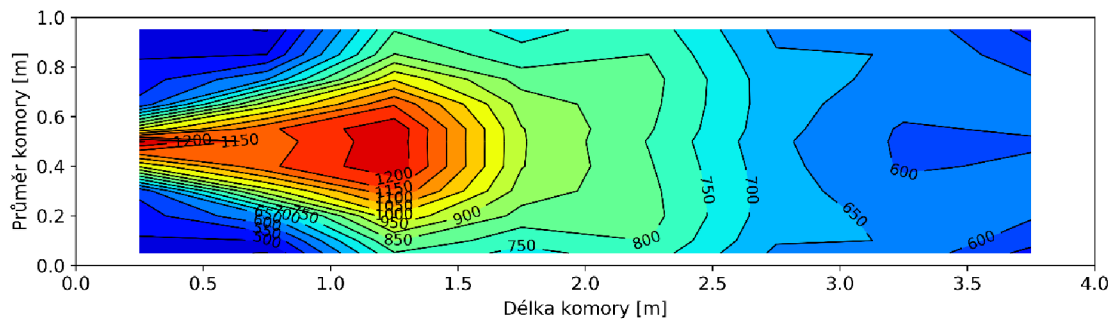
Koncentrace emisí byly, v případě zkoušek prováděných na hořáku ZPH, měřeny pomocí analyzátoru Siemens Ultramat 23. Zmíněný typ analyzátoru poskytuje naměřená data emisí v jednotkách ppm. Proto bylo nezbytné tyto jednotky u naměřených emisí CO přepočítat na $\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$, dle uvedeného postupu v podkapitole 5.4. Vyhodnocení emisí NO_x bylo možné provést již vypočtených hodnot, poskytnutých analyzátozem.

10.5.1 Teploty v plameni

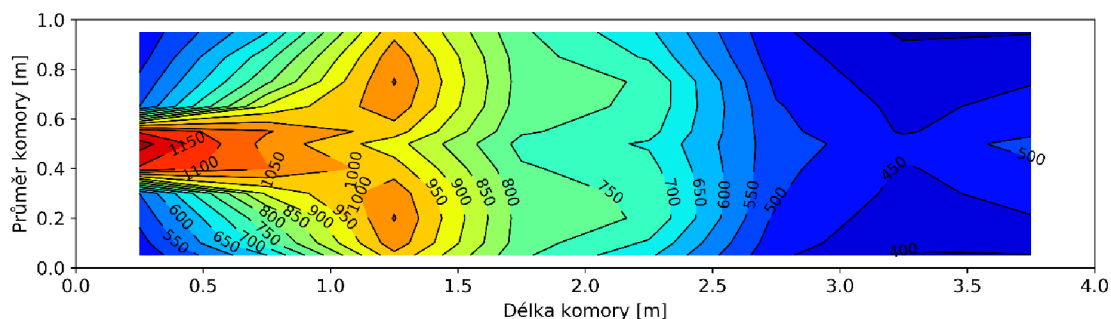
První měření teplot v plameni u hořáku ZPH probíhalo pro výchozí nastavení. Spalován byl čistý zemní plyn bez příměsí inertních plynů. Vykreslení teplotních polí na Obr. 22 je charakteristické pro tento případ spalování ušlechtilého plynu tím, že je veškeré palivo soustředěno do středu plamene. Při zvolené geometrii hořáku a podmínkách spalování se nejvyšší teploty nad $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ vyskytují v oblasti ústí hořáku a následně v jádře plamene ve vzdálenosti $1,25 \text{ m}$ od hořákové hlavy. Teplotní pole plamene, od jeho středu směrem ke spalínovodu, postupným vyhořením paliva slábne až na hodnotu $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Další naměřené hodnoty odpovídají stavům po přidání inertních plynů. Přidáním CO_2 o průtoku $40 \text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$, jak je patrné na Obr. 23, došlo k mírnému ochlazení teplotních polí. Nejvyšší teploty jsou soustředěny v těsné blízkosti ústí hořáku. Za touto oblastí, v úseku vzdáleném cca $0,9 \text{ m}$ od ústí, dochází k rozdělení teplotních toků do dvou větví, díky kterým se tepelná oblast o teplotách $950\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ rozšiřuje a rovnoměrně tak ovlivňuje prostor po celé šíři spalovací komory. Lze si povšimnout i rychlejšího teplotního spádu směrem ke spalínovodu, než je tomu v případě spalování čistého zemního plynu.

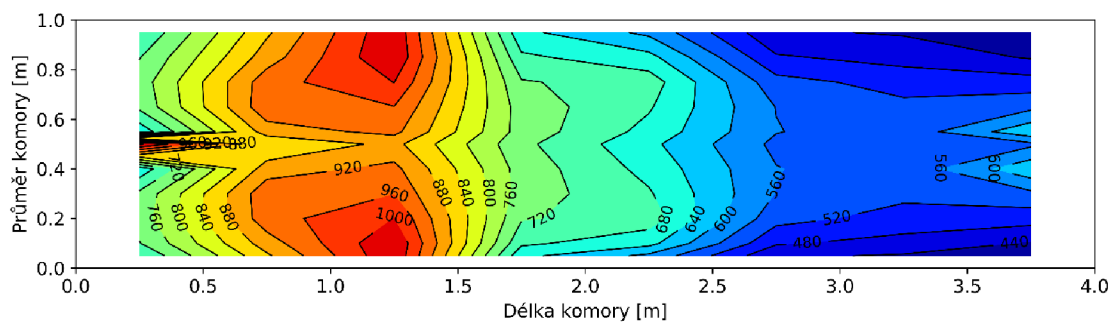
Zvýšení průtočného množství CO_2 na $80 \text{ m}_\text{N}^3/\text{h}$ přispělo k vyšším výstupním rychlostem z hlavy hořáku, které se projeví na výrazném zúžení plamene u ústí a rychlejším províření paliva se spalovacím vzduchem, a tím jeho roztažení v radiálním směru. Na Obr. 24 lze vidět výraznou změnu v rozložení teplotních polí. Významné ochlazení plamene proudem CO_2 způsobuje pokles teplotních špiček plamene až o $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Tyto místní maxima jsou soustředěny do těsné blízkosti teplosměnných ploch komory a mohou způsobit lokální přehřívání stěn. Vzhledem k tomu, že teploty plamene nedosahují hodnot $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, přispívá zvolená konfigurace k omezení vzniku termických NO_x při současné poměrně vysoké teplotě odcházejících spalin.



Obr. 22 Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



Obr. 23 Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $40 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

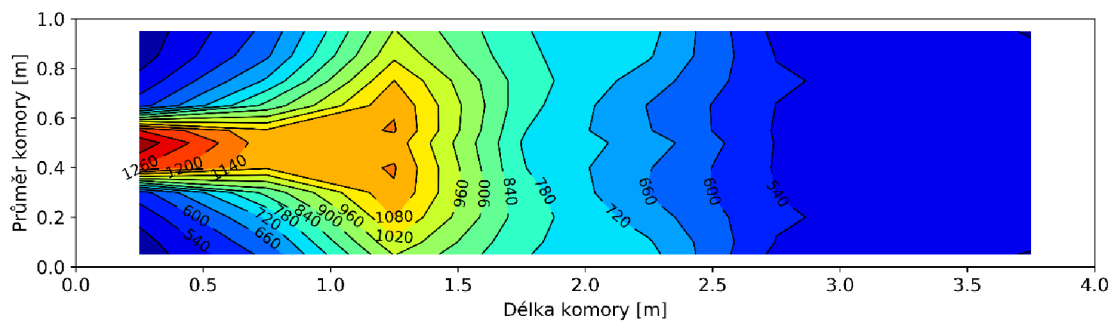


Obr. 24 Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $80 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

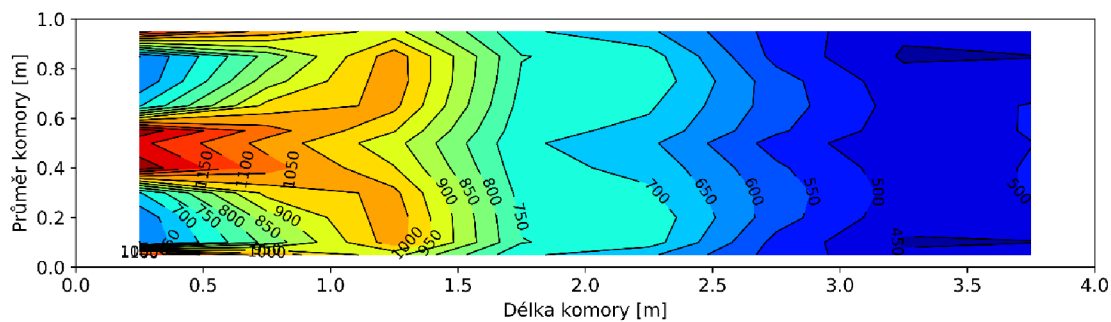
Přimícháním plynu N_2 o průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ (Obr. 25) k zemnímu plynu dochází ke zkrácení plamene a ke zvýšení teplotních špiček, působících ve středu plamene, až na $1260 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní špičky jsou ve srovnání se základním nastavením posunuty až k samotnému ústí hořáku a postupně po délce plamene dochází k jejich rychlému poklesu. Největší tepelnou oblast představuje pole o teplotách $1080\text{--}1140 \text{ }^\circ\text{C}$, působící v úseku vzdáleném $0,6\text{--}1,3 \text{ m}$ od hořákové hlavy. Teploty jádra

plamene jsou velmi vysoké, avšak v důsledku kratšího plamene dochází k výraznému chladnutí po délce komory a následnému snížení výchozí teploty spalin na 540 °C. Vysoké teploty nepříznivě přispívají k navýšení tvorby emisí NO_x.

