



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

STUDIE ROZDÍLU SPALOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU A VODÍKU

STUDY OF THE DIFFERENCE BETWEEN NATURAL GAS AND HYDROGEN COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Josef Winter

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Josef Winter**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Studie rozdílu spalování zemního plynu a vodíku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodík se v některých procesech nechová stejně jako ostatní plyny. Jak se změní rychlost spalování, sálavost plamene, přestup tepla, vlastnosti spalin, když začneme míchat zemní plyn s vodíkem? Bude možné ve stávajících spalovacích komorách spalovat čistý vodík? Jaké bude třeba provést úpravy? Na tyto otázky by měl odpovědět student při zpravování své závěrečné práce.

Cíle diplomové práce:

- detailní popis vlastností vodíku a zemního plynu (metanu) včetně vzájemného porovnání,
- vliv vlastností plynů na režim spalování a vlastnosti plamene,
- posouzení vlivu sálavosti plamene na konstrukci ohnišť parních kotlů.

Seznam doporučené literatury:

INCROPERA, F. P., DeWitt, D. P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York, 1990.

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá spalováním zemního plynu s příměsí vodíku v určitých objemových koncentracích. Byla sledována změna fyzikálních parametrů vlivem přidáváním vodíku, který se svými vlastnostmi odlišuje od zemního plynu. Práce je rozdělena na řešeršní část, kdy jsou popsány vlastnosti zemního plynu a vodíku včetně vzájemného porovnání, vlivy vlastností plynů na plamen, emise nebo teplotu. V druhé části byl proveden výpočet pro zvolené parametry ohniště a sledovány změny fyzikálních vlastností vlivem přidavku vodíku a shrnuty poznatky, které bude nutné vzít v úvahu při konstrukci ohniště. Všechny provedené výpočty jsou uvedeny v přílohách.

Klíčová slova

Zemní plyn, vodík, spalování, emise, teplota, účinnost ohniště, sálavost plamene

ABSTRACT

This thesis deals with the combustion of natural gas with hydrogen in certain volumetric concentrations. The change in physical parameters due to the addition of hydrogen, which differs in its properties from natural gas, was studied. The thesis is divided into a research part, where the properties of natural gas and hydrogen are described, including a comparison with each other, the effects of gas properties on flame, emissions, or temperature. In the second part, a calculation for the fireplace with chosen dimensions was performed and the changes in physical properties due to the addition of hydrogen were observed and the findings are summarized, which will have to be considered in the design of the fireplace. All calculations are added to the appendices.

Key words

Natural gas, hydrogen, burning, emissions, temperature, efficiency of fireplace, radiance of flame

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WINTER, Josef. *Studie rozdílů spalování zemního plynu a vodíku* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148691>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že diplomovou práci na téma Studie rozdílu spalování zemního plynu a vodíku jsem vypracoval sám, dle svého vědomí a svědomí za pomoci svého vedoucího diplomové práce doc. Ing. Marka Baláše, PhD., spolu s materiály, které mi byly poskytnuty a které jsou uvedeny v závěru této práce v kapitole Zdroje.

V Brně dne 13.5.2023

Josef Winter

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Marku Balášovi, PhD. za cenné rady a připomínky, které vedly k obohacení a úspěšnému dokončení této práce. Poděkování také patří mým rodičům, kteří mě po celou dobu studia podporovali a umožnili mi studium na vysoké škole.

ÚVOD.....	10
1. Spalování plyných paliv	11
1.2 Plyná paliva	11
1.3 Charakteristika spalované směsi.....	13
1.3.1 Chudá směs	13
1.3.2 Bohatá směs.....	13
1.3.3 Stechiometrická směs.....	13
1.4 Teplota plamene	13
1.5 Radiace.....	14
1.6 Spalovací rychlost a rychlost plamene	14
2. Plynové hořáky.....	15
2.1 Vlivy ovlivňující konstrukci hořáků	16
2.2 Faktory ovlivňující přenos tepla	16
3. Zemní plyn.....	18
3.1 Druhy těženého zemního plynu.....	18
3.2 Využití zemního plynu.....	19
3.3 Cena zemního plynu	19
3.4 Těžba, zásoby zemního plynu a doprava	20
4. Vodík	23
4.1 Charakteristika vodíku	23
4.2 Kategorizace vodíku	23
4.2.1 Výroba modrého, zeleného, šedého vodíku a dalších.....	24
4.3 Výroba vodíku z fosilních paliv	25
4.3.1 Parciální oxidace.....	25
4.3.2 Parní reforming	26
4.3.3 Výroba vodíku zplyňováním uhlí.....	27
4.4 Výroba vodíku z OZ.....	27
4.4.1 Elektrolýza vody	27
4.5 Vodíková strategie ČR a Evropy [20].....	28
4.6 Skladování a doprava vodíku.....	30
5. Spalovací komora kotle.....	32
5.1 Vytyčení spalovací komory.....	32
6. Spalování zemního plynu s příměsí vodíku [30].....	33
6.1 Vliv přídavku vodíku na plamen	33
6.2 Vliv přídavku vodíku na spaliny.....	35

6.3 Vliv přídavku vodíku na přenos tepla a tepelný výkon.....	38
6.4 Vliv přídavku vodíku na spalovací rychlost	40
6.5 Shrnutí.....	41
7. Výpočet vlivu přídavku vodíku na tepelný výkon ohniště	42
7.1 Stechiometrie a výpočet pouze pro zemní plyn.....	42
7.2 Tepelné ztráty kotle a účinnost ohniště	45
7.3 Tepelný výpočet ohniště	45
7.3.1 Stanovení teploty nechlazeného plamene.....	48
7.3.2 Teplota na konci ohniště.....	48
7.4 Výpočet vlivu přídavku vodíku.....	50
ZÁVĚR.....	55
Zdroje.....	57
Seznam obrázků a grafů.....	63
Seznam tabulek.....	65
Seznam zkratk a symbolů	66
Seznam příloh	68

ÚVOD

Jedním z cílů současné energetiky je snaha snižovat spotřebu fosilních paliv a podporovat rozvoj obnovitelných zdrojů energie či alternativní zdroje. Působením mnoha vlivů dochází k enormnímu tlaku na značnou proměnu tohoto sektoru. Jako zdroj budoucnosti se jeví využití vodíku.

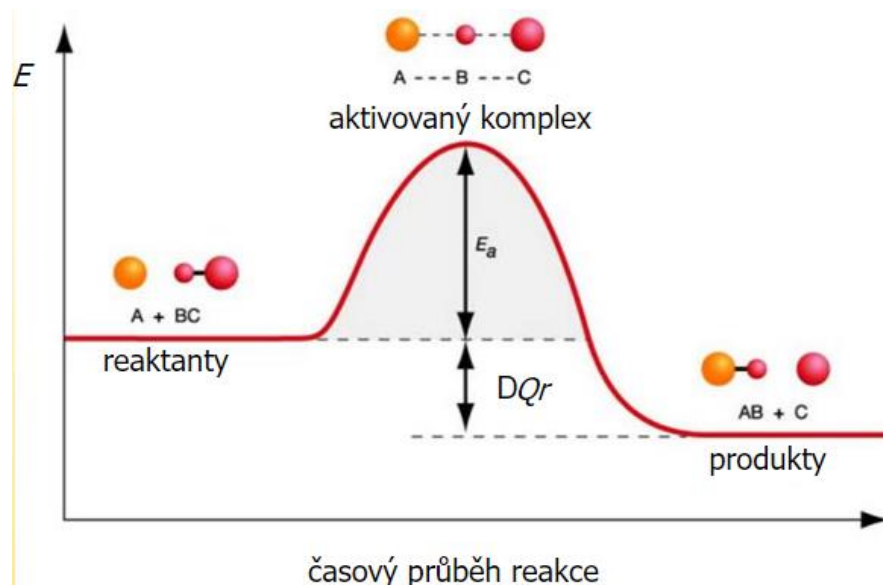
Vodík je součástí chemických provozů, ale v rozsáhlém energetickém měřítku prozatím nehraje velkou roli, protože se nejedná o klasické palivo, ale o nosič energie, který je nutné s určitými náklady vyrábět. Rozvíjející se vodíkové technologie jsou velmi čisté jako primární zdroje energie, které jsou využívány při výrobě vodíku. Dochází ke snížení emisní stopy, jak při výrobě, tak při samotném využívání. Vyrobený vodík lze následně přidávat do zemního plynu a spalovat v parním kotli.

V roce 2021 vláda ČR schválila vodíkovou strategii, která navazuje na evropskou vodíkovou strategii. Hlavními cíli je snižování emisí skleníkových plynů a podpora ekonomického růstu spojená s řadou projektů. Vodíková strategie je založena na čtyřech pilířích, které jsou výroba a využití nízkouhlíkového vodíku, doprava a skladování a rozvoj nových technologií, kdy tyto oblasti jsou vzájemně propojeny a vychází se z prognóz jednotlivých odvětvích, kde je předpoklad využití vodíku. Takovými oblastmi jsou automobilový průmysl, chemický průmysl, těžký průmysl, kde se předpokládá náhrada šedého vodíku, zemního plynu a uhlí. Co se týče výroby, jako perspektivní se jeví výroba elektrolýzou v jaderných elektrárnách. Technicky vyspělou a ekonomicky efektivní metodou je výroba vodíku z obnovitelných zdrojů energie.

Tato práce si klade za cíl popsat dopady přidavku vodíku do zemního plynu v určitých objemových koncentracích, neboť spalování samotného zemního plynu a následné míchání s vodíkem nese určitá specifika spojená s rychlostí spalování, sálavostí plamene, přestupem tepla či vlastnostmi spalin. Bude provedena podrobná rešeršní část, která se jednotlivými atributy zabývá. Ve výpočetní části se zprvu vypočte spalování samotného zemního plynu s uvažováním pouze metanu a následně výpočty jednotlivých přídavek v určitých objemových koncentracích. V závěru bude provedeno porovnání spalování samotného zemního plynu a spalování s přídávkem vodíku, na které parametry má vodík vliv, zdali vodík má vliv na výkon v ohništi a s čím bude nutné počítat s návrhem ohnišť kotlů.

1. Spalování plynných paliv

Co je to spalování? Rychlá chemická kombinace látky s kyslíkem za vzniku tepla a světla anebo rychlá oxidace generující teplo a světlo? Všeobecně spalování je fyzikálně chemický děj s uvolňováním tepla. Pokud se teplo uvolňuje, říkáme, že se jedná o exotermickou reakci viz. obr. 1. V opačném případě, kdy se teplo přivádí, mluvíme o endotermické reakci. Pokud zkoumáme proces spalování, díváme se na problém z hlediska statiky a dynamiky. Statika spalování při spalování zanedbává časový průběh a prostorové ohraničení neboli sleduje pouze počáteční a koncový stav. Vycházíme z hmotností bilance spalování nutné pro dodržení zákona zachování hmotnosti. U dynamiky spalování je vliv času a prostoru zahrnut. [1] Chemické reakce probíhají určitou rychlostí, která je závislá na některých faktorech, kterými se zabývá chemická kinetika. Mezi faktory ovlivňující rychlost zahrnujeme teplotu, koncentraci reagujících látek, tlak či přítomnost katalyzátorů. [2]



Obr.1 Profil obecné spalovací reakce [45]

Pracovními látkami spalovacího procesu jsou palivo, oksylichovadlo a následné produkty spalovacího pochodu. Palivo je jakákoliv hořlavá látka s dobrou výhřevností a oksylichovadlo je látka obsahující kyslík, v praxi se nejčastěji jedná o vzduch. [2]

Spalovací systém, který zajišťuje tvorbu spalování paliva se skládá z několika komponent. Jsou to [3]:

- hořáky – probíhá zde výše zmíněná reakce hoření
- spalovací komora – prostor, kde dochází ke spalování, přenosu a uvolňování tepla
- teplonosné médium – odvádí uvolněné teplo
- tepelné výměníky – odběr zbytkového tepla ze spalin
- kontrolní systémy – tlakoměry, průtokoměry, snímače teploty a plamene, atd ...

1.2 Plynná paliva

Pojmem plynné palivo lze chápat všechny plyny obsahující hořlavé složky jako je oxid uhelnatý (CO), vodík (H₂) a další plynné uhlovodíky. Výhodou spalování plynných paliv je nízká měrná emise znečišťujících látek (NO_x, SO₂), nízká měrná emise skleníkového plynu CO₂ či výroba elektrické energie s vysokou účinností. Bez ohledu na původ a výrobu, můžeme rozdělit topné plyny do čtyř kategorií podle výhřevnosti Q_i^r . [2]

- plyny nízko výhřevné ($Q_i^r < 8,35 \text{ MJ} \cdot \text{m}_n^{-3}$)
- plyny středně výhřevné ($Q_i^r = 8,35 - 12,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}_n^{-3}$)
- plyny velmi výhřevné ($Q_i^r = 12,5 - 21,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}_n^{-3}$)
- plyny velmi vysoce výhřevné ($Q_i^r > 21,5 \text{ MJ} \cdot \text{m}_n^{-3}$)

Mezi základní vlastnosti plynných paliv řadíme [2]:

- **Spalné teplo a výhřevnost (Q_s, Q_i^r):**
 - výhřevnost je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 m_n^3 paliva při ochlazení spalin na $20 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi
 - u spalného tepla voda ve spalinách kondenzuje
 - přepočítání mezi spalným teplem a výhřevností získáme podle následujícího vztahu:

$$Q_i^r = Q_s - 2453 \cdot \frac{K}{P} \quad (1.1)$$

kde $K \text{ (kg)}$ hmotnost kondenzované páry,
 $P \text{ (m}^3\text{)}$ objem spáleného plynu během zkoušky

- **Měrná hmotnost ρ :**
 - Získá se z měrných hmot a parciálních tlaků jednotlivých složek
 - $\rho \in 0,45 - 1,20 \text{ t} \cdot \text{m}_n^{-3}$
- **Hutnota plynu h (poměrná hustota):**
 - poměr měrných hmotností plynu a vzduchu
 - platí vztah:

$$h = \frac{\rho}{1,293} \quad (1.2)$$

kde $h \text{ [-]}$ hutnota plynu
 $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$ měrná hmotnost plynu

- **Charakteristické teploty plynných paliv:**
 - a) zápalná teplota:
 - nejnižší teplota, při níž se látka samovolně zapálí a hoří
 - pohybuje se v rozsahu $500-700 \text{ }^\circ\text{C}$
 - závislost je především na obsahu vodíku
 - b) teplota hoření:
 - nejvyšší dosažitelná teplota plamene
- **Rychlost šíření plamene:**
 - důležitá vlastnost pro návrh spalovací komory
- **Záměnnost plynu:**
 - určuje možnost záměny jednotlivého druhu plynu za druhý
 - ukazateli záměnnosti jsou: rychlost hoření, stabilita plamene, výhřevnost, spalné teplo, teplota hoření, sálavost plamene atd...
 - plyny jsou záměnné, pokud mají stejné nebo podobné vlastnosti
 - lze je v daných typech hořáků spalovat bez potíží
 - hlavními faktory jsou stabilita plamene, dokonalost spalování a stabilita tepelného výkonu
 - Wobbeho číslo $[\text{MJ} \cdot \text{m}_n^{-3}]$:

$$W = \frac{Q_i^r}{\sqrt{h}} \quad (1.3)$$

- spalovacími vlastnostmi například jsou stabilita plamene, délka plamene, účinnost spalování atd...

1.3 Charakteristika spalované směsi

Poměr paliva a vzduchu, který přivádíme do primární zóny, je velmi důležitý z pohledu spolehlivého provozu spalovací komory. Pomocí hodnot přebytku spalovacího vzduchu α , můžeme vyjádřit tři oblasti spalované směsi. [4]

$$\alpha = \frac{m_{vzd}}{m_{vzd,stech}} = \frac{1}{\beta} \quad (1.4)$$

kde β je přebytek přiváděného vzduchu. U bohaté směsi je $\beta > 1$, stechiometrické směsi $\beta = 1$ a chudé směsi $\beta < 1$.