Průběh tepelného vykreslení při aplikování průtoku 80 m³/h N₂ je obdobný se situací na Obr. 23 , která vykresluje proces spalování paliva s průtokem 40 m³/h CO₂. Jádro plamene je posunuto k ústí hořáku a hlavní proud paliva je následně vlivem inertního plynu rozdělen do dvou proudů, které směřují ke stěnám komory. V případě průtoku N₂ je dosaženo v prvních dvou sekcích komory (do 1 m) většího tepelného ovlivnění stěn komory, než je tomu v případě CO₂, jak lze vidět na Obr. 26 .



Obr. 25 Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 40 m³/h N₂, 0 m³/h CO₂



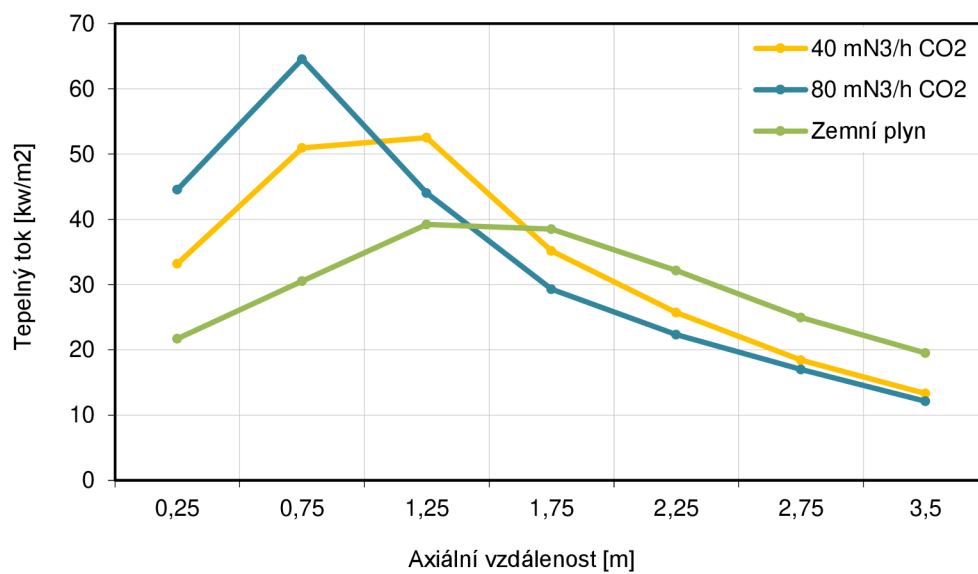
Obr. 26 Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 80 m³/h N₂, 0 m³/h CO₂

10.5.2 Tepelné toky

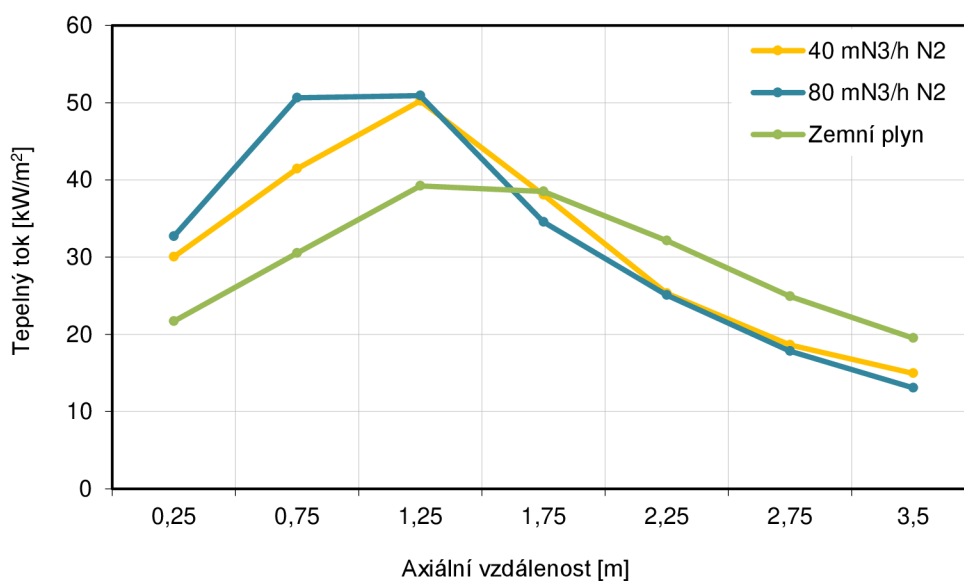
Tepelné toky jsou přímým odrazem charakteru plamene ve spalovacím procesu. Větší intenzitu působení tepelných toků na stěny komory lze očekávat v případě, dojde-li k výraznějšímu rozpínání plamene v radiálním směru od osy komory. Vlastnosti tepelných toků jsou také ovlivněny inertními plyny. Velké podchlazení plamene inertním plynem může mít za důsledek snížení teplotních špiček procesu, avšak vliv proudění těchto plynů může tento deficit vynahradit změnou velikosti tepelného pole a jeho umístěním, jako je patrné na Obr. 24. Hodnoty celkových předaných tepelných výkonů a účinnosti všech konfigurací jsou uvedeny v Tab. 4.

Tepelné toky vzniklé spalováním zemního plynu mají poměrně neskokový nárůst i pokles hodnot po celé délce spalovací komory, jak je vidět na Obr. 27. Hranice maximálních hodnot tepelných toků této konfigurace se nachází ve třetí a čtvrté sekci spalovací komory, tj. ve vzdálenosti 1,25 až 1,75 m. Maximální hodnota toku je rovna $39,22 \text{ kW/m}^2$ a působí na stěny komory ve čtvrté sekci.

Přidáním průtoku inertního plynu došlo ke zkrácení plamene, a tím i k výraznému posunu maximálních hodnot tepelných toků směrem k hořáku. Průtočné množství $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ oxidu uhličitého výrazně zvýšilo odběr tepla stěnami komory již v prvních dvou sekcích (0,25–0,75 m). Maxima však zůstávají nadále ve třetí sekci komory, jak tomu je u spalování čistého zemního plynu. Maximální tepelný tok byl vypočten na $52,51 \text{ kW/m}^2$. Ve vzdálenosti 1,75 m od ústí hořáku dochází vlivem většího odvedení tepla spaliny k poklesu tepelných toků pod úroveň hodnot naměřených ze spalování čistého zemního plynu. Tento trend je sledován u všech později zmíněných konfigurací, jak lze vidět na Obr. 29 i Obr. 37. Nicméně teplo, předané tepelnými toky stěnám je v celkovém měřítku větší, než v případě tepelných toků z ušlechtilého plynu. Zvýšením průtoku oxidu uhličitého na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ je znát výrazný posun hodnot tepelných toků nad hranici 60 kW/m^2 . Působení tepelných toků po délce komory má však zcela odlišný charakter oproti předešlým situacím. Jak lze vidět na Obr. 24 přidání vyššího průtoku inertu při této konfiguraci způsobilo rozpínání plamene až do těsné blízkosti stěn komory, čímž došlo k výraznému, téměř bodovému předání tepelné energie, jak již lze vidět na Obr. 27. ve vzdálenosti 0,75 m. Navzdory značnému ochlazení plamene velkým množstvím inertního plynu dochází při této konfiguraci k nejvyšším tepelným tokům o maximální hodnotě $64,56 \text{ kW/m}^2$. Tepelné toky po přidání průtoku dusíku nejsou tak vysoké, jako v případě oxidu uhličitého, a jejich maximální hodnoty nepřekračují hranici 51 kW/m^2 . Průtokem $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 se průměrný tepelný tok v první sekci navýšil o $8,35 \text{ kW/m}^2$ od původního nastavení. Poté rovnoměrně narůstá, obdobně jako v případě spalování čistého zemního plynu, až do vzdálenosti 1,25 m od ústí hořáku, kde dosahuje svého maxima (Obr. 28). Navýšením průtoku dusíku na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ je dosaženo téměř stejných tepelných toků v jednotlivých sekcích komory jako při průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2 . Průběh křivek je vidět na Obr. 29.



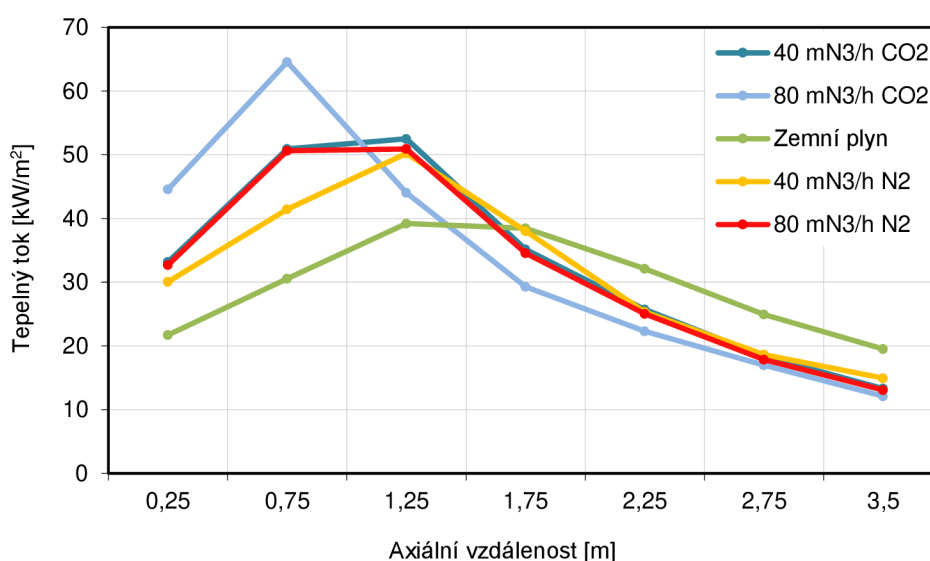
Obr. 27 Hořák ZPH: tepelné toky CO₂



Obr. 28 Hořák ZPH: tepelné toky N₂

Palivo	Tepelný výkon [kW]	Termická účinnost [%]
Zemní plyn	342,1	68,5
ZP + 40 m _N ³ /h N ₂	366,4	73,2
ZP + 80 m _N ³ /h N ₂	368,6	72,5
ZP + 40 m _N ³ /h CO ₂	359,2	72,1
ZP + 80 m _N ³ /h CO ₂	352,8	71,1

Tab. 4 Hořák ZPH: tepelný výkon a termická účinnost



Obr. 29 Hořák ZPH: tepelné toky všech testovaných konfigurací

10.5.3 Emise a charakteristika plamene

Hodnoty získané z průběhu spalování samostatného zemního plynu slouží jako výchozí specifikace pro vyhodnocení spalovacích zkoušek s aplikováním inertních plynů. Výsledná data jsou shrnuta v příložené tabulce – Tab. 5.

Vzhledem k distribuci veškerého paliva směrem k plamenovému jádru hořel plamen při spalování samostatného zemního plynu stabilně v celé své míře. Plamen byl v průběhu hoření měkký a mírně zahnutý směrem k horní části spalovací komory. Plamenové jádro bylo zbarveno do modra, se žlutou obálkou. Délka plamene odpovídala 2,25 m a jeho rozpětí, v ose šířky komory, bylo přibližně 0,4 m.

S přidáním $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ průtoku inertního dusíku došlo k mírnému ochlazení a zkrácení plamene, jenž se lehce projevilo zeslábnutím žluté obálky plamene na pouhé záblesky žluté. Se snížením teploty plamene klesá i teplota spalin na výstupu ze spalovací komory z $656 \text{ }^\circ\text{C}$ na $580 \text{ }^\circ\text{C}$. Navýšení průtoku dusíku na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ způsobilo další pokles teploty spalin na maximálních $548 \text{ }^\circ\text{C}$. Výraznou změnu lze vidět v charakteru plamene, který se přidáním většího množství inertu zvířil a zkrátil na délku 1 m. Zůstal však stále stabilní. Došlo i k mírnému zúžení plamene na 0,35 m. Ochlazením plamene se žlutá obálka postupně zbarvila do modra, výrazně žluté zůstali pouze konce plamene. Mimo hlavní zóny hoření plamene bylo možné pozorovat viditelné proudy vycházející z jednotlivých trysek hořáku, jenž lze vidět i na Obr. 26 .

S přidáním oxidu uhličitého o průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ do paliva bylo možné sledovat změnu v barvě plamene z modrožluté na převážně modrou barvu jádra plamene s fialovými konci, které přecházely do žluté. Plamen byl zkrácený na délku 1,25 m, stále stabilní a směřoval ke spodní části spalovací komory. Přidáním inertního plynu došlo opět k mírnému víření plamene, a tím i k jeho rozšíření na 0,5 m. Trend snižování teploty spalin pokračoval i v případě přidání inertního oxidu uhličitého do paliva. Teplota spalin při průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ byla snížena z $656 \text{ }^\circ\text{C}$ na $556 \text{ }^\circ\text{C}$. Při navýšení průtoku CO_2 na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ byla maximální teplota spalin, v porovnání se spalováním zemního plynu, snížena až o $122 \text{ }^\circ\text{C}$, tedy na $534 \text{ }^\circ\text{C}$. Plamen byl po navýšení průtoku CO_2 stále stabilní, ačkoliv došlo k výraznému zúžení jádra plamene, a naopak k rozšíření konců plamene do celé šíře komory, což potvrzuje i rozložení tepelných polí na Obr. 24 . Plamen byl po přidání $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2 výrazně zbarven do modra.

V průběhu spalování samostatného zemního plynu byly získány emisní hodnoty NO_x odpovídající $99 \text{ mg}/\text{m}_N^3$. Tato hodnota je dle aktuálních emisních limitů velice hraniční (viz. Tab. 2 v kapitole 5.5) Přidáváním inertních plynů do paliva byla tvorba NO_x ve spalinách potlačena. Tento trend snižování však neplatil u tvorby emisí CO. Přidáním průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ plynu N_2 do paliva byla koncentrace NO_x snížena o 23 %, na hodnotu $76 \text{ mg}/\text{m}_N^3$. Nicméně koncentrace CO ve spalinách vzrostla o celých 124 % z původní hodnoty $79 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ na $177 \text{ mg}/\text{m}_N^3$. Zvýšení průtoku na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 přineslo redukcí koncentrace emisí na hodnoty akceptovatelné emisními limity. Množství CO bylo sníženo až na hodnotu $4 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ a emise oxidů dusíku na přijatelnou hodnotu $68 \text{ mg}/\text{m}_N^3$.

Během spalovacích zkoušek, kdy bylo do paliva přimícháváno množství $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2 , došlo k výraznému poklesu emisí NO_x o 48 %, a to z původních $99 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ na $51 \text{ mg}/\text{m}_N^3$. Koncentrace emisí CO ve spalinách zůstala přece jenom dost vysoká a svou hodnotou $88 \text{ mg}/\text{m}_N^3$ stále nesplňovala emisní limity stanovené zákonem o ochraně ovzduší. Zvýšením průtoku na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2 bylo dosaženo optimálního poměru tvorby emisí NO_x a CO. Emise oxidů dusíku byly sníženy na hodnotu $29 \text{ mg}/\text{m}_N^3$, což odpovídalo redukcí o 70 % ve srovnání s hodnotou emisí NO_x z procesu spalování čistého zemního plynu. V případě CO bylo naměřeno množství $5 \text{ m}_N^3/\text{h}$.

Specifikace	Jednotky	Zemní plyn	Zemní plyn + inertní složka			
			N ₂	CO ₂		
Průtok plynu	m _N ³ /h	50	40	80	40	80
Průměrný výkon hořáku	kW	500	501	503	503	505
Délka plamene	m	2,25	1,25	1	1,25	1,5
Průměr plamene	m	0,4	0,4	0,35	0,5	0,4
Stabilita plamene	-	stabilní	stabilní	stabilní	stabilní	stabilní
Průměrná teplota spalín	°C	653,3	578,3	546,3	555	553,3
NO _x	mg/m _N ³	99	76	68	51	29
CO	mg/m _N ³	79	177	4	88	5

Tab. 5 Hořák ZPH: výsledné emise a charakteristiky procesu

10.6 Výsledky měření – hořák LPH

V případě druhého měření byly hodnoty teplot z plamene, z důvodu poruchy jednoho termočlánku, logovány pouze pro prvních 7 sekcí spalovací komory (tj. do vzdálenosti 3,5 m). Vzhledem k nižším množství inertního plynu pro spalovací zkoušky byly teploty plamene v tomto případě zaznamenávány pro každou pozici a danou konfiguraci pouze po dobu 30 sekund.

Koncentrace emisí byly v případě hořáku LPH měřeny pomocí analyzátoru ABB EL 3020. Hodnoty emisí získané z analyzátoru ABB, zařízení poskytlo již v jednotkách mg/m_N³. Nebylo tedy nutné hodnoty přepočítávat z jednotek ppm na mg/m_N³, jak tomu bylo v případě použití analyzátoru Siemens Ultramat 23 při zkouškách hořáku ZPH.