1.3.1 Chudá směs

Spalování chudé směsi je charakteristické několika elementy, a to vysokou účinností spalování či dobrým promícháním spalovacího vzduchu a paliva. Plamen chudé směsi je namodralý, čirý, nesvitivý a dosahuje nižších teplot, od které se odvíjí nízká emisivita, a tedy nízké sálání. Výhodou nižších teplot je nižší tvorba NO_x . Nerovnoměrnost teplotního pole na výstupu bývá nižší. [4]

1.3.2 Bohatá směs

U spalování bohaté směsi jsou nízké rychlosti proudu na výstupu ze stabilizátoru. Směs se snáze zapaluje i při nízkém tlaku a teplotě. Plamen bývá svitivý s vyšší emisivitou. Nevýhodou je špatné mísení paliva se spalovacím vzduchem a vyšší emise. Komplikací je nerovnoměrnost teplotního pole na výstupu ze spalovací komory. [4]

1.3.3 Stechiometrická směs

Při spalování stechiometrické směsi můžeme dosáhnout maximálních hodnot rychlosti chemických reakcí, teplot plamene a vznikajícího množství tepla za čas. Při správném poměru je spalování velmi účinné, kdy nedochází k tvorbě dýmu a vyšších emisí CO či jiných nespálených uhlovodíků. Na druhé straně, vysoké teploty způsobují teplotní namáhání vyšším sáláním z plamene. K další nevýhodě můžeme zařadit také vlivem vysoké teploty i vyšší tvorbu NO_x . [4]

1.4 Teplota plamene

Spalování se nejčastěji využívá jako zdroj energie k ohřevu jakýchkoliv látek. Co se týče spalovacího procesu, má teplota plamene zásadní význam, kdy představuje limitní hodnotu, které se může teplota ohřívaného materiálu blížit. Teplota plamene je také stěžejní při výběru materiálu při stavbě spalovacích prostor. Rozlišujeme teplotu teoretickou a adiabatickou. Teoretická teplota je maximální hodnota teploty plamene při spalování plynu se vzduchem nebo kyslíkem, které se dá dosáhnout pouze za adiabatických podmínek tedy žádné ztráty do okolí. Předpokládá se dokonalé spálení paliva s teoretickým množstvím vzduchu nebo kyslíku. Adiabatická teplota na rozdíl od teoretické uvažuje dokonalé spalování s definovaným přebytkem vzduchu. [5]

Adiabatická teplota (teplota nechlazené plamene) se vypočítá ze vztahu:

$$t_{ad} = f(Q_u) \quad (1.5)$$

kde Q_u je celkové užitečné teplo uvolněné v ohništi.

1.5 Radiace

Radiaci lze chápat jako vyzáření energie ve formě elektromagnetických vln, které přenáší teplo. Atom nebo molekula získají nadbytečnou energii a dochází k jejich přechodu na vyšší energetickou hladinu a částice se stává nestabilní. Do svého původního stavu se částice snaží vrátit tak, že vyzáří foton. Tento foton následně cestuje od původní částice do té doby, než narazí na jinou částici, která ho pohltí a sama se dostane do excitovaného stavu a celý proces se následně opakuje. [8]

Teplo dopadající zářením na povrch tělesa může být absorbováno, transmitováno nebo odraženo a jednotlivé podíly jsou známy též jako absorptivita, transmisivita a reflektivita a jejich součet je vždy roven jedné. [7]

$$\alpha_r + \gamma_r + \tau_r = 1 \quad (1.6)$$

kde α_r je absorptivita, γ_r je reflektivita a τ_r je transmisivita.

Pokud těleso absorbuje veškeré dopadající záření, nazýváme toto těleso absolutně černým. Na opačné straně máme absolutně bílé těleso, které veškeré dopadající záření odráží. Dále můžeme těleso klasifikovat jako průhledné či neprůhledné, pokud veškeré dopadající záření transmittuje či nikoliv. [9]

Většina pevných těles má složku transmisivita rovnu nule, což znamená, že část tepla je odražena a část pohlcena, což vede ke zvýšení teploty povrchu daného tělesa. Radiace je nejvýznamnější mechanismus přenosu tepla při spalování. Na rozdíl od vedení či proudění radiace nevyžaduje žádnou zprostředkující látku a může probíhat i ve vakuu. Tepelný tok radiací je popsán pomocí Stefan-Boltzmannovým zákonem a je závislý na čtvrté mocnině teploty povrchu tělesa. [6]

$$\dot{Q} = \sigma \cdot S \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (1.7)$$

kde:	\dot{Q}	je celkový tepelný tok [W]
	σ	je Stefan-Boltzmannova konstanta
	ε	je emisivita [-]
	S	je plocha povrchu [m ²]
	T	je teplota povrchu [K]

1.6 Spalovací rychlost a rychlost plamene

Hlavní rozdíl mezi rychlostí plamene a spalovací rychlostí hoření spočívá v tom, že rychlost plamene představuje rychlost pohybu plamene z referenčního bodu. Na druhé straně spalovací rychlost hoření představuje rychlost pohybu chemických reaktantů z referenčního bodu, který se nachází na čele plamene.

Rychlost plamene je rychlost rozpínání čela plamene při spalovací reakci. V obecném případě se plamen šíří sféricky a rychlost radiálního šíření nazýváme rychlostí plamene. Rychlost vztahujeme k určitému referenčnímu bodu, který se nachází na čele plamene.

Spalovací rychlost lze popsat jako jako rychlost čela plamene vzhledem k nehořícímu plynu. Odvozením získáme laminární rychlost hoření, kterou můžeme definovat jako rychlost, kterou se laminární (rovinná) spalovací vlna šíří vzhledem k neshořelé směsi plynů, která je před ní. Hodnota spalovací rychlosti udává, zda směs bude mít tendenci k zpětnému prošlehnutí nebo oddělení plamene od hořáku (blow off).

2. Plynové hořáky

Hořák je jedním ze základních komponent spalovacího systému, kde dochází k transformaci energie chemické v palivu na energii tepelnou. Hlavními požadavky na hořáky jsou příprava homogenní směsi paliva a spalovacího vzduchu, zajistit stabilní hoření a jeho průběh, malé tlakové ztráty a dobrá regulace výkonu. Rozdělení plynových hořáků lze provést podle několika hledisek. [3], [6]

- podle tlaku plynu
- podle druhu předmísení směsi
- podle způsobu regulace
- podle typu předehřevu spalovacího vzduchu
- podle druhu předání tepelné energie ve spalovacím prostoru
- podle výstupní rychlosti spalin
- rychlost spalování
- konstrukce

Je dobré se převážně zaměřit na tlak na vstupu do hořáku, přívod spalovacího vzduchu a směšování paliva se vzduchem. Co se týče tlaku na vstupu do hořáku, je nutné, aby palivo mělo dostatečnou energii pro vytvoření výtokové rychlosti a zajistilo správné fungování. [14] Je tedy nutné zavádět palivo do hořáku s přetlakem. Rozdělení hořáků dle přetlaku plynu je následující [10], [14]:

- nízkotlaké – tlak do 5 kPa
- středotlaké
- vysokotlaké – tlak nad 400 kPa

Dalším ovlivňujícím faktorem je způsob přivádění spalovacího vzduchu do hořáku. Nejčastěji se setkáváme s hořáky s nuceným přívodem (forced-draft burners), kde je využito ventilátoru případně dmyhadla. Hořáky, které pracují na ejekčním způsobu přivádění spalovacího vzduchu nazýváme tzv. natural-draft burners. Vzduch je přiváděn podtlakem z okolí, vyvolaným vytékajícím palivem z trysky do směšovací komory. Dále využíváme hořáky pracující s vyšším tlakem plynu a nazýváme je injektorové hořáky. [6], [15]

Jako další faktor, podle kterého můžeme dělit hořáky je směšování plynného paliva a spalovacího vzduchu. Prvním typem jsou hořáky s předmísením, kdy se směs paliva plně smísí se spalovacím vzduchem před začátkem spalování, tedy ještě, než vstoupí do spalovací komory. V energetice se s takovými hořáky setkáme jako termicky sálavé hořáky a sálavé stěnové hořáky. Hořáky s předmísením jsou charakteristické krátkým, ale intenzivním plamenem, kde v jsou dosahovány vysoké teploty. Bohužel spalovací prostor je nerovnoměrně zatížen. [6], [15]

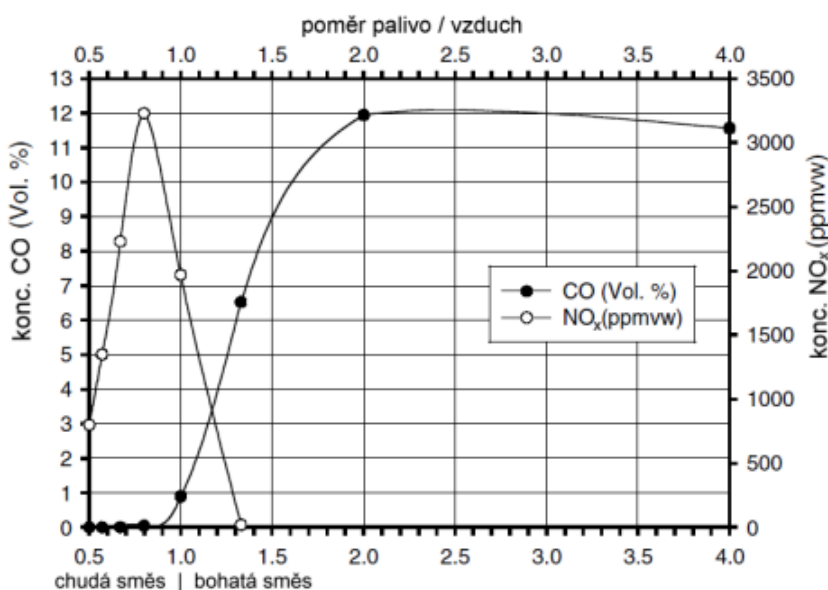
Plynové hořáky, u kterých palivo a spalovací vzduch přichází do spalovacího prostoru odděleně, nazýváme hořáky bez předmísení. Aby reakce proběhla, je nutné dosáhnout potřebné teploty k inicializaci procesu. Tyto hořáky, jinak nazývané difúzní, hoří delším plamenem s nižší teplotou, která je ustálena se stabilním tepelným tokem. U těchto typů hořáků je směs obohacována přidáváním molekul kyslíku, a to z důvodu vysoké reaktivity kyslíku, ale na druhé straně vyšší koncentrace kyslíku zmenší, zintenzivní plamen a dosahujeme vyšších teplot. Pokud obohacujeme jen malým množstvím, používáme hořáky s předmísením. [6]

U hořáků s částečným předmísením dosahujeme vyšší bezpečnosti, co se týče zpětného prošlehnutí, a máme zaručenou stabilitu plamene. Pokud přivádíme palivo nebo spalovací vzduch ve vhodném množství do spalovací komory v několika místech, pak tomuto procesu říkáme stupňovité spalování tzv. staged combustion. [6]

2.1 Vlivy ovlivňující konstrukci hořáků

Hořák je zařízení používané k přeměně spalování paliva a oksyličovadla na tepelnou energii. Systém hořáků může obsahovat buď jeden nebo více hořáků podle typu aplikace. Existuje mnoho vlivů, které se týkají přímo konstrukce hořáku a souvisí převážně s přenosem tepla (heat transfer) a emisemi. Několik desetiletí zpátky bylo hlavní pouze účinné spálení paliva a přenesení tepla. V dnešní době se navíc přidává vliv na životní prostředí spojený s emisemi a jejich redukcí.

Jako příklad účinného snižování emisí NO_x je stupňování přívodu paliva nebo spalovacího vzduchu do spalovacího procesu v několika fázích a tím snižování teploty pro tvorbu emisí. Musíme ale být opatrní u jak bohatých, tak chudých směsích, kde tvorba oxidů dusíku je neodlučitelná s tvorbou CO, kdy snížení NO_x vede ke zvýšení CO viz. obr. 2 a je tedy nutné se zaměřit na dokonalé smísení paliva a oksyličovadla. [6]

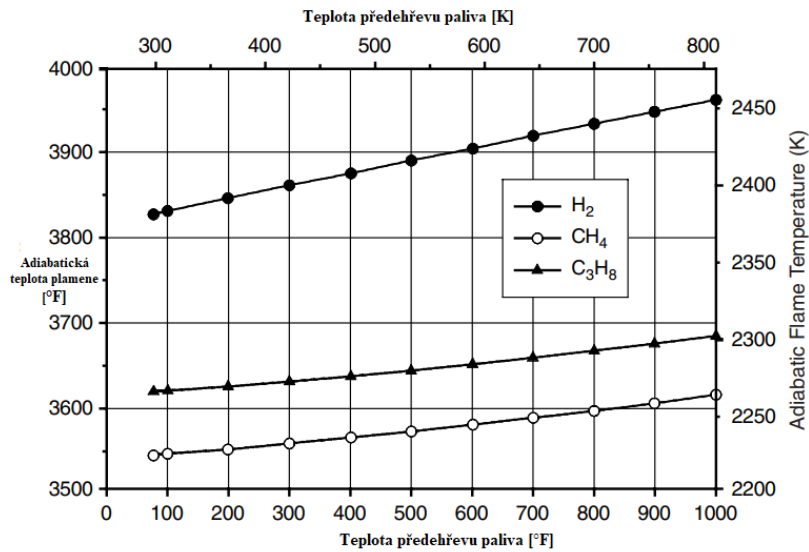


Obr. 2 Závislost tvorby emisí NO_x a CO na poměru paliva a spal. vzduchu [6]

2.2 Faktory ovlivňující přenos tepla

Existuje několik faktorů, které ovlivňují přenos tepla od plamene. Jsou to například druh paliva, oksyličovadlo, teplota nebo orientace plamene. Jednou z hlavních výhod spalování plyných paliv je jejich čistota. Co se týče přenosu tepla od plamene, je tu nevýhoda malé svítivosti a záření pouze v určitých vlnových délkách. Pro zlepšení svítivosti plamene bylo zavedeno stupňovité spalování. Tato technika zahrnuje uzavření toku paliva z jednoho nebo více hořáků, aby se vytvořily zóny bohaté a chudé na palivo s následným vstřikováním oksyličovadla. Další metodou ke zvýšení zářivosti plamene je vstřikování oleje nebo předeřívání. [6]

Dalším faktorem je teplota paliva, kdy jeho předeříváním viz. obr. 3 zvyšujeme tzv. adiabatickou teplotu plamene. Tím ovlivňuje jak radiaci, tak konvekci, kdy radiace je vyšší v důsledku zvýšené teploty plynu. Vliv konvekce na přenos tepla je ovlivněna rychlostí plynu, který se zvyšuje s teplotou vlivem expanze plynu při vysokých teplotách. [6] Nyní se zaměříme na oksyličovadlo a jeho teplotu, neboť bylo dokázáno, že můžeme až několiknásobně zvýšit přenos tepla. Předeřívání oksyličovadla je obecně prováděno kvůli získávání energie ze spalinových produktů a také za účelem zvýšení adiabatické teploty plamene viz. obr. 4.

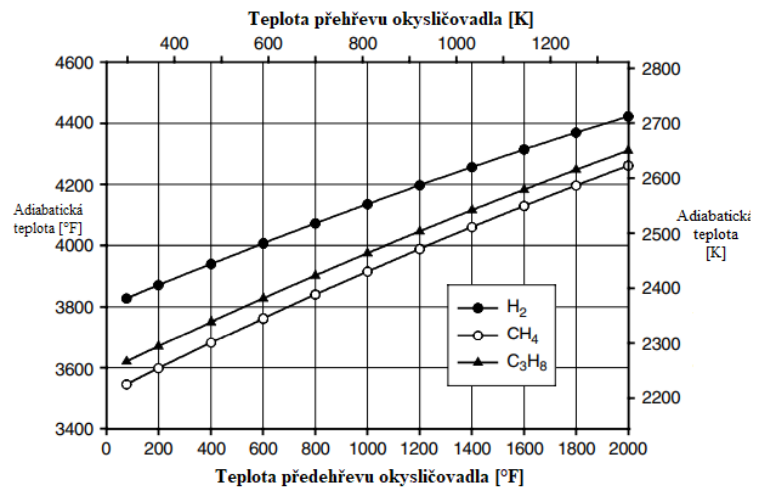


Obr. 3 Závislost adiabatické teploty na předehřevu paliva [6]

Díky předehřívání zvyšujeme tepelnou účinnost, kdy vyšší teplota plamene má za účinek vzrůst hustoty tepelného toku od plamene v závislosti na absolutní teplotě umocněné na čtvrtou. [6]

Vliv předehřívání vzduchu může být viděn na obr.4, kdy předehřátí vzduchu na 550 °C způsobí zdvojnásobení délky plamene a tepelný tok je rovnoměrnější v porovnání bez předehřevu viz. obr. 5. [6]

Předehřev vzduchu vedle svých výhod má i svá negativa jako například vyšší spalovací teploty, které vedou k tvorbě dusíku, a vyšší teploty při spalování vedou k vyššímu tepelnému zatížení hořáků z hlediska materiálu. [6]



Obr. 4 Závislost adiabatické teploty na předehřevu oksylichovadla [6]



Obr. 5 Vliv předehřevu na délce plamene [6]

3. Zemní plyn

Zemní plyn je směs plynných uhlovodíků s většinovým podílem metanu CH₄ a dalšími inertními plyny jako etan, propan atd. Zemní plyn je bezbarvý, nezapáchající, hořlavý plyn. Patří do skupiny topných plynů, využívá se k vaření a ohřevu vody, vytápění, v teplárnách, v elektrárnách, v kogeneračních jednotkách a v dopravě. [11], [12]

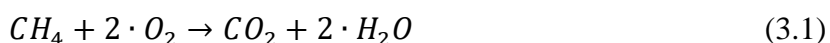
Zemní plyn můžeme dělit na dva druhy, a to naftový a karbonský. Naftový zemní plyn je uložen v pórovitých horninách společně s ropou. Těžba probíhá pomocí vrtů, které jsou přímo vedeny do ložisek nacházející se většinou v hloubce 3 km. Karbonský zemní plyn se vlivem dlouhodobé přeměny původních rostlin na černé uhlí se vyskytuje právě v ložiscích s černým uhlím.