K vyhodnocení emisí NO_x bylo v tomto případě nezbytné vyjádřit množství NO jako ekvivalentní složku NO₂, tedy NO_x. Výpočet byl proveden dle rovnice [49]:

$$[NO_2] \frac{mg}{m_{N^3}} = [NO] \frac{mg}{m_{N^3}} \cdot \frac{m_{NO_2}}{m_{NO}} = [NO] \frac{mg}{m_{N^3}} \cdot 1,533 \quad (22)$$

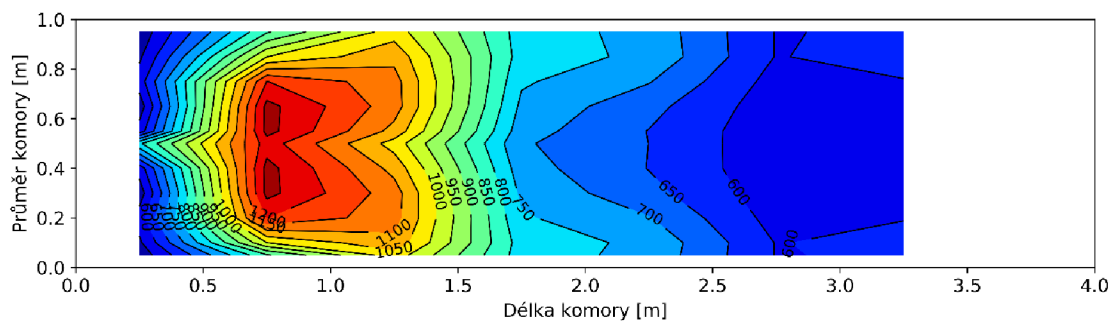
10.6.1 Teploty v plameni

Teploty v plameni byly v tomto případě měřeny pouze sedmi termočlánky, umístěnými v inspekčních otvorech, počínaje první sekcí ze strany hořáku. Data byla měřena pro každou pozici od 0,05 m do 0,5 m, stejně jako tomu bylo u hořáku ZPH.

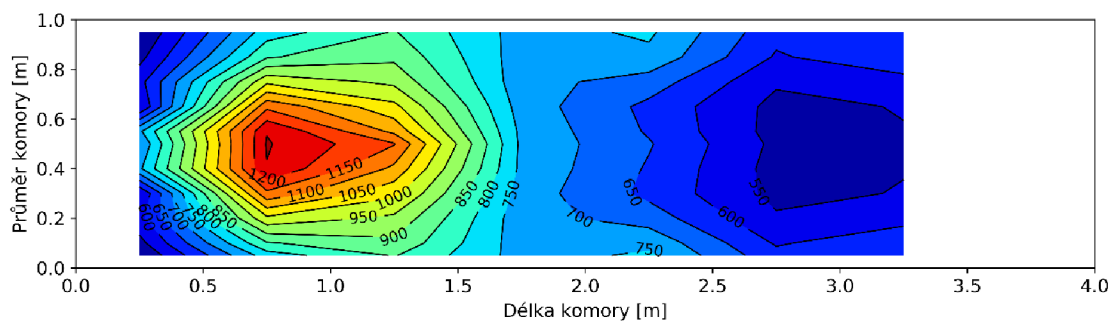
V případě spalování zemního plynu na hořáku LHP bez příměsí inertů vzniká širší plamen ve vzdálenosti 0,75 m od ústí hořáku (Obr. 30). Stěny komory jsou v tomto případně výrazněji ovlivněny tepelnými toky, ve srovnání se spalováním čistého zemního plynu na hořáku ZPH (Obr. 22). U všech testovaných konfigurací na hořáku LHP dochází k výraznému posunutí ohniska

vyhoření paliva do druhé sekce spalovací komory, tedy do vzdálenosti 0,75 m od ústní hořáku. Plamen je u ústí značně podchlazen, a tím není reakce v první sekci dostatečně intenzivní. V případě přidání průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 dochází k zúžení plamene a rychlému vyhoření paliva ve směru osy hoření. Jak lze vidět na Obr. 31, tepelná oblast nad 1000°C je v porovnání se spalováním čistého plynu poměrně malá a teplotní špičky o teplotách nad 1200°C jsou koncentrovány na malém území ve středu plamene. Podchlazení plamene přispívá ke snížení tvorby oxidů dusíku.

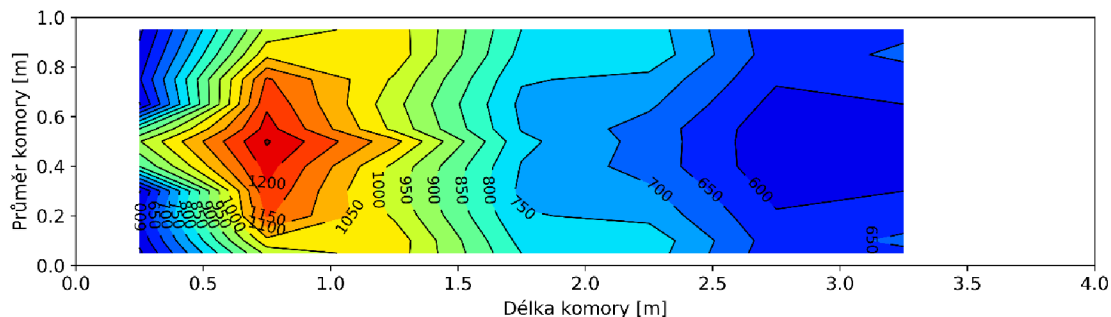
Zvýšení průtoku dusíku na $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ způsobuje rozšíření a protažení plamene při zachování minimálního rozšíření oblasti teplotních špiček nad 1200°C . Na Obr. 32 lze vidět hvězdicovitý tvar vzniklého teplotního pole, které zasahuje svým charakterem až do poloviny spalovací komory. Teplotní gradient této části je po délce komory mírnější. V druhé polovině komory (od 1,75 m) je teplotní pole srovnatelné s polem vzniklým při spalování čistého zemního plynu. Výstupní teplota spalin odpovídá 600°C . Vzhledem k naměřeným nulovým emisím CO lze konstatovat, že zvolené nastavení přispívá ke správnému promíchání paliva a vzduchu, a tím k jeho dokonalému spálení.



Obr. 30 Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - $0 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 , $0 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2



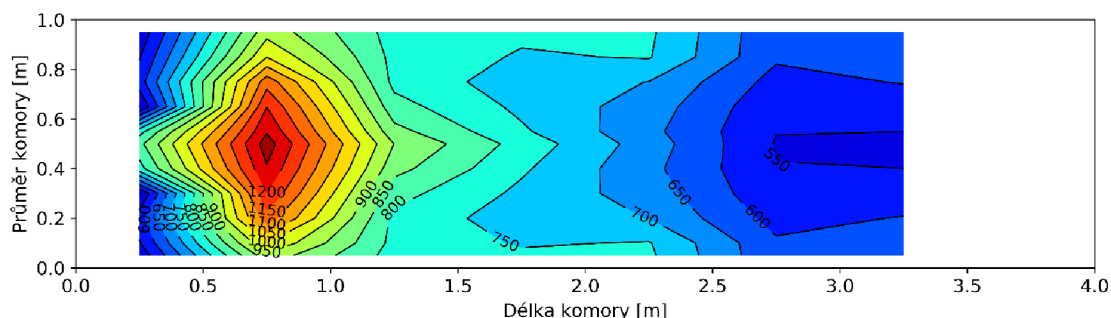
Obr. 31 Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 , $0 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2



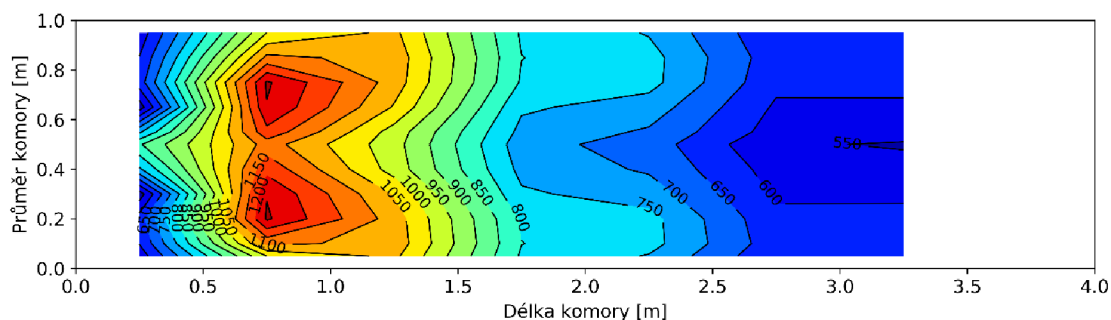
Obr. 32 Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - $80 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $0 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

Při průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$ je plamen výrazně zkrácený a naopak rovnoměrně rozšířený v radiálním směru vůči stěnám komory. Dle Obr. 33 dochází k rychlému vyhoření paliva v přímém okolí jádra plamene, které je situováno ve vzdálenosti $0,75 \text{ m}$ od ústí hořáku. Situaci také odpovídá nastupující rychlý teplotní spád, na jehož konci je teplota spalin 550 °C . Teploty ovlivňující stěny komory nejsou příliš výrazné. Při aktuálním nastavení spalovacího procesu byly vlivem dostatečného podchlazení plamene sníženy koncentrace oxidů dusíku na splňující limitní hodnoty, při současných nulových emisích CO, díky úplnému spálení paliva.

Zvýšení průtoku na $80 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$ přispívá k prodloužení jádra plamene a jeho rozdělení do dvou teplotních polí o maximální teplotě 1289 °C , viz. Obr. 34. Tepelná oblast se v rovině jádra plamene rozpíná po celé šíři komory a pokračuje ve tvaru pravidelných vlnoploch směrem ke spalinovodu. Největší tepelné pole, mající významný vliv na stěny komory, se rozprostírá na úrovni její druhé a třetí sekce, tj. v úseku $0,75\text{--}1,25 \text{ m}$ od ústí. Teploty zmíněného pole se pohybují v rozmezí $1000\text{--}1100 \text{ °C}$. Ačkoliv dochází k výraznému přestupu tepla do stěn komory vlivem neúplného spálení paliva, je produkce emisí CO poměrně velká.



Obr. 33 Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $40 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$



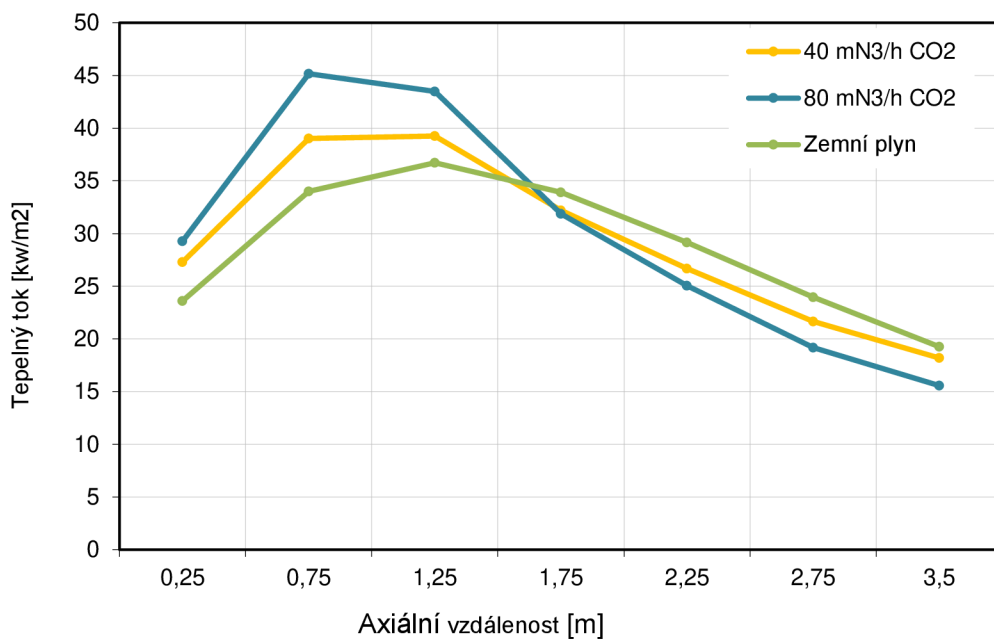
Obr. 34 Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - $0 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$, $80 \text{ m}_N^3/\text{h CO}_2$

10.6.2 Tepelné toky

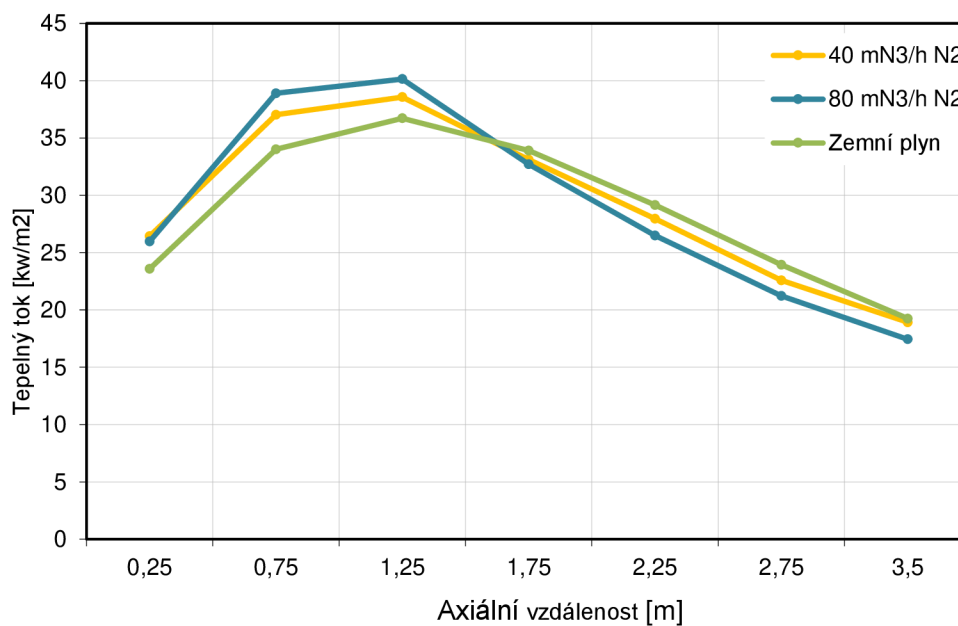
U všech testovaných konfigurací na hořáku LPH došlo k výraznému posunutí jádra plamene do úrovně 0,75 m, tj. druhé sekce spalovacího prostoru. Tepelné toky tímto vlivem působí nejvýznamněji na stěny komory od vzdálenosti 0,75 m do 1,25 m. Během spalování čistého zemního plynu bylo dosaženo maximální hodnoty tepelného toku $36,7 \text{ kW/m}^2$, a to ve třetí sekci spalovacího prostoru. Přidání oxidu uhličitého o průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ mělo za důsledek zvýšení tepelného toku předaného stěnám, a také jeho rovnoměrné šíření hranice maximálních hodnot ve druhé a třetí části komory, jenž je zobrazeno na Obr. 35 .

Navýšení průtoku oxidu uhličitého o dalších $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ vedlo k výraznému rozšíření teplotních polí druhé a třetí sekce spalovací komory, a tím i k výraznějšímu odběru tepla stěnami. Je zde vidět patrný posun maximálního tepelného toku blíže k hořáku do vzdálenosti 0,75 m. Maximální tepelný tok byl spočítán na $45,17 \text{ kW/m}^2$. Průměrný tepelný výkon tak vzrostl o $7,7 \text{ kW}$ z původní hodnoty tepelného výkonu spalovaného zemního plynu.

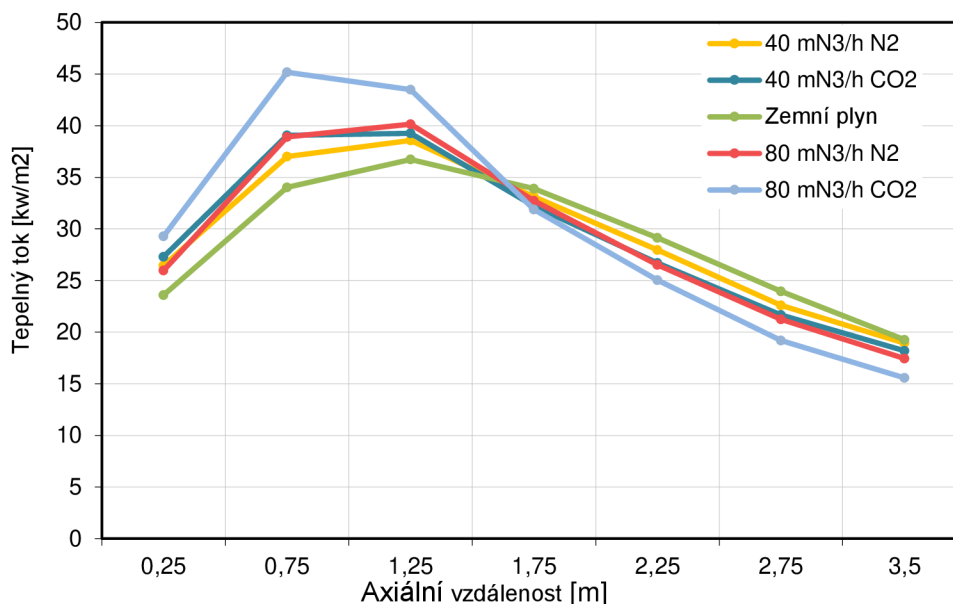
Křivky na Obr. 36 vykreslují průběhy tepelných toků po aplikování inertního plynu N_2 . Charakter tepelných toků po délce komory je v obou případech průtoků N_2 téměř totožný s bodem maxima ve vzdálenosti 1,25 m. Přidání dusíku o průtoku $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ vedlo k navýšení špičky tepelného toku z původních $36,7 \text{ kW/m}^2$ (základní konfigurace) na $38,56 \text{ kW/m}^2$. Nastupující pokles hodnot tepelných toků směrem ke spalínovodu je téměř shodný s poklesem tepelných toků ze spalování čistého zemního plynu. Další navyšování inertního plynu vedlo k mírnému nárůstu hodnot tepelných toků opět v druhé a třetí sekci komory s tokovým maximem ve $40,14 \text{ kW/m}^2$. Výraznější ochlazení plamene inertním plynem však přispělo k tomu, že je celkový tepelný výkon předaný do stěn komory v porovnání s nižším průtokem $40 \text{ m}_N^3/\text{h N}_2$ menší.