Vlastnosti tranzitního zemního plynu (p = atmosférický, t = 0 °C) [31]:

Výhřevnost	35,79 MJ/m ³
Spalné teplo	39,79 MJ/m ³
Hustota	0,72 kg/ m ³
Zápalná teplota (směs se vzduchem)	595 °C
Adiabatická teplota plamene	okolo 1950 °C
Dolní a horní mez výbušnosti	4/15 %
Rychlost plamene	0,4 m/s
Wobbeho číslo	52,95 MJ/m ³

Tab.1 Vlastnosti zemního plynu

Proces spalování zemního plynu lze popsat následující rovnicí [11]:



3.1 Druhy těženého zemního plynu

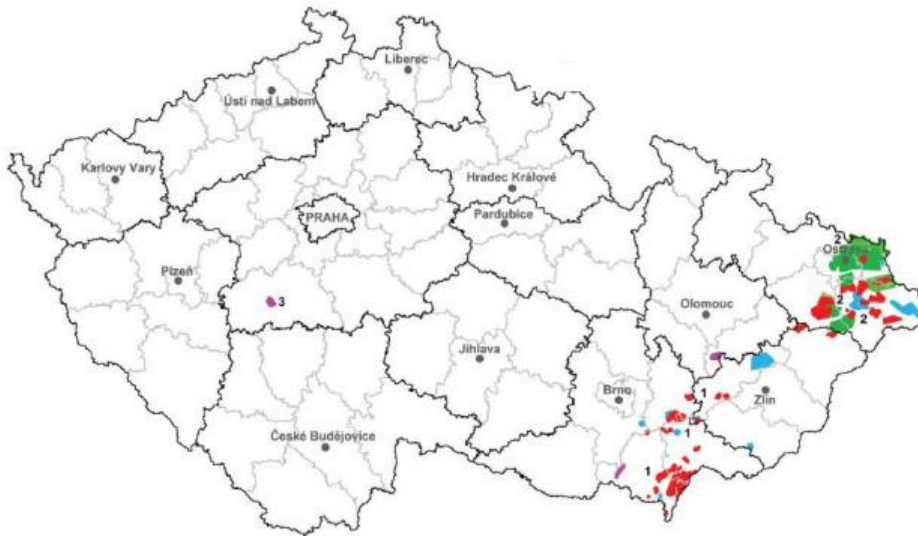
Vytěžený zemní plyn můžeme rozdělit do čtyř kategorií podle složení [11]:

- Zemní plyn suchý (chudý) – obsahuje vysoké procento metanu (95–98 %) a malé množství vyšších uhlovodíků
- Zemní plyn vlhký (bohatý) – vedle metanu obsahuje vyšší podíl vyšších uhlovodíků
- Zemní plyn s vyšším obsahem inertních plynů
- Zemní plyn kyselý – vysoký obsah sulfanu (H₂S)

Velmi málo se v zemním plynu vyskytují vyšší uhlovodíky, zejména nasycené uhlovodíky. Jsou to etan, propan a butan. V některých ložiscích se mohou nacházet i některé kapalné uhlovodíky, kdy při úpravě se kapalné složky oddělují a vzniká gazolin neboli přírodní benzín. Nejčastěji se využívá naftového zemního plynu, který současně vzniká s ropou. [13]

3.2 Využití zemního plynu

V České republice se zemní plyn těží převážně ve dvou lokalitách, a to na jižní Moravě, kde se těží konvenční zemní plyn, a na severní Moravě karbonský zemní plyn (obr.6). Zásoby zemního plynu se odhadují na 2842 mil.m³ s životností 21 let. V ČR je více jak 2,8 milionů odběratelů zemního plynu, z toho 2,6 milionů domácností. [37]



Obr.6 Ložiska zemního plynu v ČR [37]

Velmi rozšířená je výroba elektrické energie v paroplynových elektrárnách. Kombinace páry a plynu je při výrobě elektrické energie jednou z nejefektivnějších technologií ve srovnání s ostatními fosilními palivy. [38]

Co se výroby tepla týče, přibližně 46 % připadne na výrobu tepla ve firmách a 26 % v domácnostech. Byl zaznamenán pokles podílu vytápění zemním plynem z 55 % na 34 % během let 2010-2020. V domácnostech je zemní plyn využíván převážně na vytápění, ohřevu vody a k vaření.

V dopravě se využívá z důvodu nízké ceny a z důvodu nižších emisí až o 25 % oproti benzínu. Zemní plyn lze použít v podobě stlačeného plynu CNG (z ang. Compressed Natural Gas), kdy jeho tlak je cca. 20 MPa, nebo ve formě zkapalněné při teplotě -162 °C LNG (z ang. Liquefied Natural Gas). [38]

3.3 Cena zemního plynu

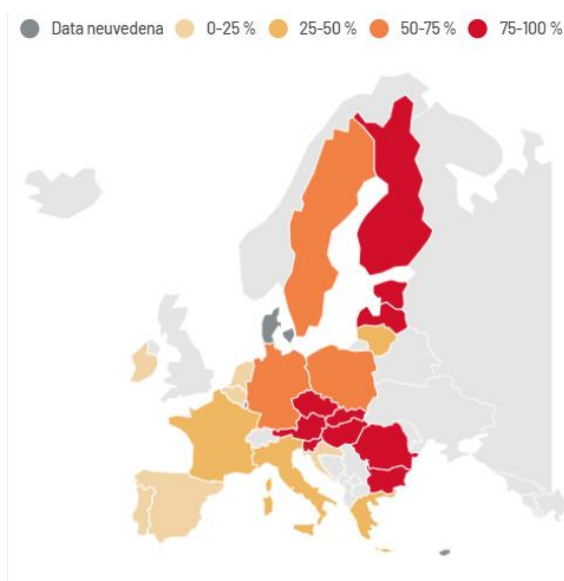
Zemní plyn je spolu s uhlím nejčastěji užívaným fosilním palivem. Kromě zdroje energie představuje surovinu užívanou v několika odvětvích. Základní obchodovatelnou jednotkou zemního plynu je megawatthodina. Cena plynu na burze se v důsledku energetické krize v polovině března 2022 vyšplhala na 16 dolarů za MWh, přibližně 364 Kč. [39]



Obr. 7 Vývoj ceny ZP [39]

3.4 Těžba, zásoby zemního plynu a doprava

Ve světě se každoročně vytěží přes 2100 miliard m³ zemního plynu různého složení převážně obsahující uhlovodík CH₄. Tímto tempem by zásoby měly být vyčerpány kolem roku 2057. Naději na prodloužení doby nám dávají tzv. hydráty neboli ložiska zmrzlého zemního plynu, na Aljašce a Sibiři. Největšími zásobami zemního plynu disponuje Ruská federace (téměř 25 % světových zásob), která se stala během posledních dekád největším těžářem a exportérem této komodity do oblasti střední a západní Evropy (obr.8). Západní Evropa je také zásobována z naleziště v Severním moři a v Severní Africe, převážně z Alžírsko. Import zemního plynu ze zemí Perského zálivu se nevyužívá v plném měřítku, ačkoli Írán je v žebříčku zásob v množství geologických zásob na druhém místě. Následují Katar, USA či Saudská Arábie. [58]

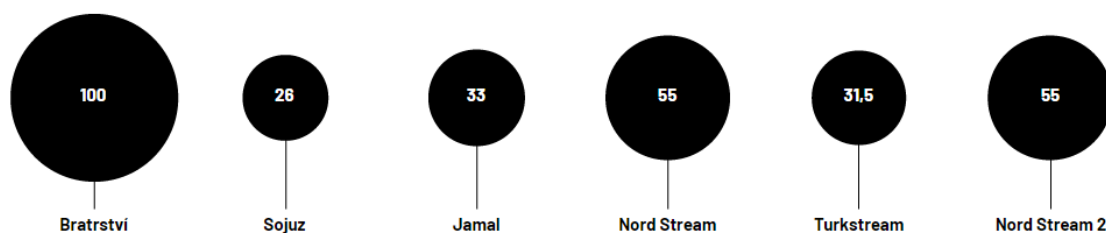


Obr. 8 Závislost členských států EU na dodávkách plynu z Ruska [61]

Doprava je zajišťována převážně plynovody, kdy jejich celková délka překonala 430 000 km. Na světě je v provozu více než 1 200 000 km vysokotlakých plynovodů. Největší část evropských vysokotlakých plynovodů (cca 215 000 km) vlastní Rusko. Z Ruska do Evropy vedou plynovody Bratrství, Sojuz, Jamal, Nord Stream, Turkstream a Nord Stream 2 (obr.9). Podíl ruského plynu v roce 2021 do Evropy činil téměř 47 %. [59] Narůstající těžba v Severním moři dále na sever, si vyžaduje stavbu nových podmořských plynovodů vedoucích do Norska, Velké Británie, Dánska, Německa nebo Belgie. [58], [59]

Přibližné množství plynu za rok

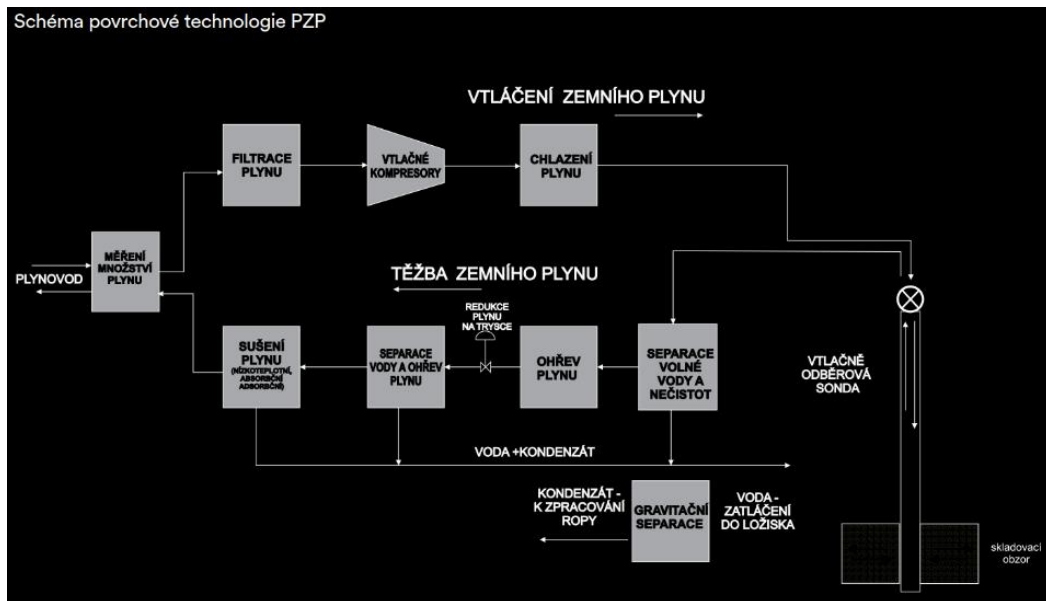
(v mld. m³)



Obr. 9 Objem plynu přivedeného plynovody [61]

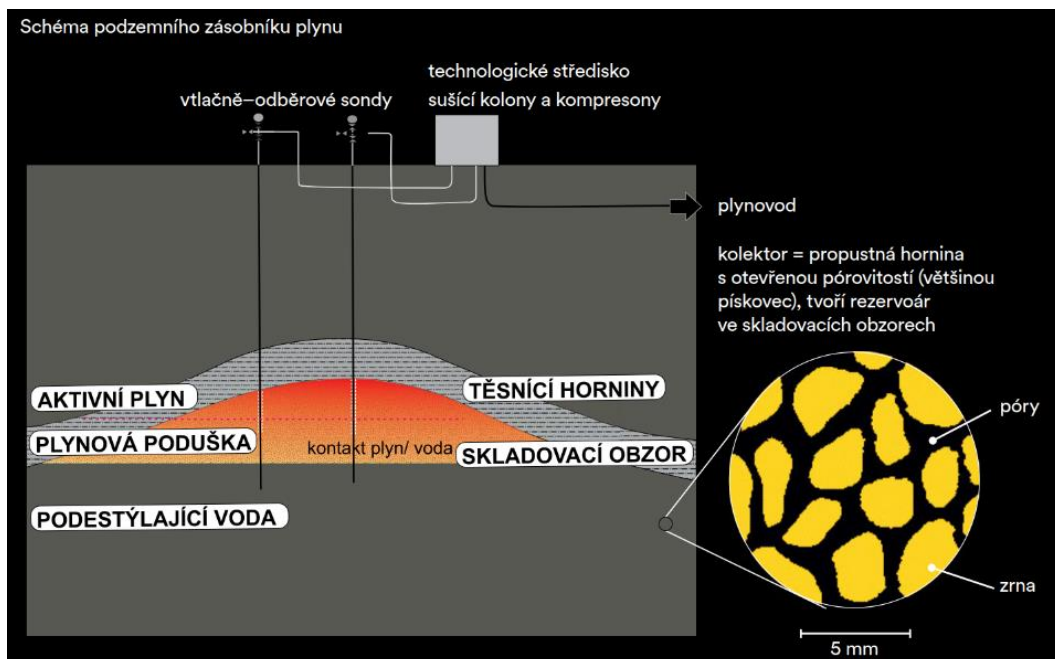
Na cestě ke spotřebiteli jsou kompresory, které jsou soustředěny podél tras plynovodů a ženu rychlostí zemní plyn až 80 km/h. Po přivedení plynovodem se musí zemní plyn vyčistit. Čištění probíhá v různých objektech a odloučené složky se využijí jako vedlejší produkty. Pevně odlučujeme vodu, dusík, síru či kapalné uhlovodíky. Plyn je veden do separátoru, kde dochází změnou rychlosti a směru proudění plynu k oddělení kapalné fáze od plynné a oddělení nečistot. Následně se vyčištěný zemní plyn uskládá v zásobnících. [58]

Podzemní zásobníkem jsou podle normy veškerá podpovrchová a povrchová zařízení (obr. 10). Ve většině případů se využívají přírodní nebo uměle vybudované prostory v podzemí. Podzemním zásobníkem plynu může být například staré vytěžené ložisko plynu nebo ropy. [58]



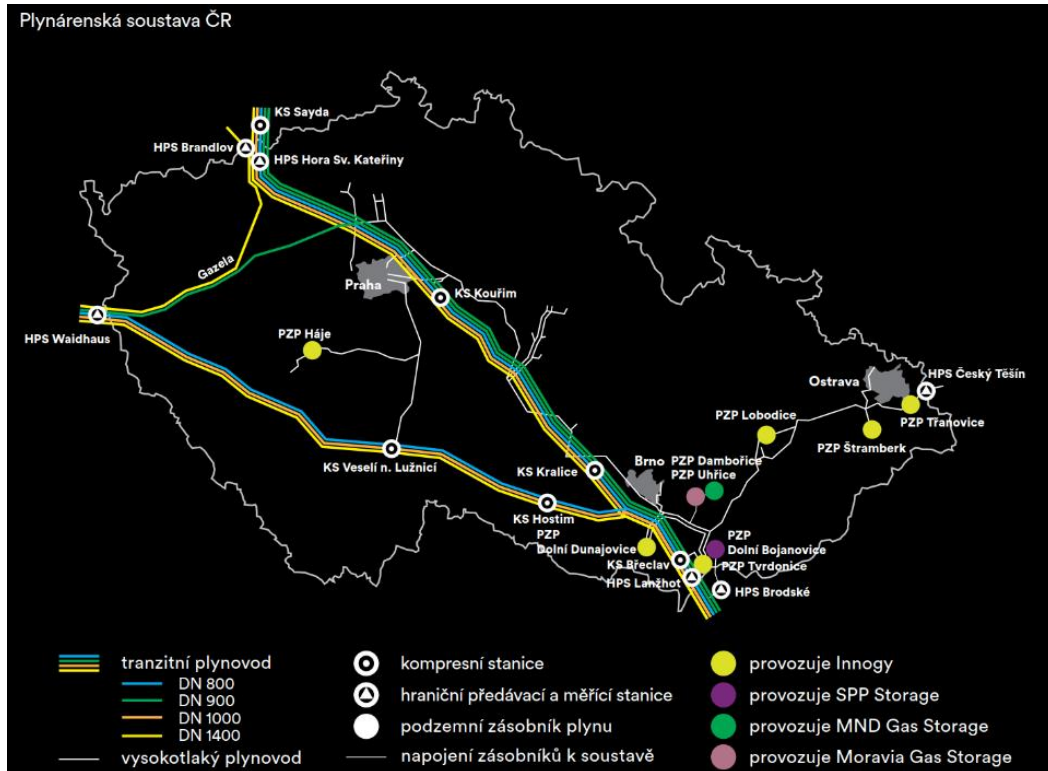
Obr. 10 Schéma povrchové technologie [60]

Typově se zásobníky dělí na porézní zásobníky (obr.11) a kavernové zásobníky. U porézních zásobníků se skladování provádí v drobných pórech a trhlinách pevných hornin. Kavernové zásobníky jsou uměle vytvořené zásobníky a může jít o původně solné nebo uhelné doly. Jejich výhodou je snadnost řízení a vysoké vtlačení. [58], [60]



Obr. 11 Podzemní zásobníky [60]

V současnosti musí mít na území České republiky (obr. 12) všechny společnosti, které provozují podzemní zásobníky plynu, které získaly licenci od Energetického regulačního úřadu (ERÚ). Kapacita zásobníků připojených do plynárenské sítě ČR činí téměř 37 TWh, což pro rok 2020 představovalo 40 % roční spotřeby zemního plynu v celé ČR. [60]



Obr. 12 Plynárenská soustava v ČR [60]

Odběr zemního plynu je velmi nerovnoměrný, neboť je závislý na okamžité spotřebě odběratelů, kdy nejvyšší spotřeba zemního plynu je v zimních měsících, a naopak v létě minimální. Pro vyrovnávání výkyvů a krytí špiček se v létě uskládá přebytek plynu, které se v zimě spotřebovávají. [60]

4. Vodík

Vodík můžeme nazývat palivem budoucnosti. Už před více než 50 lety lidé využili jeho schopnost při cestě do vesmíru. Hlavní vizí některých vyspělých zemí je vytvoření strategie za účelem redukce skleníkových plynů přechodem ze spalování fosilních paliv na vodík. [17]

Bylo by dobré zmínit, že vodík je brán jako nosič energie, a nikoliv jako primární palivo. Je tedy nutné ho získávat za pomoci různých technologických postupů, které budou v následujících kapitolách probrány podrobněji. Práce se dále bude zabývat spalováním směsi vodíku a zemní plynu. [18], [19]

4.1 Charakteristika vodíku

Jedná se o nejjednodušší a nejjednodušší plynný prvek v periodické soustavě prvků. Převážnou část hmoty ve vesmíru jako například hvězdy nebo plynné planety tvoří vodík. Na planetě Zemi se vyskytuje jen zřídka v čisté podobě jako nesmíchaný plyn. Nejčastěji se s ním setkáme chemicky vázaný jako vodu (H_2O), která pokrývá 2/3 našeho zemského povrchu. Je lehký, bezbarvý, bez chuti a zápachu. [17] Při hoření je typický svým namodralým plamenem. Protože je vysoce reaktivní, nevyskytuje se jako samostatná molekula. Vodík má 3 hlavní izotopy. Hmotnostní čísla izotopů jsou 1, 2 a 3. Hmotnostní číslo 1 reprezentuje klasický vodík (1H) známý také jako protium. Dále se jedná o deuterium (2H) a tritium (3H). [16] Další jeho vlastnosti jsou uvedené v následující tabulce [31].

Výhřevnost	10,18 MJ/m ³
Spalné teplo	12,8 MJ/m ³
Hustota	0,083 kg/ m ³
Zápalná teplota	535 °C
Adiabatická teplota plamene	až 2200 °C
Dolní a horní mez výbušnosti	4/75 %
Rychlost plamene	2,1 m/s
Wobbeho číslo	48,5 MJ/m ³

Tab.2 Vlastnosti vodíku

4.2 Kategorizace vodíku

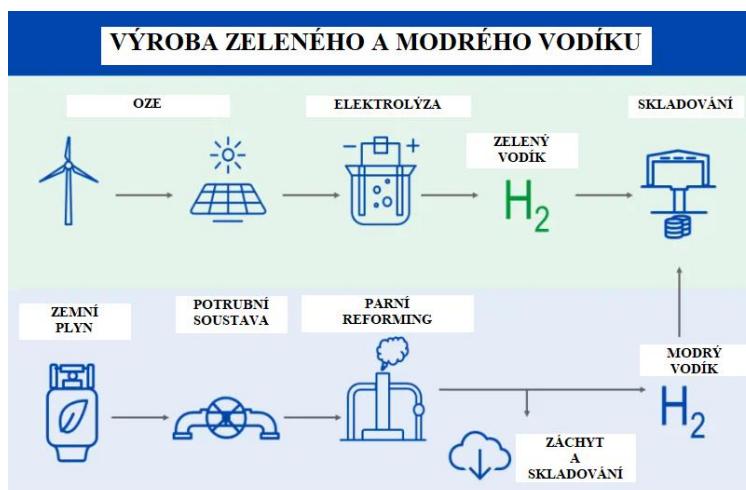
Členění vodíku bude provedeno z technického hlediska, a to především z jakých zdrojů je získáván, neboť to je nedílnou součástí otázky uhlíkové stopy a klasifikace vodíku dle produkce oxidu uhličitého (CO_2) při výrobě. Toto závisí především na zdroji energie použitého při výrobě vodíku a tvorbě oxidu uhličitého spojeného s patřičnou technologií. Můžeme proto rozdělit vodík dle výroby podle barevných pojmů. [19], [20]

- modrý vodík,
- šedý vodík,
- zelený vodík,
- růžový, hnědý/černý, tyrkysový, žlutý a bílý

4.2.1 Výroba modrého, zeleného, šedého vodíku a dalších

Modrý vodík je vyráběn štěpením zemního plynu na H_2 a CO_2 za pomoci parního reformingu metanu viz. obr. 13. Oxid uhličitý se nevypouští do atmosféry, je zachycován a skladován. Tato metoda se nazývá CCS (Carbon Capture and Storage) a tak dokážeme zmírnit dopady na životní prostředí. [50], [51]

Šedý vodík je vyráběn stejným způsobem jako modrý vodík, tedy z fosilních paliv jako je uhlí nebo zemní plyn. Na rozdíl od modrého vodíku se emise uhlíku vypouštějí do atmosféry. Tato technologie je nejméně ekologická, ale stále velmi často používána. [51], [52]



Obr. 13 Schéma výroby zeleného a modrého vodíku [51]

Nejčistší způsob výroby vodíku s nejnižšími emisemi CO_2 je u výroby zeleného vodíku, který je vyráběn elektrolytickým štěpením molekul vody, kdy vzniká pouze vodík a kyslík viz. obr. 7. Kyslík může být vypouštěn do okolní atmosféry jako vedlejší produkt, aniž by docházelo ke znečištění. Elektrická energie potřebná k elektrolyze je využívána z obnovitelných zdrojů energie (OZE), převážně ze solární či větrné energie. Další metodou výroby zeleného vodíku je parní reforming biometanu nebo pyrolýza biogenních surovin. [50], [51]

Tyrkysový vodík je vyráběn pyrolýzou metanu, který je štěpen v reaktoru na pevný uhlík a vodík. Nepochází k tvorbě CO_2 jako vedlejšího produktu. Žlutý vodík se vyrábí stejným způsobem jako zelený vodík, kdy elektrická energie na elektrolyzu je převážně ze solárního zdroje. Dále můžeme využít jadernou energii k elektrolyze, která je používána na výrobu růžového vodíku. Pravým opakem zeleného vodíku je černý nebo hnědý vodík, kdy je k výrobě použito černé uhlí nebo lignit. V neposlední řadě tu máme bílý vodík, který se vyskytuje v podzemních ložiscích a je vyráběn za pomoci krakování, tedy tepelný rozklad uhlovodíků s delším řetězcem na uhlovodíky s kratším řetězcem. [52]

Hlavním cílem dekarbonizace v následujících letech je přechod na zelený a nízkouhlíkový vodík. Tento přechod se bude týkat několika odvětví, převážně průmyslu a dopravy. Na této cestě bude nutné počítat s řadou faktorů. Ty nejzásadnější jsou náklady na primární nosič energie (elektrina z OZE, zemní plyn), náklady na infrastrukturu (doprava a skladování) a náklady na výrobu vodíku (cena na kg vyrobeného vodíku) viz. tab. 3. [51]

Typ vodíku	Cena výroby [Kč/kg _{H2}]
Hnědý vodík	44
Modrý vodík	155-240
Zelený vodík	220-330
Šedý vodík	110-135

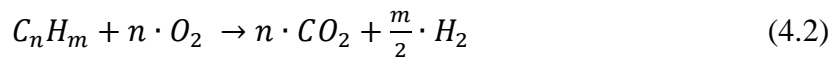
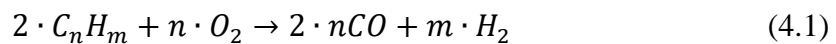
Tab.3 Cena výroby vodíků s kurzem k datu 12.1.2023 [50]

4.3 Výroba vodíku z fosilních paliv

Vodík je nutné si vždy vyrobit, neboť čistý vodík se na Zemi téměř nevyskytuje, a výroba je nutná ze sloučenin, které je obsahují. Existuje celá řada procesů, kde hlavní prioritou je šetrnost k životnímu prostředí a snižování nákladů na výrobu, čímž se vodík stává konkurenceschopným na trhu. Výroba vodíku z fosilních paliv převládá v dnešní produkci vodíku ve světě. K nejběžnějším metodám patří parciální oxidace, parní reforming a zplyňování plynu. Při těchto procesech je využíváno jako palivo uhlí, zemní plyn, ropa nebo metan.

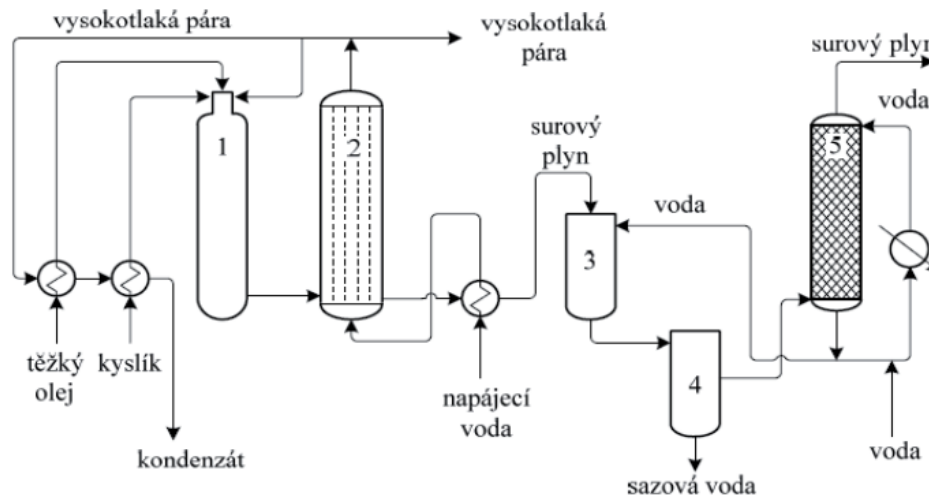
4.3.1 Parciální oxidace

Parciální oxidace je rozšířeným způsobem výroby vodíku. Nejčastěji se jedná o zplyňování těžkých ropných frakcí, kdy zplyňování je prováděno kyslíkem a vodní párou při teplotě v rozmezí 1300-1500 °C a tlaku 3-8 MPa. Proces parciální oxidace uhlovodíkových surovin probíhá podle rovnice (4.1) i podle (4.2). Obě následující reakce jsou exotermické a způsobují ohřátí směsi až na 1500 °C. [26]



Výsledkem parciální oxidace různých surovin je plynná směs obsahující plyny jako CO, CO₂, H₂O, H₂ a CH₄. Na obr. 14 je uvedeno schéma parní oxidace těžkých ropných olejů. Olej je rozprašován do proudu předehřáté směsi vodní páry a kyslíku. [26]

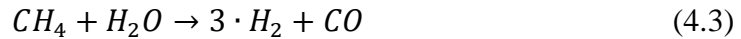
Ve zplyňovacím reaktoru se následně vytvoří plyn, který se vede do kotle na výrobu vodní páry. V kotli se plyn ochladí nad teplotu nasycené vodní páry, kdy souběžně se produkuje vysokotlaká pára o tlaku až 12 MPa. V závěru se generátorový plyn ochladí nástřikem vody v chladiči, čímž dojde k odstranění části sazí. Ke konečnému dočištění dochází ve vodní pračce. Nakonec se z generátorového plynu odstraní sulfan a dojde k přeměně CO na CO₂. Zbytky, CO a CO₂, se odstraní pomocí metanizace. [26]



Obr. 14 Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů (1 – generátor, 2 – kotel, 3 – chladič, 4 – separátor, 5 – pračka) [26]

4.3.2 Parní reforming

Parní reforming je endotermický proces, kdy vodní pára o teplotě cca 700-900 °C a tlaku 3 až 5 MPa reaguje s uhlovodíkovou sloučeninou (např. metan). Výsledkem této reakce je oxid uhelnatý, vodík (4.3) a ve vodní páře se vytváří oxid uhličitý (4.4). Jako katalyzátor je využíván oxid nikelnatý. Abychom zabránili usazování uhlíku na katalyzátor, vodní páru používáme v přebytku 3:1. [26], [21]

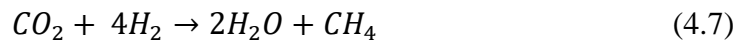


Oxid uhelnatý reaguje s vodní parou v dalších reaktorech, kde je přeměňován na oxid uhličitý a vodík (4.5). Reakce je probíhá ve dvou stupních, kdy v prvním stupni je využíván katalyzátor na bázi oxidu chromu a železa. [26]

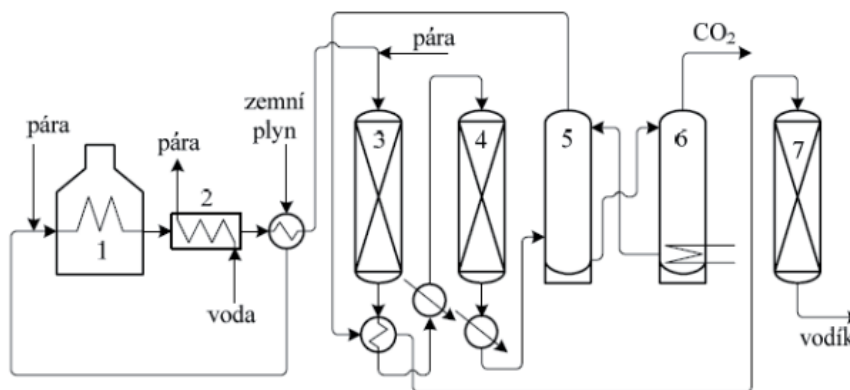
Tento katalyzátor je méně náchylný na nečistoty. První proces probíhá za vyšších teplot, kdy vstupní teplota do reaktoru je přibližně 380 °C a na výstupu 500 °C. Ve druhém stupni se přeměna realizuje při menších teplotách, což umožňuje velmi aktivní měděný katalyzátor, a dochází ke snížení koncentrace oxidu uhelnatého. [26], [22]



Vodík, jež je určen k hydrogenaci, nesmí obsahovat kyslíkaté sloučeniny. Je nutné zbylé, CO a CO₂ převést zpět na metan (4.6, 4.7). Proces probíhá v metanizačním reaktoru při 400 °C. [26]



Na obr. 15 je vyobrazeno zjednodušené schéma parního reformování zemního plynu. Předehřátý zemní plyn, musí již být odsířený, se spolu s potřebným množstvím páry přivede do pece. V peci proběhnou výše zmíněné reakce (4.4) a (4.5). Následně produkty, o teplotě okolo 750 °C, se zavedou do kotle na výrobu páry a výměník, kde dochází jejich ochlazení na teplotu přibližně 360 °C. Vysokoteplotní a nízkoteplotní konvertor v okruhu nám poslouží k přeměně CO na CO₂ (13). Produkty se poté zavedou do absorbérů, kde se vypere CO₂. [26]