Obr. 35 Hořák LPH: tepelné toky CO₂



Obr. 36 Hořák LPH: tepelné toky N₂



Obr. 37 Hořák LPH: Tepelné toky všech testovaných konfigurací

Palivo	Tepelný výkon [kW]	Termická účinnost [%]
Zemní plyn	331,9	66,1
ZP + 40 mN ³ /h N ₂	337	67,2
ZP + 80 mN ³ /h N ₂	332,5	66,5
ZP + 40 mN ³ /h CO ₂	335,3	67
ZP + 80 mN ³ /h CO ₂	339,6	67,8

Tab. 6 Hořák LPH: tepelný výkon a termická účinnost

10.6.3 Měření tepelných toků radiační sondou

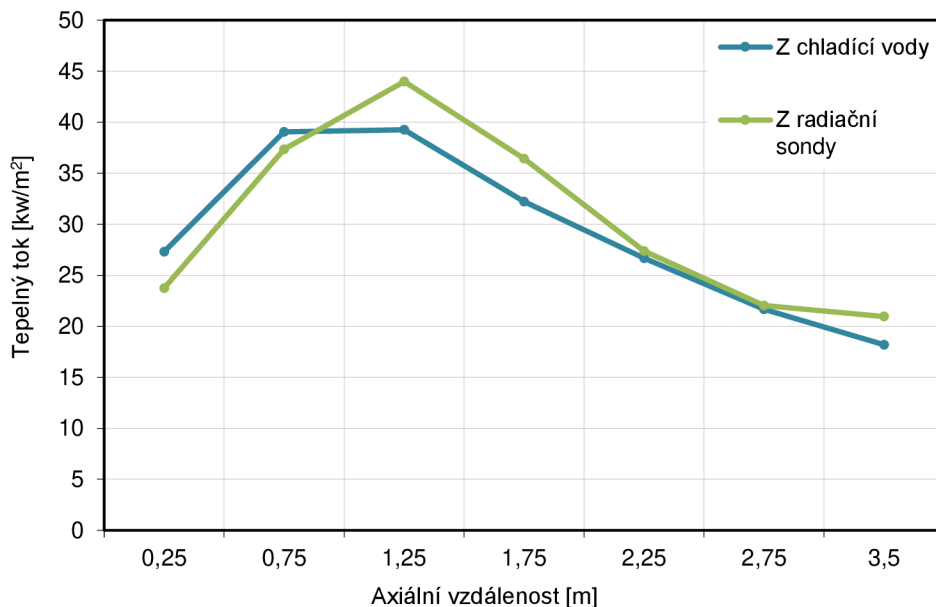
Hodnoty tepelných toků lze získat pomocí dvou hlavních metod – přímé a nepřímé. Nepřímou metodou lze vypočítat tepelné toky z naměřených hodnot chladicí vody. Pro výpočet jsou potřebné hodnoty průtoků a vstupních a výstupních teplot chladicí vody, díky kterým lze získat tepelný tok pro každou ze sedmi chladících sekcí.

Druhým způsobem je přímé měření radiační sondou uvnitř komory pomocí inspekčních otvorů, které jsou umístěny v každé sekci komory. Vysvětlení principu radiační sondy je připomenuto v kapitole 7.1.

Na Obr. 38 lze vidět charakteristiky tepelných toků získaných pro každou z metod v průběhu spalování zemního plynu s příměsí $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ oxidu uhličitého. Jde si povšimnout, že i přes to, že se jedná o stejnou konfiguraci spalovacího procesu, jsou křivky tepelných toků nepatrně odlišné. Největší diference získaných hodnot nastává ve vzdálenosti 1,25 m od ústí hořáku. Zatím co nejvyšší hodnota získaná chladicí vodou byla vypočtena na $39,26 \text{ kW/m}^2$, maximální hodnota získaná radiační sondou byla $43,98 \text{ kW/m}^2$. Celkový rozdíl tepelných toků v tomto bodě tedy představuje $4,72 \text{ kW/m}^2$. Hodnoty, vypočtené a naměřené pro každou sekci komory, jsou uvedeny v Tab. 7.

Nejenom díky větší citlivosti radiační sondy byly v oblastech špiček tepelných toků naměřeny hodnoty maxima o něco vyšší, než jsou hodnoty vycházející z vlastností chladicí vody. Výsledky z měření radiační sondou mohou být odlišné z následujících důvodů:

- Radiační sonda měří hodnoty tepelných toků bodově vždy na jednom místě, určeném umístěním inspekčního otvoru.
- K odlišným hodnotám může docházet díky rozdílnosti v emisivitě povrchu radiační sondy a teplosměnných ploch komory.
- Vzhledem k umístění sondy uvnitř spalovací komory, v průběhu měření, může dojít k ovlivnění snímače plamenem.



Obr. 38 Hořák LPH: Vliv volby metody měření tepelných toků - $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2

Sekce	Vzdálenost od ústí hořáku [m]	Tepelný tok [kW/m ²]		Rozdíl [kW/m ²]	Rozdíl [%]
		Chladicí voda	Radiační sonda		
1	0,25	27,30	23,74	3,56	13
2	0,75	39,04	37,34	1,7	4,4
3	1,25	39,26	43,98	4,72	10,7
4	1,75	32,21	36,42	4,21	11,6
5	2,25	26,68	27,38	0,7	2,6
6	2,75	21,66	22,02	0,36	1,6
7	3,5	18,19	20,95	2,76	13,2

Tab. 7 Hodnoty tepelných toků získaných přímou a nepřímou metodou

10.6.4 Emise a charakteristika plamene

Při spalování čistého zemního plynu na hořáku LPH byla vidět velká změna v charakteru plamene ve srovnání se spalováním na hořáku ZPH, jenž lze potvrdit i srovnáním teplotních polí na Obr. 22 a Obr. 30. Délka plamene byla 2,5 m. Ve směru osy šířky spalovací komory se plamen rozpínal až do velikosti 1 m. Bylo patrné, že došlo nedokonalému promísení paliva se vzduchem, což bylo pravděpodobně způsobeno nízkou rychlostí paliva vystupujícího z trysek hořákové hlavy. Barva plamene byla výrazně žlutá.

Velká změna ve zbarvení plamene nastala přidáním průtoku 40 m³/h N₂. Výrazně žlutý plamen byl vlivem inertu změněn v plamen modré barvy se zachováním výrazně žlutých konců plamene. Plamen se zkrátil na velikost 1,5 m, ale šířka zůstala nezměněna. Přidáním inertního plynu do paliva došlo ke zvýšení rychlosti paliva od hořákové hlavy, a tím k ještě většímu zlepšení stability plamene. Mírným ochlazením plamene došlo k poklesu maximální hodnoty spalin z původních 669 °C na 662 °C. Maximální teplota spalin při zvýšení průtoku N₂ na 80 m³/h odpovídala 650 °C. Zvýšením množství inertního plynu došlo, při zachování šířky jednoho metru, k ještě většímu zkrácení plamene na délku 1,25 m. Barva jádra plamene zůstala stále modrá, avšak konce plamene se zbarvily do fialova.

Během přidání oxidu uhličitého o průtoku 40 m³/h do paliva bylo možné sledovat obdobný trend ve zbarvení plamene jako v případě spalování paliva s množstvím 40 m³/h N₂. Plamen byl zkrácený a stabilní v celém svém rozsahu. Maximální hodnota spalin klesla na hodnotu 647 °C. Po dosažení průtoku 80 m³/h CO₂ v palivu teplota spalin poklesla až na hodnotu 605 °C. Ze všech konfigurací testovaných na LPH hořáku bylo v tomto případě dosaženo největšího poklesu teploty spalin z původní hodnoty 669 °C. Nicméně maximální teplotní difference spalin z procesu spalování na hořáku LPH není tak velká ve srovnání s diferencí získanou během procesu spalování

v případě hořáku ZPH. Navýšení průtoku CO_2 na $80 \text{ mN}^3/\text{h}$ způsobilo výrazné zvíření plamene, přesto plamen zůstal dostatečně stabilní. V druhé a třetí sekci komory (tj. ve vzdálenosti 0,75–1,25 m) byl plamen stále široký (1 m) a velice ostrý. Délka plamene odpovídala 1,25 m a jeho zabarvení bylo modré v celé míře.