Obr. 15 Schéma parního reformování zemního plynu (1 – pec, 2 – kotol na vodní páru, 3 – vysokoteplotní konvertor, 4 – nízkoteplotní konvertor, 5 – absorbér, 6 – desorbér, 7 – metanizér) [26]

4.3.3 Výroba vodíku zplyňováním uhlí

Hlavní podstatou zplyňovacího procesu je reakce uhlí s kyslíkem a vodní parou. Tento proces probíhá za vysokých teplot, které se pohybují v rozmezí 600-1200 °C se zvýšeným tlakem okolo 2 MPa. Výsledkem procesu je syntézní plyn, které se skládá z CO, CO₂, H₂ a další. Za pomoci přeměny plynu a vypíracím procesům je možné získat velmi čistý vodík. [26]

Na začátku je obsaženo velké množství síry, ale díky odsířovacím procesům je možné získat plyn ve velmi malém obsahu sirných složek. [26]

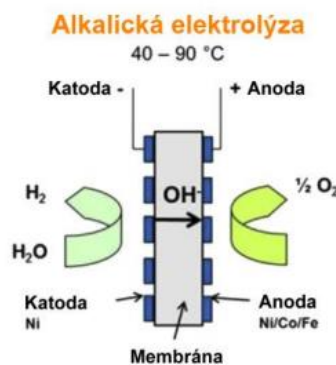
4.4 Výroba vodíku z OZ

Mezi hlavní metody, které využívají látky jako je například voda či biomasa, můžeme zahrnout elektrolyzu nebo fotoelektrolyzu, která využívá sluneční záření. [27]

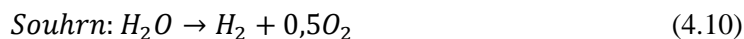
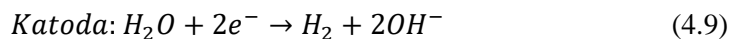
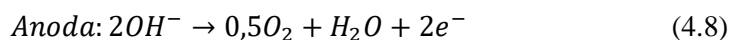
4.4.1 Elektrolyza vody

Jedná se o způsob výroby vodíku a kyslíku jako vedlejšího produktu přímým rozkladem molekul vody pomocí stejnosměrného elektrického napětí. Průchodem proudu elektrolytem dochází k pohybu kladných iontů k záporné elektrodě a záporných iontů k elektrodě kladné. Na katodě se následně uvolňuje vodík a na anodě kyslík. Tato metoda je vhodná, pokud vyžadujeme velmi čistý vodík. Důvodem malého využití tohoto procesu jsou velmi vysoké náklady na výrobu elektrické energie. Základním zařízením je elektrolyzátor, který sestává z nádoby, elektrolytu a elektrod. [25]

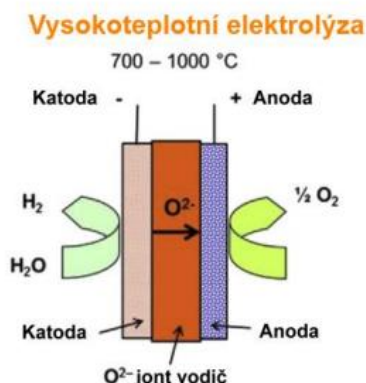
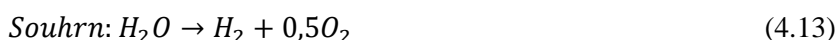
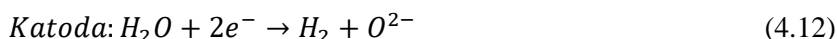
Alkalická elektrolyza vody se skládá z niklové anody a ocelové katody anorganickou membránou, přívodem elektrického proudu a roztokem neboli elektrolytem (obr. 16). Jako elektrolyt je nejčastěji využíván 25-30 % hydroxid draselný. Jeho výhodou je vyšší vodivost oproti čisté vodě, kde je nutné dodávat vyšší množství energie. Výroba probíhá za teploty přibližně 80 °C a napětí $U = 1,8-2,4$ V. Na katodě dochází k přeměně vody na vodík a vzniklé ionty procházejí přes membránu k anodě. [23], [24] Rovnice níže popisují proces výroby.



Obr. 16 Alkalická elektrolyza [25]

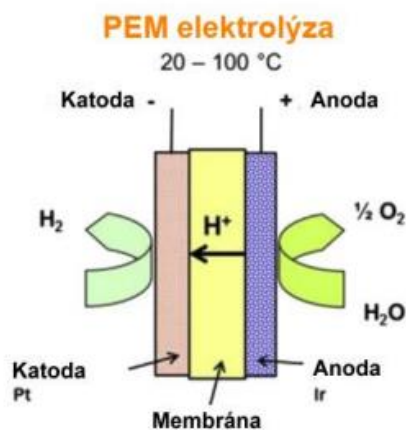


Vysokoteplotní elektrolyza vody při procesu výroby využívá pevný roztok tvořen oxidy zirkonu stabilizované yttriem, které slouží k přenosu kyslíkových iontů mezi elektrodami (obr. 17). Vodní pára je přiváděna na katodu, kde se redukuje na vodík. Kyslíkové ionty (O^{2-}) prochází elektrolytem k anodě, kde se oxidují na kyslík. Rovnice níže popisují proces výroby. [40]

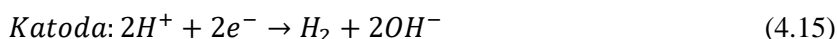
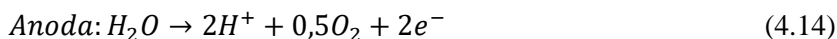


Obr.17 Vysokoteplotní elektrolýza [25]

PEM elektrolýza neboli elektrolýza s polymerním elektrolytem je technologie využívající polymerní membránu sloužící k přenosu H^+ iontů mezi anodou a katodou (obr. 18). Metoda využívá porézní uhlíkové materiály, které formují vrstvu elektrod. Na anodě se z vody tvoří kyslík, vzniklé vodíkové ionty procházejí skrz membránu ke katodě, kde dochází k tvorbě vodíku. Výhody lze spatřit ve vysoké účinnosti a kompaktnost zařízení. Nevýhodou PEM elektrolýzy je jejich vyšší cena díky využitým materiálům při výrobě. Procesy na katodách jsou vyjádřeny následujícími rovnicemi. [40]



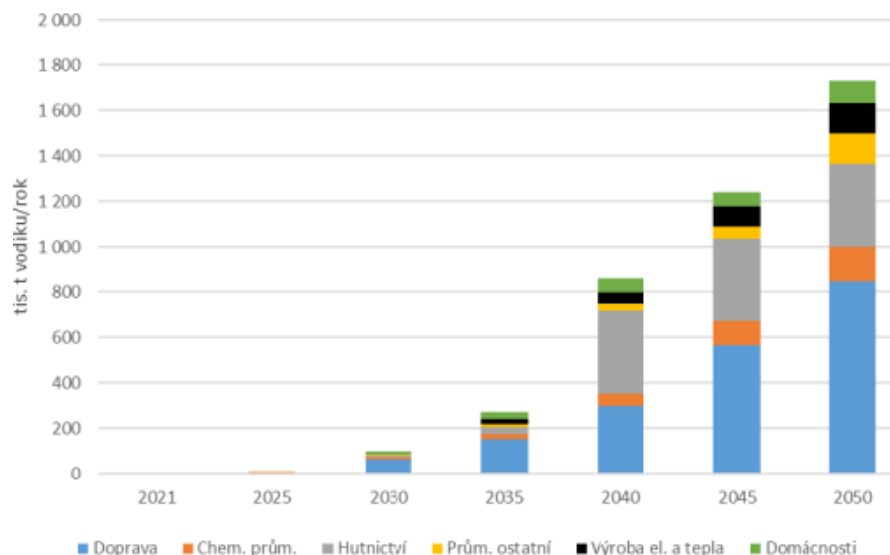
Obr. 18 PEM elektrolýza [25]



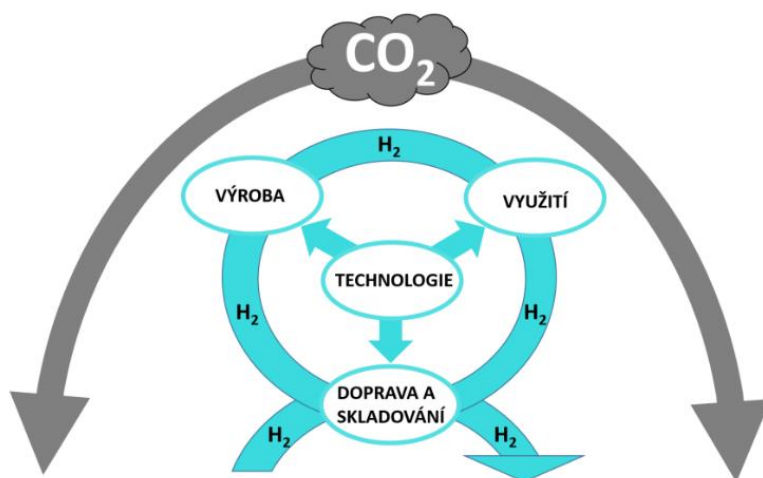
4.5 Vodíková strategie ČR a Evropy [20]

Vláda České republiky na jednání z roku 2021 schválila Vodíkovou strategii, která navazuje na evropskou vodíkovou strategii. Pro dosažení cílů spojených se snižováním emisí skleníkových plynů, jsou zapotřebí vodíkové technologie, tak jak jsou stanoveny v Zelené dohodě pro Evropu. Cíle stanovené pro Vodíkovou strategii pro ČR jsou snižování emisí skleníkových plynů a současně podpora vznikajících projektů. Strategie stojí na čtyřech pilířích viz. obr. 20, a jsou to:

- výroba nízkouhlíkového vodíku,
- využití nízkouhlíkového vodíku,
- doprava a skladování,
- vodíkové technologie.



Obr. 19 Prognóza spotřeby nízkouhlíkového vodíku v ČR [20]



Obr. 20 Vodíková strategie [20]

Bude kladen velký důraz na rozvoj vodíkových technologií, které budou napomáhat evropskému a českému průmyslu. Očekává se, že ČR bude muset importovat vodík ze zemí, kde jsou podmínky pro výrobu obnovitelného vodíku výhodnější z důvodu vyššího slunečního svitu a větrných podmínek. ČR by se mohla stát důležitým tranzitním místem přepravy vodíku z jihu na sever a z východu na západ. Z tohoto důvodu bude kladen důraz na plynárenské přepravní soustavy. Vodík bude mít významný vliv pro naplnění evropských klimatických cílů a plynárenská infrastruktura bude důležitá z hlediska rozvoje.

Studie European Hydrogen Backbone tvoří (obr. 21) příležitost pro podporu dekarbonizace, kdy studie v roce 2040 zahrnuje téměř 40 000 km plynovodů ve 21 evropských zemích.

Tato síť by měla mít dostatečnou kapacitu na poptávku 2300 TWh. [20] Předpokládaná spotřeba vodíku by měla v roce 2050 dosáhnout 1728 tis.t nízkouhličkového vodíku ročně. Abychom vyrobili pomocí elektrolýzy takového množství vodíku, potřebovali bychom 95 TWh elektrické energie. Nejvyšší spotřeba se očekává především v dopravě, v hutnictví, v chemickém průmyslu a v energetice viz. obr. 19.



Obr. 21 European Hydrogen Backbone [20]

4.6 Skladování a doprava vodíku

Vzhledem k tomu, že vodík je vysoce reaktivní a ve směsi se vzduchem nebo kyslíkem v určité koncentraci také plyn výbušný, a proto klademe velký důraz na bezpečnost skladování a s tím spojená manipulace. Skladování s sebou přináší jistá úskalí, se kterými je nutné počítat. Jedná se například o hustotu, kterou má vodík ze všech paliv nejmenší, a také nejmenší atomový poloměr, což ovlivňuje únik z nádrží. Hustota je dokonce 3,2krát nižší než u zemního plynu a přibližně 2700krát nižší než u benzínu. [56] Dalším nežádoucím jevem je vodíková koroze, která probíhá za zvýšené teploty a vodík reaguje s karbidy v železe, které se srážejí za vzniku metanu kolem hranic zrn. Zvýšená přítomnost kolem zrn způsobuje vyšší napětí ve struktuře, která vede k prvotním trhlinám a postupnému narušení materiálu. [54]

Vodík můžeme skladovat nejčastěji dvěma způsoby, a to v kapalném stavu nebo plynném. Bod varu vodíku je $-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kvůli svému kryogennímu bodu varu vyžaduje kapalný vodík chlazení na velmi nízkou teplotu nebo musí být organicky vázán např. tekutý organický nosič vodíku-LOHC. [56] Známostou metodou skladování a dopravy plynů jsou tlakové láhve, které jsou značeny červenou barvou, bezešvé a vyrobeny z legované chrommolybdenové oceli. Pro mobilní použití, kdy klademe podmínky na hmotnost či tvar nádrže se volí kompozitové nádrže. [56]

Velkou výhodou vodíku je dlouhodobé skladování beze ztrát v plynném skupenství. Kromě toho můžeme využít již stávající infrastrukturu pro zemní plyn. Plynný vodík lze dodávat na místa využití buď ve vysokotlakých zásobnících, nebo potrubím. Tyto zásobníky musí být odolné z důvodu nebezpečí výbuchu. Doprava vodíku potrubím je vhodné řešení, pokud je nutné přepravovat velká množství vodíku. Vodíkové potrubí se vyrábí z kovu nebo plastů a používá se buď prostřednictvím dnešní infrastruktury zemního plynu, nebo budováním nových potrubí výhradně pro přepravu vodíku se značně vysokými počátečními investicemi. Již zmíněná vodíková koroze výrazně zkracuje životnost potrubí. Je dále nutné vzít v úvahu i další rizikové faktory, jako je dynamické napětí a již existující trhliny. Máme možnost mísit vodík se zemním plynem, abychom předcházeli a redukovali tyto faktory. [55]

Již dříve zmíněný projekt European Hydrogen Backbone by měl výrazně snížit cenu za dopravu, kdy 1 kg vodíku by měl stát při transportu na 1000 km průměrně 0,11-0,21 EUR za kg vodíku, což z tohoto projektu činí nákladově efektivní volbu pro přepravu vodíku na dlouhé vzdálenosti, která pokoří i lodní dopravu na vzdálenosti v rámci Evropy a sousedních regionů. [55]

Pro některé oblasti, kde je vyžadována vysoká spotřeba vodíku, je efektivnější kapalný vodík. Aby vodík zkondenzoval, je nutné dosáhnout výše zmíněné teploty varu, tedy $-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy tento proces je velice cenově náročný a probíhá ve 4 krocích. Vodík se stlačí, plyn se předchladí kapalným dusíkem pod inverzní teplotu, následně probíhá expanze v turbíně, plyn se roztahuje a jeho teplota klesá, posledním krokem je expanze na Joule-Thomsonově ventilu, plyn se ochlazuje až dochází ke kondenzaci. Výhodou přepravy v kapalném stavu je možnost většího množství i na mezikontinentální vzdálenosti. Využívají se vícevrstevné nádoby s vysokými izolačními vlastnostmi a maximálním přetlakem 0,5 MPa, aby nedocházelo k překročení teploty tání a zpětné změně skupenství. [57]

5. Spalovací komora kotle

Kotel je energetické tepelné zařízení, kde probíhá chemická transformace energie vázané v palivu na energii tepelnou. Vývoj spalovací techniky sebou přinesl kotel jako technologický celek, který slouží k výrobě tepla, ohřevu vody a výrobě páry. [28] Skládá se ze spalovací části, která obsahuje spalovací zařízení včetně jeho příslušenství, a část výměníková, která tvoří tlakový systém. Postupem času vznikly celé řady kotlů, které můžeme rozdělit do několika skupin, často podle [29]:

- účelu využití,
- provedení ohniště,
- druhu spalovaného paliva,
- konstrukce výparníku,
- systému oběhu a tlaku teplotonosné látky.

Kotle můžeme obecně rozdělit na žárotrubné a vodotrubné. U žárotrubných kotlů spaliny proudí uvnitř plamenců a ohřívání médium (voda či parovodní směs) se pohybuje vně trubek. Co se týče vodotrubných kotlů, spaliny a voda jsou v opačném řazení. Tyto kotle jsou velmi často využívány ve většině aplikacích.

Vliv na konstrukci kotle mají tyto faktory [2], [29]:

- nominální výkon,
- palivová základna a uspořádání spalovacího procesu,
- emisní limity vychlazených spalin,
- parametry tlaků a teploty pracovních médií.