Spalování zemního plynu na hořáku LPH mělo za následek vznik $123 \text{ mg}/\text{mN}^3$ emisí oxidu uhelnatého a $105 \text{ mg}/\text{mN}^3$ oxidů dusíku. Bohužel ani jedna ze získaných hodnot nesplňovala limitní požadavky stanovené zákonem. Při spalovacích zkouškách s průtokem $40 \text{ mN}^3/\text{h}$ N_2 byly celkové emise redukovány na hodnoty nacházející se v těsné blízkosti emisních limit. Emise oxidu uhelnatého odpovídaly hodnotě $51 \text{ mg}/\text{mN}^3$, která se nachází těsně za hranicí specifikovaných limitních hodnot pro koncentraci CO ve spalinách. Koncentrace oxidů dusíku byly v tomto případě sníženy o 26 % na hodnotu $78 \text{ mg}/\text{mN}^3$. NO_x tyto emisní limity již splňují. Zvýšení průtoku inertního plynu na $80 \text{ mN}^3/\text{h}$ N_2 přispělo k lepšímu promíchání paliva se spalovacím vzduchem. Došlo tak k dokonalému spálení paliva, jenž se projevilo na výstupních emisích CO, které byly nulové. Vzhledem k tomu, že samotný dusík přítomný v palivu může v oblasti plamene reagovat s volným kyslíkem za vzniku dalších NO_x , je možné, že i když došlo navýšením průtoku inertního plynu k většímu ochlazení plamene, hodnota emisí NO_x ve spalinách zůstala téměř nezměněna.

Spalování paliva o průtoku $40 \text{ mN}^3/\text{h}$ CO_2 mělo na tvorbu emisí období vliv jako v případě spalování za přítomnosti $80 \text{ mN}^3/\text{h}$ N_2 . Emise CO, vlivem dokonalého spálení paliva, byly opět nulové a koncentrace emisí NO_x klesla o 46 %, a to na hodnotu $57 \text{ mg}/\text{mN}^3$. Ochuzení paliva přidáním CO_2 o průtoku $80 \text{ mN}^3/\text{h}$ bylo již natolik velké, že množství CO ve spalinách stále neodpovídalo limitním hodnotám. Koncentrace CO byla snížena z původních $123 \text{ mg}/\text{mN}^3$ (v případě spalování samotného zemního plynu) na $115 \text{ mg}/\text{mN}^3$. Zároveň emise oxidů dusíku byly sníženy na hodnotu $37 \text{ mg}/\text{mN}^3$, jenž odpovídá redukcí emisí NO_x o 65 %. Důležité parametry jsou shrnuty v Tab. 8.

Specifikace	Jednotky	Zemní plyn	Zemní plyn + inertní složka			
			N_2	CO_2		
Průtok plynu	mN^3/h	27	40	80	40	80
Průměrný výkon hořáku	kW	502	503	501	500	498
Délka plamene	m	2,5	1,5	1,25	1,25	1,25
Průměr plamene	m	1	1	1	1	1
Stabilita plamene	-	stabilní	stabilní	stabilní	stabilní	stabilní
Průměrná teplota spalin	$^\circ\text{C}$	667,7	661,3	648,8	646,6	553,3
NO_x	mg/mN^3	105	78	77	57	37
CO	mg/mN^3	123	51	0	0	115

Tab. 8 Hořák LPH: výsledné emise a charakteristiky procesu

Závěr

V rozsahu zkoušek prováděných na hořácích ZHP a LHP byla vyhodnocena data, získaná z průběhu spalování zemního plynu, a poté z průběhu spalování paliva obsahujícího různá množství inertních plynů CO_2 a N_2 .

Po aplikování průtoků inertních plynů do procesu spalování bylo jako první možné zpozorovat změny v charakteru plamene. Ve všech konfiguracích došlo k výraznému zkrácení plamene, a tím k posunutí působení jádra plamene blíže k ústí hořáku. Tento trend měl také vliv na změnu v působení tepelných toků do stěn spalovací komory a celkový předaný tepelný výkon. Přítomnost inertních plynů měla také jasný vliv na teplotu plamene. V závislosti na konkrétním množství plynů N_2 a CO_2 docházelo ke snižování teplotních špiček a teplot výstupních spalin. Ve vzájemném srovnání této dvojice plynů bylo získáno vždy většího ochlazení plamene přidáním průtoku oxidu uhličitého do paliva.

Největší a poměrně důležitý vliv přítomnosti inertních plynů v palivu se projevil na tvorbě emisí, které jsou stále více sledovanou součástí spalovacích procesů. Pro spalování plynných paliv ve stacionárních zdrojích jsou specifikovány emisní limity, dle zákona 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Dovolené koncentrace, v našem případě sledovaných emisí NO_x a CO , jsou dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. stanoveny na 100 mg/m_N^3 NO_x a 50 mg/m_N^3 CO , pro celkový jmenovitý tepelný příkon 0,3–1 MW. V průběhu spalování samostatného zemního plynu byly hodnoty vzniklých emisí NO_x a CO u obou hořáků na hranici a někdy až za hranicí povolených limit. U obou zástupců inertních plynů došlo ve všech konfiguracích spalování k redukci emisí NO_x ve větší či menší míře ve srovnání se vzniklými emisemi z procesu spalování čistého zemního plynu. Největšího poklesu emisí NO_x (o 70 %) bylo dosaženo přidáním oxidu uhličitého o průtoku $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ do paliva spalovaného během testování hořáku ZPH. Hodnota odpovídala vzniklým 29 mg/m_N^3 NO_x . Redukovaná tvorba NO_x pozitivně koresponduje s produkcí emisí CO , které poklesly na limitami povolené množství $5 \text{ m}_N^3/\text{h}$. Přestože hořák ZPH není primárně konstruován pro spalování nízko – výhřevných paliv, byly výsledky spalování v případě některých konfigurací překvapivě příznivé.

Na hodnotách spalovacích zkoušek probíhajících na hořáku LPH, který je svou konstrukcí přizpůsoben spalování nízko – výhřevných paliv, lze ukázat vliv geometrie hořáku na distribuci a promísení paliva se spalovacím vzduchem. Pouze na tomto hořáku bylo při průtocích $80 \text{ m}_N^3/\text{h}$ N_2 a $40 \text{ m}_N^3/\text{h}$ CO_2 dosaženo dokonalého promísení paliva se spalovacím vzduchem, a tím i úplného spálení paliva. Toto dokonalé spálení se projevilo na nulové tvorbě emisí CO za současného dostatečného ochlazení plamene inertním plynem, jenž mělo vliv na nízké emise NO_x . Ačkoliv se tento hořák vykazuje nižší termickou účinností, jeho působení na celkový proces spalování nízko – výhřevných paliv je přínosné.

Spalování paliv obsahující inertní plyny má velký potenciál. Při použití správné geometrie hořáku (nejlépe konstruované pro spalování nízko – výhřevných paliv) a správného nastavení distribuce paliva a spalovacího vzduchu, může být dosaženo kvalitního spalovacího procesu s vysokou termickou účinností a nízkými emisemi CO a NO_x .

Seznam použité literatury

- [1] Zemní plyn - těžba, vlastnosti a rozdělení. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni/>
- [2] natural gas | Definition, Discovery, Reserves, & Facts. *Encyclopedia Britannica* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/natural-gas>
- [3] *Zemní plyn* [online]. 2019 [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zemn%C3%AD_plyn&oldid=17243978
- [4] *Zemní plyn | Vítejte na Zemi* [online]. [vid. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=zemni_plyn&site=energie
- [5] *nitrogen | Facts, Definition, Uses, Properties, & Discovery | Britannica.com* [online]. [vid. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/nitrogen>
- [6] DVOŘÁKOVÁ, Ludmila, Zdena POJEDNÁ, Jan HAMERNÍK, Miroslav HOLUB, Daniel KRÁTKÝ, Radek KŘEPELKA, Pavel ROHAN a Vít TUČEK. *Dusík - Řada: informace, normy, předpisy* [online]. 2014. Dostupné z: http://www.catp.cz/publikace2.php?download=CATP_1_14_dusik.pdf. [vid. 2019-05-19]
- [7] Oxid uhličitý | *irz.cenia.cz. Integrovaný registr znečišťování* [online]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhlicity.pdf
- [8] Oxid uhličitý a možnosti jeho využití I. *TZB-info* [online]. [vid. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/8492-oxid-uhlicity-a-moznosti-jeho-vyuziti-i>
- [9] KUTĚJ, Petr a Jiří HANZAL. *Oxid uhličitý - Řada: informace, normy, předpisy*. B.m.: Česká asociace technických plynů. 2002
- [10] BAUKAL, Charles E. *Industrial Burners Handbook*. B.m.: CRC Press, 2003. ISBN 978-0-8493-1386-8.
- [11] TÁBORSKÝ, Miroslav. *Výpočtová predikce charakteristických parametrů procesu spalování*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [12] HUDÁK, Igor. *Vliv inertních plynů na charakteristické parametry spalování*. Brno, 2016. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [13] INCROPERA, Frank P., David P. DEWITT, Theodore L. BERGMAN a Adrienne S. LAVINE. *Introduction to Heat Transfer*. B.m.: John Wiley & Sons, 2011. 6. ISBN 978-0-470-50196-2.
- [14] SERTH, Robert W. a Thomas G. LESTINA. *Process Heat Transfer - Principles, Applications and Rules of Thumb (2nd Edition)* [online]. nedatováno. ISSN 978-0-12-

- 397195-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPHTPART5/process-heat-transfer/process-heat-transfer>
- [15] BAUKAL, C.E. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. B.m.: CRC Press, 2000. Industrial Combustion. ISBN 978-1-4200-3975-7.
- [16] SVOBODA, Alexandr. *Plynárenská příručka: Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*. Praha: GAS s.r.o., 1997. ISBN 80-902339-6-1.
- [17] BAUKAL, Charles E. *Industrial Combustion Pollution and Control*. 2004. ISBN 0-8247-4694-5.
- [18] BAUKAL, Charles E. *The John Zink Combustion Handbook*. United States of America: CRC Press, nedatováno.
- [19] SKRYJA, Pavel. *Vliv konstrukčních parametrů návrhu procesního hořáku na stabilitu a parametry spalování*. Brno, 2016. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [20] Přizemní ozón a fotochemický smog. *Vítejte na Zemi...* [online]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=prizemni_ozon_a_fotochemicky_smog&site=doprava
- [21] BAUKAL, Charles E. *Oxygen-Enhanced Combustion*. United States of America: CRC Press, 1998. ISBN 0-8493-1695-2.
- [22] Výkladový slovník enviromentálních výrazů - Fotochemický smog. *Envi Web* [online]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/eslovník/96>
- [23] *Oxid dusný* | irz.cenia.cz [online]. [vid. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/76>
- [24] BĚLOHRADSKÝ, Petr. *Metody pro určování charakteristických parametrů procesů spalování na bázi experimentů a modelování*. Brno, 2010. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [25] PULVERIZER PERFORMANCE AND NOX EMISSIONS. *Innovative Combustion Technologies* [online]. Dostupné z: https://www.innovativecombustion.com/pulverizer-performance-and-nox-emissions/?fbclid=IwAR0EgFC3f7-yJPqzUy_AOkMAe9vPDM0PvWHTK8LGkY5W7su1kuJcK0ypmXQ
- [26] Oxidy síry | irz.cenia.cz. *Integrovaný registr znečišťování* [online]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_siry.pdf
- [27] Informace o látkách ohlašovaných do IRZ - Oxid uhelnatý (CO). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/20>

- [28] BELLOFIORE, Alessandro. *Experimental and numerical study of liquid jets injected in high density air crossflow*. B.m., 2006. University of Studie of Naples Federico II, Dpt. of Chemical Engineering.
- [29] WWW.FTSUN.CZ, FT Sun s r o-info@ftsun cz-. převod jednotek. *Česká bioplynová asociace* [online]. [vid. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/poradna/prevod-jednotek.html>
- [30] *How do I convert ppm to mg/m3 and ppb to µg/m3?* [online]. [vid. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.markes.com/Resources/Frequently-asked-questions/How-do-I-convert-units.aspx>
- [31] AION CS. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanove... *Zákony pro lidi* [online]. [vid. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [32] BAUKAL, Charles E. *Industrial combustion testing*. B.m.: CRC Press, 2011.
- [33] KERLING, Thomas W. a Mitchell JOHNSON. *Practical Thermocouple Thermometry* [online]. 2nd Edition. 2012. ISBN 978-1-937560-27-0. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPTTE0002/practical-thermocouple/practical-thermocouple>
- [34] Industrial monitoring and control / heat flux and heat transfer measurement. *Hukseflux Thermal Sensors* [online]. 2019. Dostupné z: https://www.hukseflux.com/applications/industrial-monitoring-and-control-heat-flux-and-heat-transfer-measurement?fbclid=IwAR2vpy-yDbe0QsId1p6KYBR9KAZ4_tvxQzkqpjRWhR_9x_29LsqUCnSwXxg
- [35] SANKAR, G., A. Chandrasekhara RAO, P. S. SESHADRI a K. R. BALASUBRAMANIAN. Techniques for measurement of heat flux in furnace waterwalls of boilers and prediction of heat flux – A review. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, **103**, 1470–1479. ISSN 1359-4311. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.013](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.013)
- [36] ROBERTSON, A. F. a T. J. OHLEMILLER. Low heat-flux measurements: Some precautions. *Fire Safety Journal* [online]. 1995, **25**(2), 109–124. ISSN 0379-7112. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/0379-7112\(95\)00036-4](https://doi.org/10.1016/0379-7112(95)00036-4)
- [37] VONDÁL, J. *Computational Modeling of Turbulent Swirling Difusion Flames*. Brno, 2012. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering.
- [38] Thermopile. *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2019. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermopile?fbclid=IwAR0to664SXWp2m1HLOSvfHHV GnUat06DBkpyGNpyanVm18lrMYXWAGW-YoA>

- [39] SBG01 heat flux meter. *Hukseflux* [online]. [vid. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-meters/sbg01-heat-flux-meter>
- [40] *FURNACES* [online]. [vid. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/796/>
- [41] JEGLA, Zdeněk. Navrhování spalovacích procesních a energetických zařízení I.: Typy a provedení procesních pecí a kotlů. In: . Ústav procesního inženýrství. ak.rok 2018.
- [42] SHIRES, G.L. FURNACES. *Thermopedia* [online]. 13. duben 2019 [vid. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/796/>
- [43] JEGLA, Zdeněk. Stanovení reálného tepelného zatížení teplosměnných ploch ve spalovacích komorách. 2019, **XXIX**(1).
- [44] NEJEZCHLEB, Radek. *Spalování kapalných paliv z obnovitelných zdrojů*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [45] BAUKAL, C.E. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. United States of America: CRC Press, 2000. Industrial Combustion. ISBN 978-1-4200-3975-7.
- [46] SHIRES, G.L. Furnaces. *Thermopedia* [online]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/796/>
- [47] HUDÁK, Igor. *Charakteristické parametry procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [48] SKRYJA, P., I. HUDÁK, P. BĚLOHRADSKÝ a P. STEHLÍK. Hořáková hlava na nízkovýhřevná paliva. 30593. Brno.
- [49] LAXA, Václav. *Technická ekologie: Stanovení emisních koncentrací ve spalinách plynového hořáku*. Plzeň: Západočeská Univerzita V Plzni. 2006.

Seznam obrázků

Obr. 1	Radiační energie absorbována, odražena a přenesena materiálem [10]	17
Obr. 2	Emisní znečištění ovzduší [17].....	22
Obr. 3	Závislost vzniku termického NO _x na přebytku spalovacího vzduchu a jeho teplotě [24] 24	
Obr. 4	Závislost tvorby emisí CO a NO _x na teplotě procesu spalování [28].....	28
Obr. 5	Schéma termočlánku [33].....	30
Obr. 6	Schématické průřezy dvou typů zařízení, sloužících k měření tepelných toků [36]	33
Obr. 7	Model sondy použitý v experimentální části [39]	33
Obr. 8	Schéma uspořádání pece.....	35
Obr. 9	Schémata tří základních uspořádání trubek v procesních pecích [42].....	35
Obr. 10	Tepelná bilance procesní pece [42]	36
Obr. 11	Schéma hořáku s přirozeným tahem [45]	39
Obr. 12	Zjednodušené schéma ejekčního typu hořáku [45].....	40
Obr. 13	Zjednodušené schéma difúzního typu hořáku [45].....	41
Obr. 14	Zjednodušené schéma hořáku s částečně přemísenou směsí [45].....	41
Obr. 15	Schéma hořáku se stupňovitým přívodem vzduchu [45].....	42
Obr. 16	Schéma hořáku se stupňovitým přívodem paliva [45].....	42
Obr. 18	Schématické znázornění cirkulace vody v separátní sekci spalovací komory [47]	43
Obr. 19	Technologické schéma zkušebny [12]	44
Obr. 20	ZPH hořák – 3D model	45
Obr. 21	LPH hořák – 3D model	46
Obr. 22	Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	49
Obr. 23	Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 0 m _N ³ /h N ₂ , 40 m _N ³ /h CO ₂	49
Obr. 24	Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 0 m _N ³ /h N ₂ , 80 m _N ³ /h CO ₂	49
Obr. 25	Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 40 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	50
Obr. 26	Hořák ZPH: Rozložení teplotních polí - 80 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	50
Obr. 27	Hořák ZPH: tepelné toky CO ₂	52
Obr. 28	Hořák ZPH: tepelné toky N ₂	52
Obr. 29	Hořák ZPH: tepelné toky všech testovaných konfigurací.....	53
Obr. 30	Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - 0 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	56
Obr. 31	Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - 40 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	56
Obr. 32	Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - 80 m _N ³ /h N ₂ , 0 m _N ³ /h CO ₂	57
Obr. 33	Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - 0 m _N ³ /h N ₂ , 40 m _N ³ /h CO ₂	57
Obr. 34	Hořák LPH: Rozložení teplotních polí - 0 m _N ³ /h N ₂ , 80 m _N ³ /h CO ₂	58
Obr. 35	Hořák LPH: tepelné toky CO ₂	59
Obr. 36	Hořák LPH: tepelné toky N ₂	59
Obr. 37	Hořák LPH: Tepelné toky všech testovaných konfigurací	60
Obr. 38	Hořák LPH: Vliv volby metody měření tepelných toků - 40 m _N ³ /h CO ₂	61

Seznam zkratk a symbolů

ZP	Zemní plyn
α	Přebytek spalovacího vzduchu
ppm	Parts per milion
TZL	Tuhé znečišťující látky
Sb.	Sbírký
Obr.	Obrázek
Tab.	Tabulka