Popularita kotlů na plyná paliva je v posledních na vzestupu a kotle na pevná paliva či kapalná paliva jsou upozaďovány. Hlavními benefity plynových kotlů je jednoduché palivové hospodářství, snadná regulace, vyšší účinnost spalování a nižší emise. Hlavními parametry plynových kotlů jsou tlaky a teploty teplotonosného média. [29]

5.1 Vytyčení spalovací komory

Jedná se o stěnami vymezené místo kotle, kde dochází k chemickým procesům hoření a exotermickému uvolnění daného množství tepla. Výrazných rozdílů se dosahuje použitím spalovaného paliva. V případě plynových kotlů jde o ohniště plynová, kombinovaná, nebo využívající odpadní teplo z teplých spalin.

Na spalovací komory klademe obvykle tyto nároky [41], [42]:

- minimální obestavěný prostor,
- dokonalé spálení přiváděného paliva s optimálním přebytkem spalovacího vzduchu a stabilita hoření,
- vysoká provozní účinnost využití tepla spalin,
- nízké hodnoty emisí oxidů dusíku,
- jednoduchá regulace,
- minimální vliv spalin na výhřevné plochy ve formě koroze nebo nánosů.

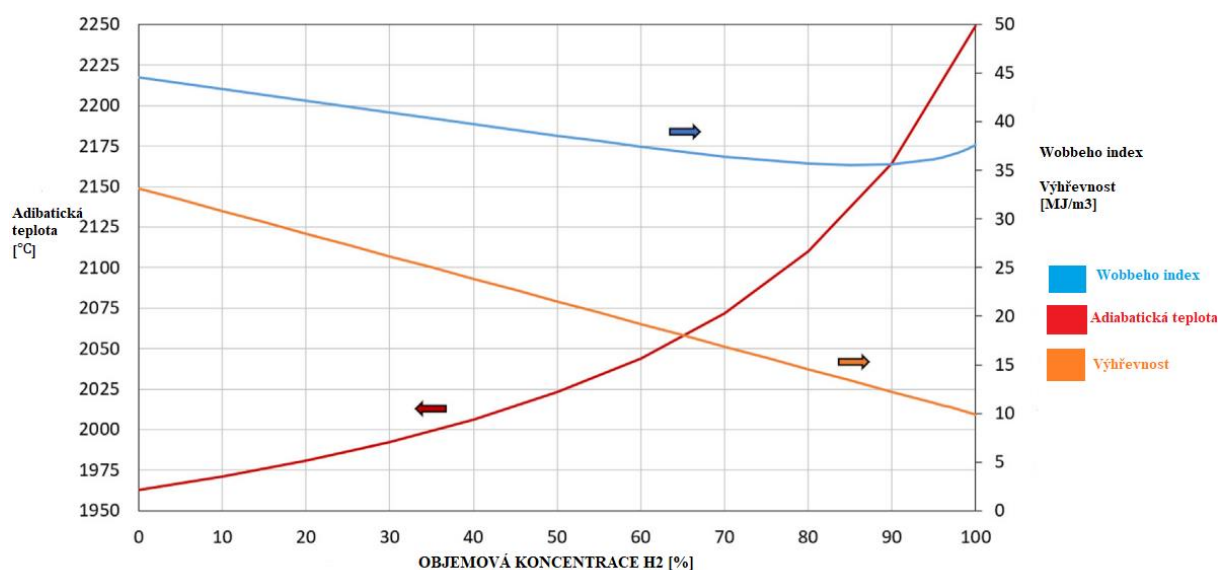
6. Spalování zemního plynu s příměsí vodíku [30]

Aby Evropská Unie dosáhla do roku 2050 cíle klimaticky neutrální teploty a čistší planety v rámci zelené dohody, bude nutné omezit spalování fosilních paliv a provést jejich náhradu. Velká naděje je vkládána do vodíku, který je neutrální z hlediska skleníkových plynů. Využití vodíku bude krok za krokem částečně nahrazovat zemní plyn. Spalování vodíku přináší jak benefity, tak určitá omezení, která bude nutná při návrhu a konstrukci tepelného energetického zařízení vzít v potaz.

Jednou z výhod vodíku je, že jej lze použít ve směsi se zemním plynem při spalování v kotli, dále ve spalovacích turbínách, které jsou stále poháněny pouze na zemní plyn. V současné době se staví několik elektráren, které budou spalovat zemní plyn, ale postupně přejdou výhradně na vodík, čímž se elektrárna stane bezemisní.

Oproti zemnímu plynem, bude nutné uvažovat odlišné meze výbušnosti, kdy vodík bude hořet s menším i vyšším množstvím vzduchu než zemní plyn. Tento rozsah činí obtížnější kontrolu hoření. Spolu s rychlostí plamene patří meze výbušnosti ke konstrukčním problémům.

Dalším omezením je adiabatická teplota plamene, která u spalování vodíku je přibližně o 250 °C vyšší než u spalování samotného zemního plynu (obr. 22). Ne všechna zařízení nebo konstrukční součásti vystavené vysokým teplotám jsou schopny toto zvýšení vydržet. Je tedy nezbytné zvážit materiály využití při konstrukci. Důsledkem vyšší teploty je možnost zvýšeného množství emisí NO_x.



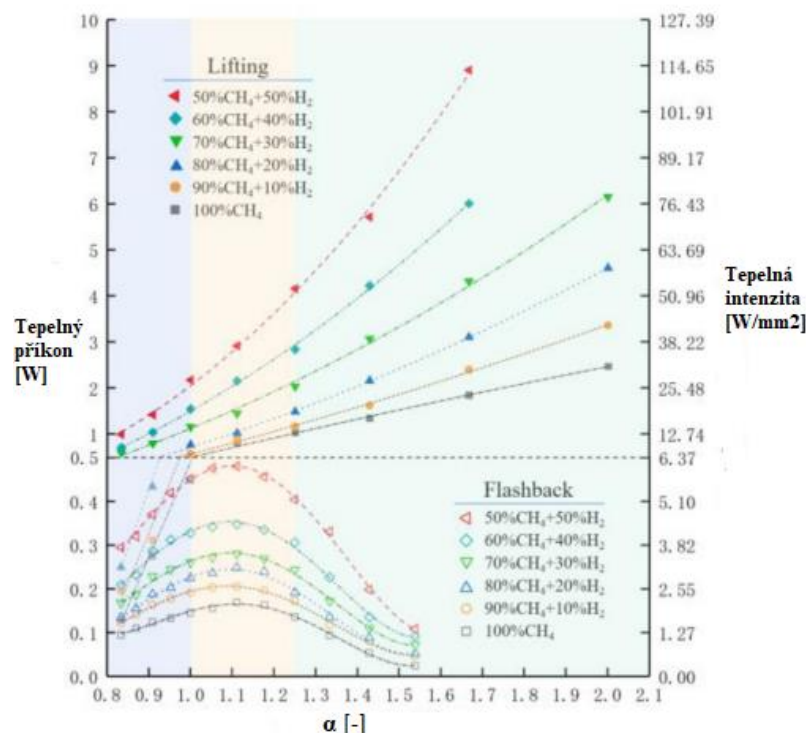
Obr. 22 Vliv příměsí vodíku na adiabatickou teplotu, výhřevnost a Wobbeho číslo [43]

6.1 Vliv přidavku vodíku na plamen

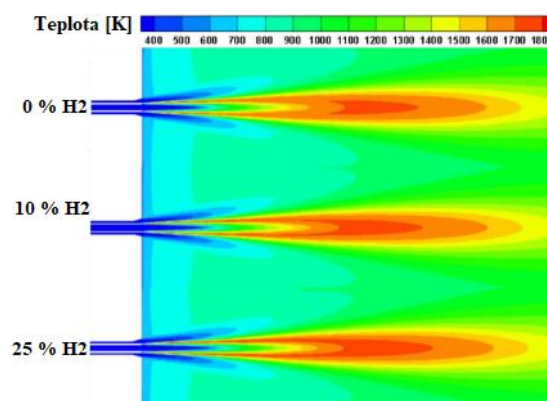
Zvyšování objemové koncentrace vodíku ve směsi se zemním plynem zvyšuje pravděpodobnost vzniku průšlehu v hořáku z důvodu vyšších spalovacích rychlostí, klesá stabilita plamene, kdy dochází k oddělení plamene od hořáku tzv. blow off. Stabilita plamene je převážně závislá na spalovací rychlosti a pro hořák je přípustné 20-25 % objemové koncentrace vodíku ve směsi se zemním plynem. S rostoucí objemovou koncentrací vodíku ve směsi se zemním plynem dochází k růstu spalovací teploty ve spalovací komoře, posouvá se poloha maximální teploty a roste rychlost spalování. [31]

Bylo provedeno měření s objemovou koncentrací vodíku v příměsi se zemním plynem v rozmezí 0-50 % při teplotách od 100–300 °C s přebytkem vzduchu v rozsahu $\alpha=0,8-2$. Měření ukázalo, že s rostoucím přebytkem vzduchu roste průšleh plamene a následně klesá viz. obr. 23. Maximální hodnota byla při hodnotě $\alpha = 1,1$ a oddělení plamene od hořáku roste postupně. Jak průšleh, tak oddělení plamene má vyšší tepelnou intenzitu spojenou s vyšší objemovou koncentrací vodíku. [31]

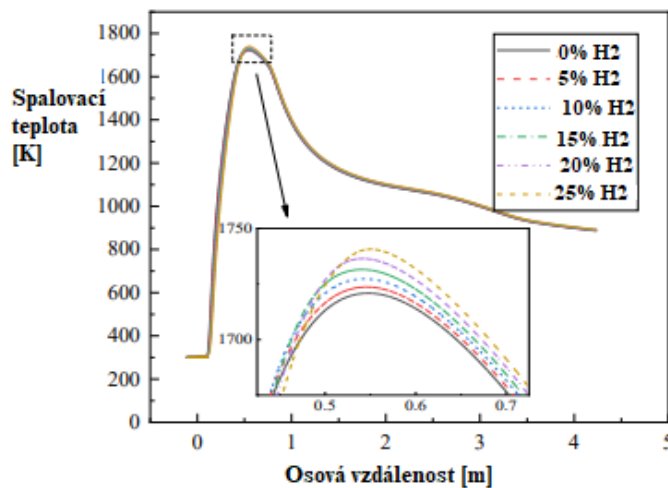
S rostoucí objemovou koncentrací vodíku ve směsi se zemním plynem dochází k růstu spalovací teploty ve spalovací komoře, posouvá se poloha maximální teploty (obr. 24) a roste rychlost spalování. Na obr. 25 lze vidět rozložení teploty v axiálním směru, kdy s rostoucí objemovou koncentrací vodíku, spalovací teplota postupně roste a pozice nejteplejšího místa se posouvuje. [32]



Obr. 23 Vliv přidavku vodíku na průšleh a na blow off [31] (upraveno)]



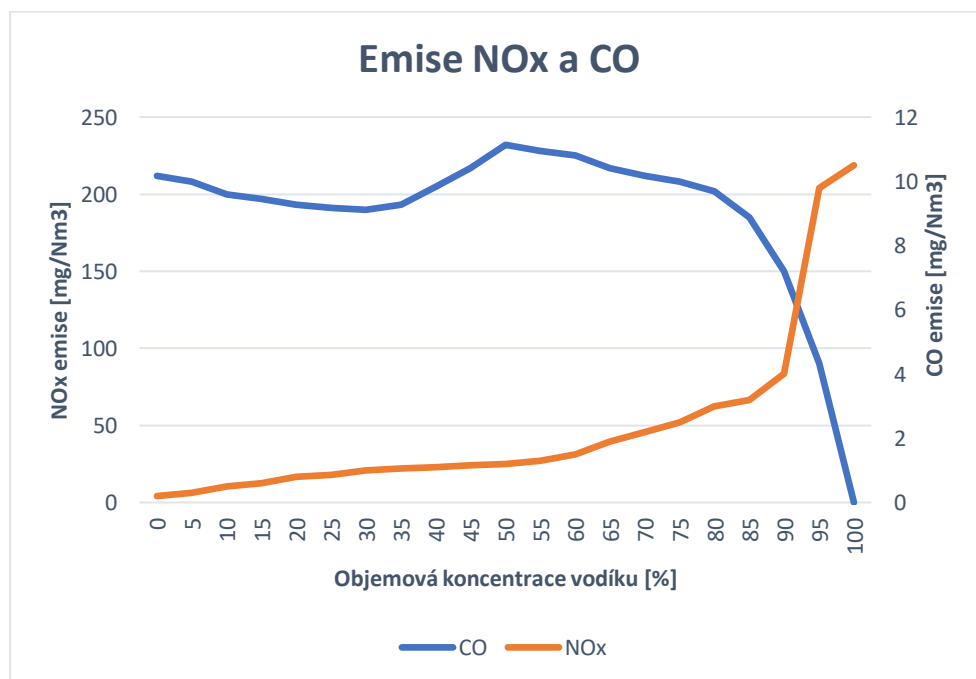
Obr. 24 Poloha maximální teploty [32] (upraveno)



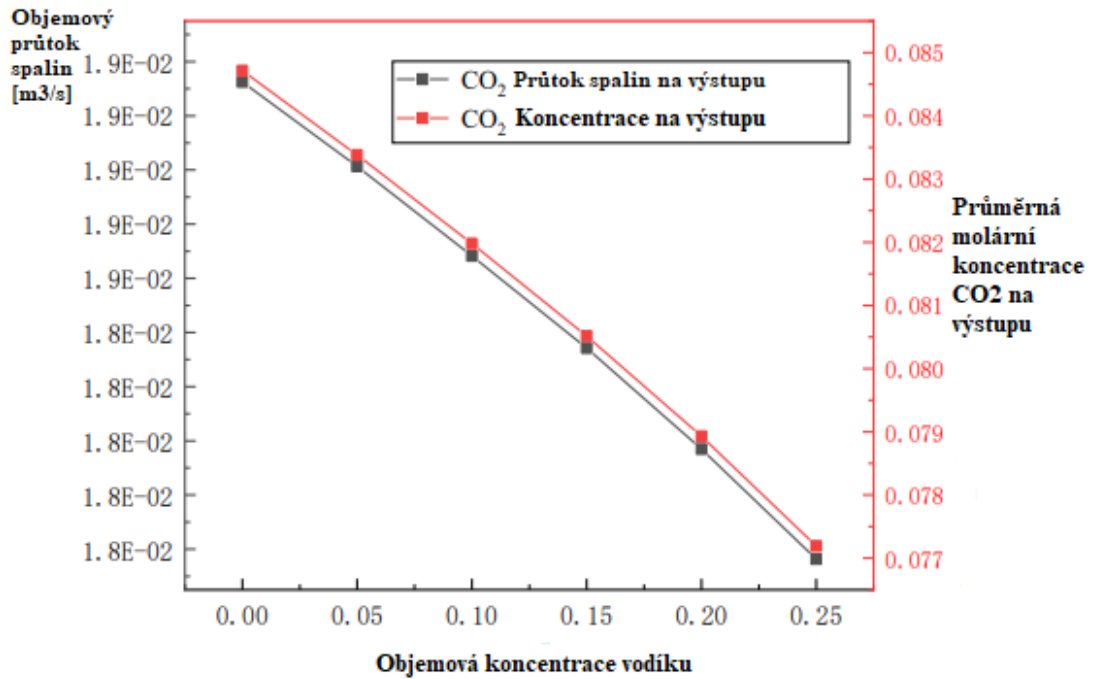
Obr. 25 Růst spalovací teploty a posun místa nejvyšší teploty [32] (upraveno)

6.2 Vliv přídavku vodíku na spaliny

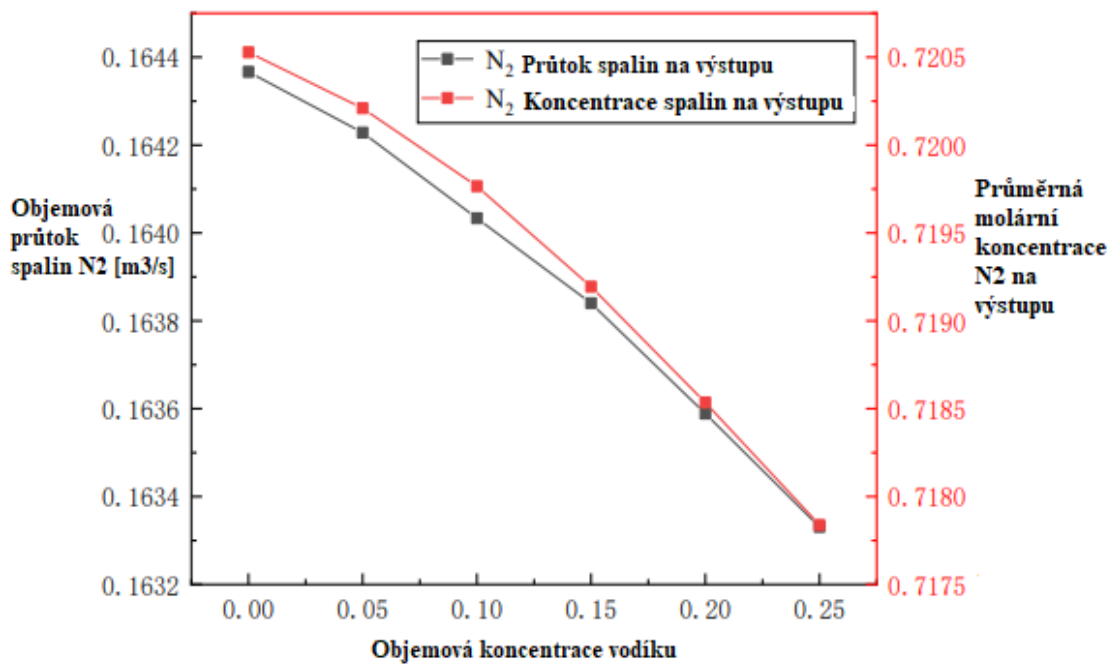
Se zvyšujícím se obsahem vodíku (obr. 26) se zpočátku emise NO_x mírně zvyšují a od objemové koncentrace 70 % vodíku ve směsi a zejména následně od 90 % emise NO_x rapidně rostou. Nárůst emisí NO_x je způsoben zejména tím, že tvorba termického NO je spojena s vyšší adiabatickou teplotou. Při měření spalín, s rostoucím podílem vodíku, emise CO_2 a N_2 ve spalínách klesají (obr. 27,28). Na druhé straně roste podíl H_2O ve spalínách viz. obr. 29. [32], [33]



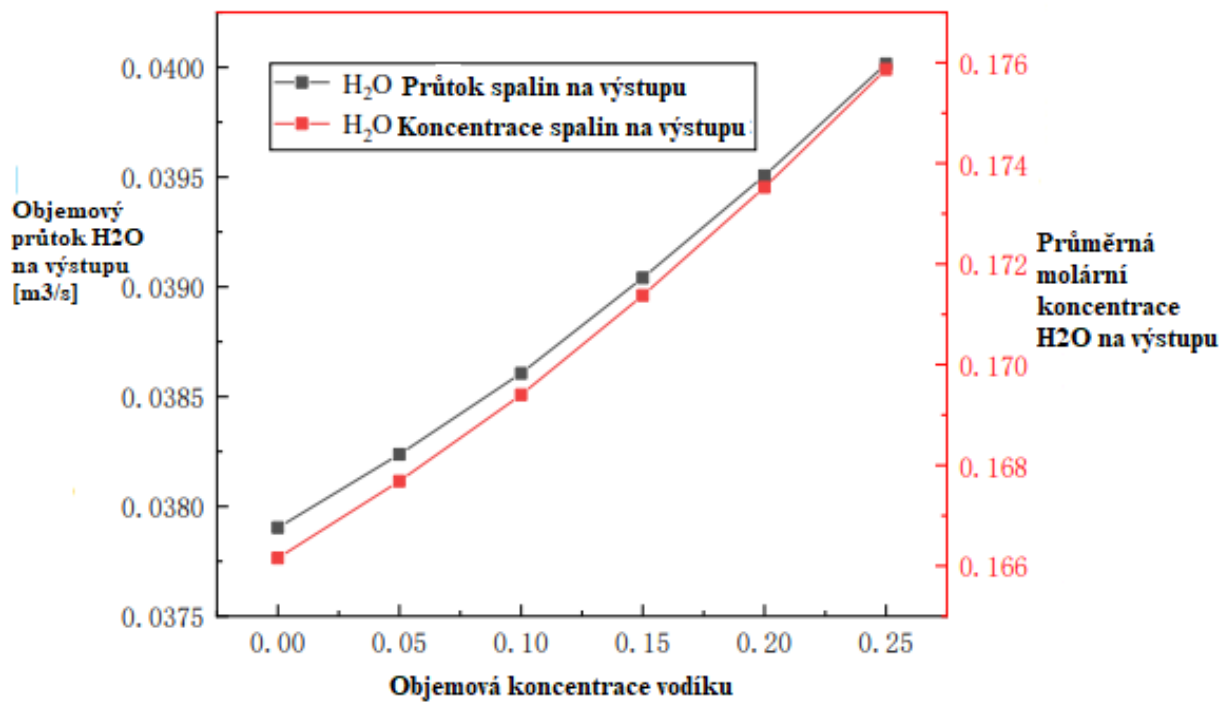
Obr. 26 Vliv vodíku na emise, CO a NO_x [33] (upraveno)



Obr. 27 Koncentrace CO₂ ve spalinách [32] (upraveno)

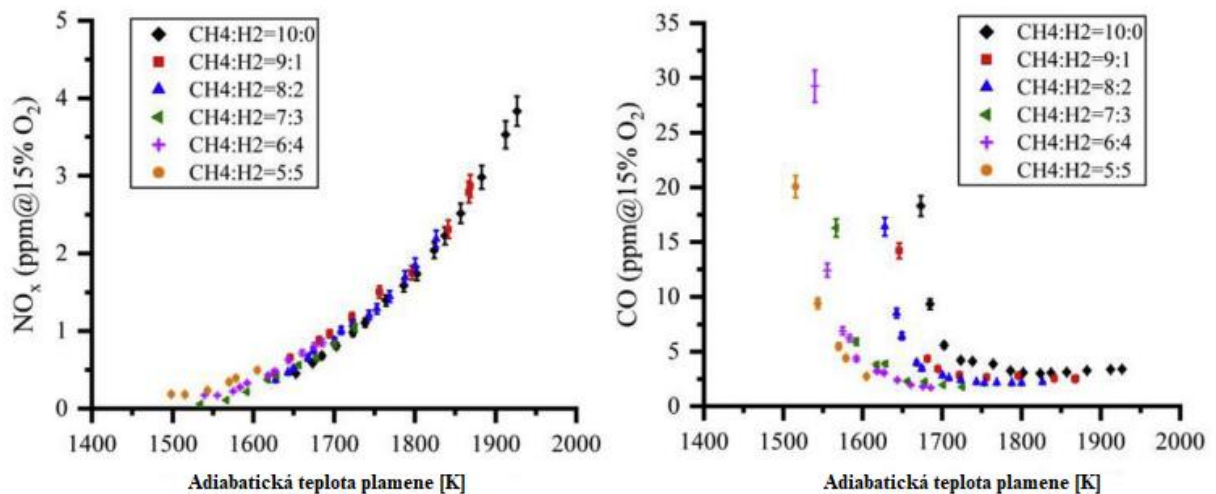


Obr. 28 Koncentrace N₂ ve spalinách [32] (upraveno)



Obr. 29 Koncentrace H₂O ve spalinách [32] (upraveno)

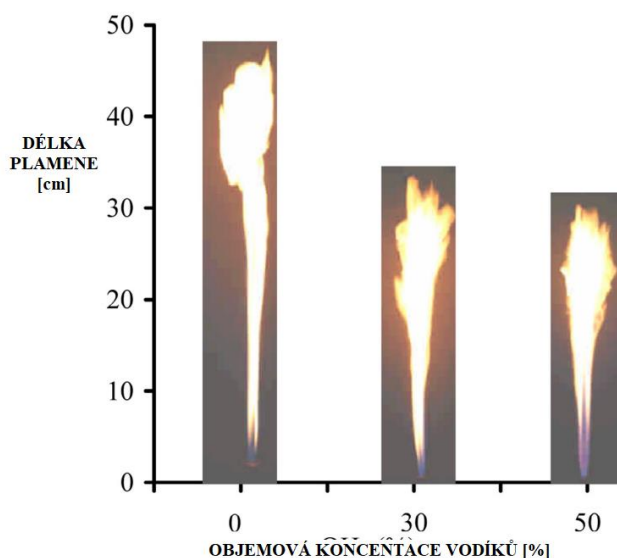
Další vliv na emise má adiabatická spalovací teplota, která je oproti spalování pouze zemního plynu mnohem vyšší. Podle obr. 30 je vidět, že obsah vodíku neměl velký vliv na tvorbu NO_x při adiabatickém spalování. Na druhé straně, CO s rostoucím obsahem vodíku klesá při stejné teplotě na výstupu ze spalovacího prostoru při stejné teplotě spalování. Hlavním důvodem je, že vodík zvýšil intenzitu reakce. [33], [34]



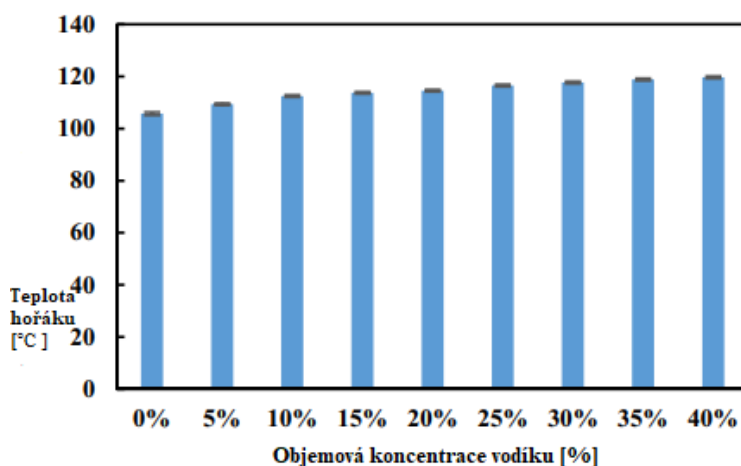
Obr. 30 Vliv adiabatické teploty na tvorbu spalin NO_x a CO [34] (upraveno)

6.3 Vliv přídavku vodíku na přenos tepla a tepelný výkon

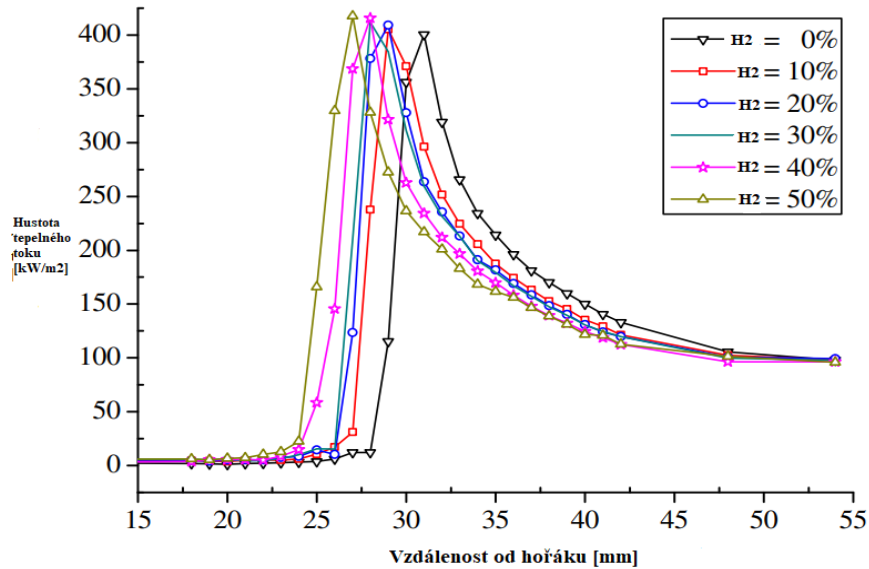
Vzhledem ke zkrácené délce plamene viz. obr. 31, ale vyšší teplotě plamene, dochází ke zvýšení hustoty tepelného toku, kde jeho maximum nacházíme blízko výstupu z hořáku spojenou s rostoucí objemovou koncentrací vodíku ve směsi viz. obr. 33. Dochází k přiblížení plamene k hořáku z důvodu vyšší rychlosti plamene vodíku a k růstu teploty stěn hořáku (obr. 32). Toto může vést až k poškození materiálu hořáku při vyšší koncentraci vodíku. Měření bylo prováděno v koncentraci vodíku v rozsahu 0–50 % a s přebytkem vzduchu $\alpha = 1$. Celkový tepelný tok podle obr. 34 nejdříve roste a následně klesá, kdy maximální hodnota je dosažena ve vzdálenosti od 18 mm do 24 mm, kdy bylo provedeno měření pouze pro variantu bez vodíku a s 50 % příměsí. Důvodem je jednoduše zkrácená délka plamene z důvodu příměsí vodíku. Bez příměsí vodíku je celkový tepelný tok 0,57 kW a pro příměs 50 % je hodnota výkonu 0,59 kW, tedy 3 % nárůst. [35], [36]



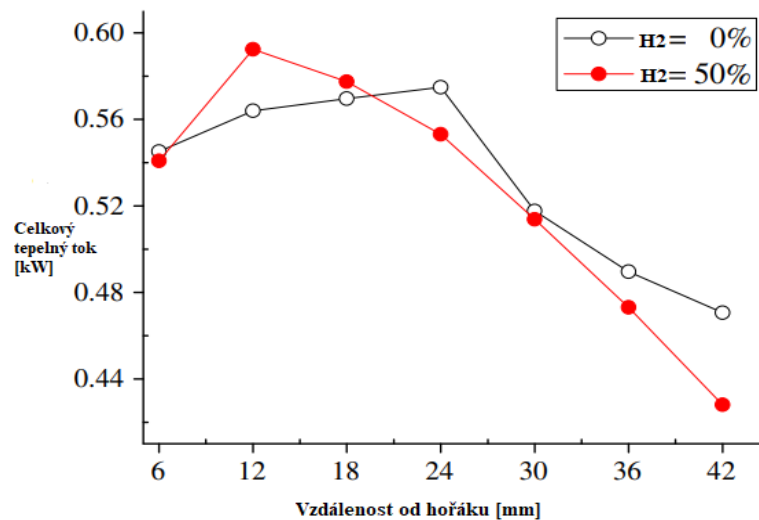
Obr. 31 Experimentální měření délky plamene v závislosti na koncentraci vodíku [46] (upraveno)



Obr. 32 Teplota hořáku v závislosti na příměsí vodíku a zkrácení plamene [48] (upraveno)

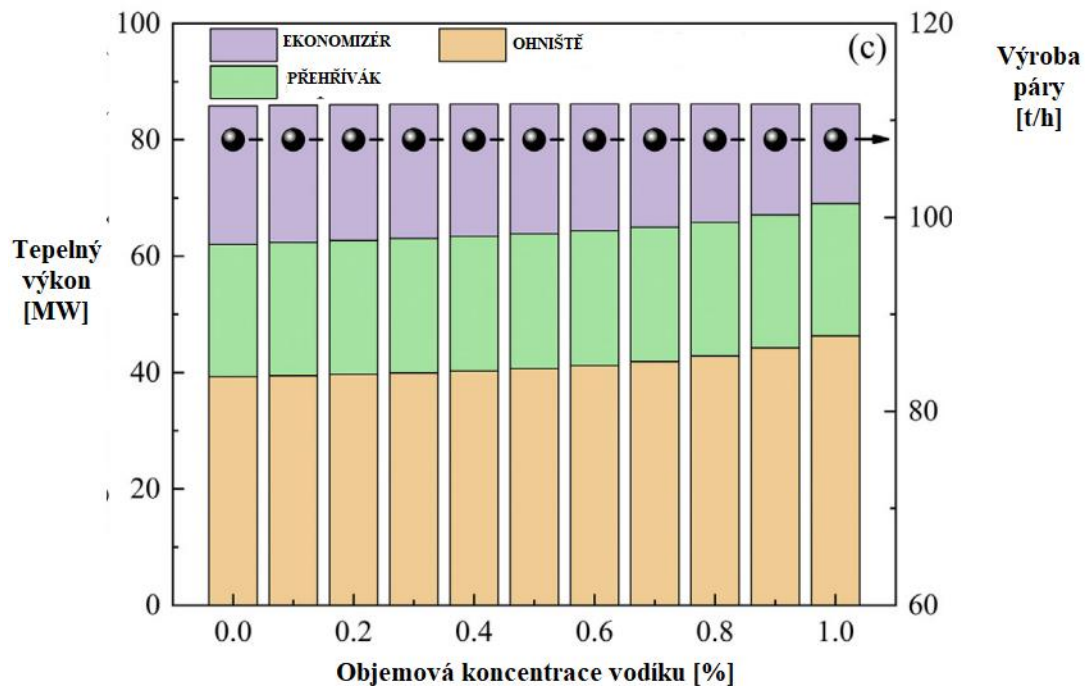


Obr. 33 Hustota tepelného toku v závislosti na koncentraci vodíku [35]



Obr. 34 Vliv vodíku na tepelný výkon [35]

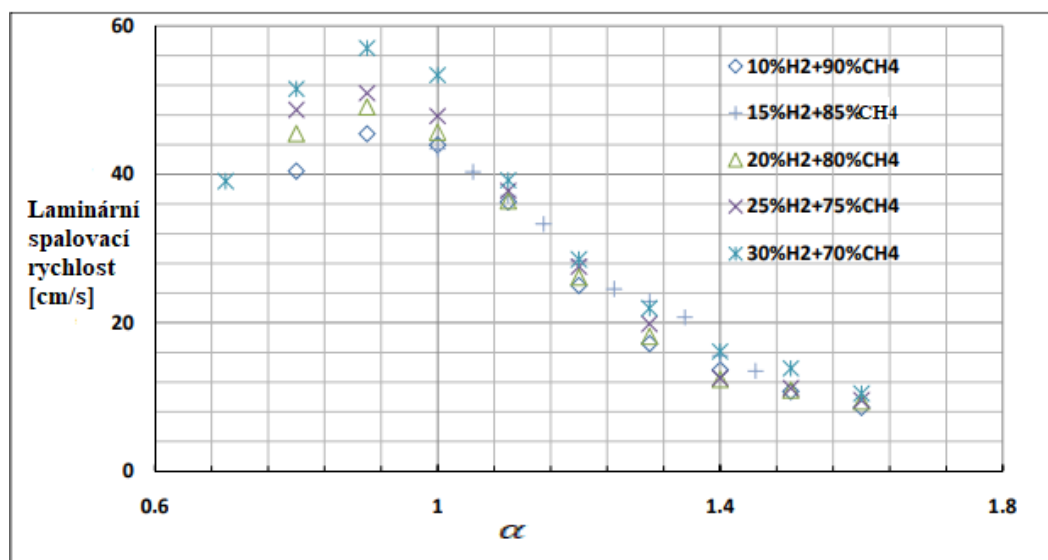
Jako další příklad lze uvést experiment, který byl proveden na parním kotli s výkonem 108 t/h s cílem změřit vliv příměsi vodíku se zemním plynem na termodynamickou účinnost. Měření bylo provedeno pro konstantní parametry výroby páry a konstantním přebytkem vzduchu. Při spalování samotného zemního plynu byla termodynamická účinnost kotle 94,1 % a při příměsi vodíku v objemové koncentraci 20 %, z důvodu bezpečnosti hořáků, vyšla termodynamická účinnost 94,2 %, tedy nedošlo k velkým změnám. [47] S odkazem na předchozí kapitolu, došlo ke zvýšení emisí NO_x z hodnoty 95 mg/MJ na 104 mg/MJ a hodnoty CO klesly z hodnoty 58,6 g/MJ na 54,5 g/MJ. Na obr. 35 lze pozorovat tepelné výkony ohniště, přehříváku a ekonomizéru, kde je možné vidět nepatrný nárůst tepelného výkonu v ohništi až při vyšších hodnotách objemové koncentrace vodíku. Při koncentracích 0–60 % vodíku lze pozorovat jen nepatrné zvýšení výkonu. [47]



Obr. 35 Výkon částí kotle v závislosti na objemové koncentraci vodíku ve směsi [47]

6.4 Vliv přidavku vodíku na spalovací rychlost

Při spalování CH_4 jako paliva jsme limitováni zvýšenou zápalností a zhoršené schopnosti spalování při chudé směsi. Přimísením vodíku, který má vysokou rychlost plamene, nižší teplotu zápalnosti a vysokou reaktivitu, získáme vyšší spalovací rychlost i snížíme teplotu vznícení. Přítomnost vodíku ve směsi mění reakci plamene a kinetiku hoření. Vliv příměsi vodíku na spalovací rychlost můžeme vidět na následujících obr. 36. [49]



Obr. 36 Vliv příměsi vodíku na spalovací rychlost [49]

Z obrázku lze vidět, že se zvyšující se objemovou koncentrací vodíku ve směsi se zvyšuje spalovací rychlost v případě chudé směsi ($\alpha < 1$), ale v oblasti bohaté směsi ($\alpha > 1$) nejsou vidět výrazné rozdíly.

6.5 Shrnutí

Spalování zemního plynu s příměsí vodíku přináší s sebou nové poznatky, které je a bude nutné vzít v úvahu při návrhu a konstrukci jednotlivých energetických zařízení. Jedná se převážně o vliv na vodíku na plamen, spaliny, přenos tepla a tepelný výkon.

V porovnání se spalováním samotného zemního plynu si všimneme, že po přidávání vodíku, začíná růst adiabatická teplota, plamen se zkracuje, dochází ke zvýšení spalovací rychlosti. Z důvodu zkracování plamene dochází k posuvu bodu s maximální teplotou směrem k hořáku, což může vést poškození materiálu. S vyšší objemovou koncentrací vodíku dochází k nežádoucímu vlivu průšlehu hořáku a oddělení plamene od hořáku. Abychom se těmto problémům vyvarovali, doporučená objemová koncentrace ve směsi je v rozmezí 20-25 %.

Hlavním cílem nahrazování zemního plynu vodíkem je snižování emisí. Se zvyšující se objemovou koncentrací mírně rostou emise NO_x ve spalinách. Od hodnoty 90 % rostou rapidně. Na druhé straně hodnoty emise, CO ve spalinách klesají, což je následkem snižování obsahu uhlíku v palivu. Přídavek vodíku má také za následek snížení emisí CO_2 způsobené snižujícím se podílem uhlovodíkového paliva. Vlivem přibývajících vodíku ve směsi, roste podíl H_2O ve spalinách z důvodu přídavku H_2 ve směsi. Velkou roli v tvorbě emisí je faktor adiabatické teploty. Obsah vodíku nemá podstatný vliv na tvorbu NO_x při adiabatickém spalování. Na druhé straně, CO s rostoucím obsahem vodíku klesá při stejné teplotě na výstupu ze spalovacího prostoru při stejné teplotě spalování.

S přibývajícím objemovou koncentrací vodíku mírně roste hustota tepelného toku, která následně klesá. Nepatrný nárůst dosáhneme i u celkového tepelného toku, který se nachází v blízkosti hořáku. Vliv vodíku na tepelný výkon je téměř nepatrný i co se týče termodynamické účinnosti. Vliv sálání je především závislý na teplotě, především u spalování zemního plynu než u spalování vodíku z důvodu CO_2 emisí při spalování zemního plynu vedle emisí H_2O . [53]

7. Výpočet vlivu přídatku vodíku na tepelný výkon ohniště

Zvolené rozměry ohniště:

- $a_{oh} = 3 \text{ m}$
- $b_{oh} = 2,5 \text{ m}$
- $h_{oh} = 6 \text{ m}$

Předpokládáme například kotel o parním výkonu 20 t/h, který produkuje přehřátou páru o teplotě 420 °C a tlaku 4.5 MPa. Teplota napájecí vody na vstupu do kotle je 120 °C.

Hmotnostní průtok páry: $m_{pp} = 5,55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Entalpie přehřáté páry: $i_{pp} = 3253 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Entalpie napájecí vody: $i_{nv} = 506,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Výrobní teplo páry: $Q_{vp} = m_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) = 15,24 \text{ MW}$ (7.1)

7.1 Stechiometrie a výpočet pouze pro zemní plyn

Výpočty spalování samotného zemního plynu, směsi s přídatkem vodíku a přepočty směsí jsou uvedeny v Příloze 1.

- Výhřevnost tranzitního zemního plynu:
 $Q_i = 35,79 \text{ MJ/m}^3$
- Minimální potřeba kyslíku při dokonalém spalování 1 m_n^{-3} plynného paliva při $\alpha = 1$ a výpočet je proveden s uvažováním pouze s objemovým podílem metanu $\omega_{CH_4} = 0,9832$, dusíku $\omega_{N_2} = 0,0084$ a oxidu uhličitého $\omega_{CO_2} = 0,0007$, kdy zanedbávám ostatní složky zemního plynu:

$$V_{O_2, \min} = 0,4997 \cdot (\omega_{H_2} + \omega_{CO}) + 0,9995 \cdot \left(X + \frac{Y}{4}\right) \cdot \omega_{C_X H_Y} - \omega_{O_2} \quad (7.2)$$

$$V_{O_2, \min} = 0 + 0 + 0,9995 \cdot \left(1 + \frac{4}{4}\right) \cdot 1 - 0 = 1,965 \frac{\text{m}_n^{-3}}{\text{m}_n^{-3}}$$

- Minimální množství suchého vzduchu ke spálení 1 Nm^3 plynného paliva:

$$V_{VS, \min} = \frac{V_{O_2, \min}}{0,21} = 9,359 \frac{\text{m}_n^{-3}}{\text{m}_n^{-3}} \quad (7.3)$$

- Minimální objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1 Nm^3 plynného paliva:

$$V_{VV, \min} = \chi_v \cdot V_{VS, \min} = 1,017 \cdot 9,36 = 9,515 \frac{\text{m}_n^{-3}}{\text{m}_n^{-3}} \quad (7.4)$$

- Výpočet χ_v :

$$\chi_v = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} = 1 + 0,7 \cdot \frac{2336,8}{100000 - 0,7 \cdot 2336,8} = 1,017 \quad (7.5)$$

kde: p_c ... celkový tlak

φ ... relativní vlhkost

p'' ... parciální tlak pro teplotu 20 °C

- Objem vodní páry v tomto objemu:

$$V_{H_2O}^V = V_{VV, \min} - V_{VS, \min} = 9,51 - 9,36 = 0,156 \frac{\text{m}_n^{-3}}{\text{m}_n^{-3}} \quad (7.6)$$

- Objem CO_2 ve spalinách:

$$V_{CO_2} = \omega_{CO_2} + 0,994 \cdot (\omega_{CO} + \omega_{CH_4}) + 0,0003 \cdot V_{VS, \min} \quad (7.7)$$

$$V_{CO_2} = 0,0007 + 0,994 \cdot (0 + 1 \cdot 1) + 0,0003 \cdot 9,359 = 0,981 \frac{\text{m}_n^{-3}}{\text{m}_n^{-3}}$$

- Objem N_2 ve spalinách:

$$V_{N_2} = \omega_{N_2} + 0,7805 \cdot V_{VS,min} \quad (7.8)$$

$$V_{N_2} = 0,0084 + 0,7805 \cdot 9,359 = 7,31 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$$

- Objem Ar ve spalinách:

$$V_{Ar} = \omega_{Ar} + 0,0092 \cdot V_{VS,min} \quad (7.9)$$

$$V_{Ar} = 0 + 0,0092 \cdot 9,359 = 0,086 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$$

- Výsledný objem suchých spalin:

$$V_{ss,min} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} = 0,981 + 7,31 + 0,086 = 8,380 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}} \quad (7.10)$$

- Objem vodní páry ve spalinách:

$$V_{H_2O}^S = \omega_{H_2O} + \omega_{H_2} + \frac{\gamma}{2} \cdot \omega_{CH_4} + V_{H_2O}^V \quad (7.12)$$

$$V_{H_2O}^S = 0 + 0 + \frac{4}{2} \cdot 1 + 0,156 = 2,12 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$$

- Minimální objem vlhkých spalin:

$$V_{SV,min} = V_{ss,min} + V_{H_2O}^S = 8,38 + 2,12 = 10,50 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}} \quad (7.13)$$

- Měrné entalpie složek spalin:

t	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Ar	vzduch
°C	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³
0	0	0	0	0	0	0
25	32,78	41,62	32,53	39,1	23,32	32,57
100	131,7	170	129,5	150,6	93,07	132,3
200	267	357,5	259,9	304,5	186	266,2
300	406,8	558,8	392,1	462,8	278,8	402,5
400	550,9	771,9	526,7	625,9	371,7	541,7
500	698,7	994,4	664	794,5	464,7	684,1
600	849,9	1225	804,3	968,8	557,3	829,6
700	1003	1462	947,3	1149	650,2	978,1
800	1159	1705	1093	1335	743,1	1129
900	1318	1952	1241	1526	835,7	1283
1000	1477	2203	1392	1723	928,2	1439
1100	1638	2458	1544	1925	1020	1597
1200	1802	2716	1698	2132	1114	1756
1300	1965	2976	1853	2344	1207	1916
1400	2129	3239	2009	2559	1300	2077
1500	2293	3503	2166	2779	1393	2240
1600	2465	3769	2325	3002	1577	2403
1800	2804	4305	2643	3458	1742	2732
2000	3138	4844	2965	3925	1857	3065
2500	4006	6204	3778	5132	2321	3909

Tab.4 Měrné entalpie složek spalin

Pomocí dostupných dat byla sestavena I-t tabulka spalín a spalovacího vzduchu pro $\alpha = 1$ a 1.05 pomocí vzorce:

$$I_s = I_{SPmin} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZmin} \quad (7.14)$$

I-t tabulka spalín				I_s	I_s
t [°C]	$I_{SPmin, 1}$	$I_{SPmin, 1.05}$	I_{VZmin}	$\alpha= 1$	$\alpha= 1.05$
0	0	0	0	0	0
25	363,7006	375,9939	304,8268	363,7006	391,2353
100	1441,394	1490,296	1238,213	1441,394	1552,206
200	2913,526	3011,685	2491,4	2913,526	3136,255
300	4421,682	4569,792	3767,049	4421,682	4758,144
400	5969,158	6168,135	5069,839	5969,158	6421,627
500	7557,279	7808,154	6402,579	7557,279	8128,283
600	9187,346	9491,258	7764,332	9187,346	9879,474
700	10855,98	11213,97	9154,163	10855,98	11671,67
800	12562,56	12975,64	10566,46	12562,56	13503,97
900	14300,46	14769,53	12007,76	14300,46	15369,92
1000	16076,95	16603,14	13467,78	16076,95	17276,53
1100	17875,22	18458,94	14946,53	17875,22	19206,27
1200	19701,87	20343,89	16434,63	19701,87	21165,63
1300	21548,31	22249,04	17932,09	21548,31	23145,65
1400	23411,37	24171,2	19438,91	23411,37	25143,15
1500	25293,34	26112,67	20964,45	25293,34	27160,9
1600	27206,1	28086,08	22489,98	27206,1	29210,58
1800	31039,28	32039,76	25569,14	31039,28	33318,21
2000	34923,7	36046	28685,73	34923,7	37480,29
2500	44804,52	46235,39	36584,83	44804,52	48064,63

Tab. 5 I-t tabulka spalín pouze pro metan

Přepoččet objemů složek spalín pro přebytek vzduchu $\alpha = 1,05$:

- Objem CO₂:

$$V_{CO_2}^{1,05} = V_{CO_2} + (\alpha - 1) \cdot V_{VS,min} \cdot 0,0003 = 0,981 + (1,05 - 1) \cdot 9,359 \cdot 0,0003$$

$$V_{CO_2}^{1,05} = 0,9809 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}} \quad (7.15)$$

- Objem N₂:

$$V_{N_2}^{1,05} = V_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot V_{VS,min} \cdot 0,7806 = 7,31 + (1,05 - 1) \cdot 9,359 \cdot 0,7806$$

$$V_{N_2}^{1,05} = 7,68 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}} \quad (7.16)$$

- Objem Ar:

$$V_{Ar}^{1,05} = V_{Ar} + (\alpha - 1) \cdot V_{VS,min} \cdot 0,0092 = 0,086 + (1,05 - 1) \cdot 9,359 \cdot 0,0092$$

$$V_{Ar}^{1,05} = 0,090 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}} \quad (7.17)$$

- Objem O₂:

$$V_{O_2}^{1,05} = V_{O_2} + (\alpha - 1) \cdot V_{VS,min} \cdot 0,21 = 0 + (1,05 - 1) \cdot 9,359 \cdot 0,21$$

$$V_{O_2}^{1,05} = 0,098 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}} \quad (7.18)$$

- Objem vodní páry:

$$V_{H_2O}^{1,05} = V_{H_2O}^S + (\alpha - 1) \cdot V_{H_2O}^V = 2,12 + (1,05 - 1) \cdot 0,156 \quad (7.19)$$

$$V_{H_2O}^{1,05} = 2,13 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$$

Celkový objem suchých a vlhkých spalin:

$$V_{SS}^{1,05} = V_{CO_2}^{1,05} + V_{N_2}^{1,05} + V_{Ar}^{1,05} + V_{O_2}^{1,05} = 0,9809 + 7,68 + 0,090 + 0,098 \quad (7.20)$$

$$V_{SS}^{1,05} = 8,848 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$$

$$V_{SV}^{1,05} = V_{SS}^{1,05} + V_{H_2O}^{1,05} = 8,848 + 2,13$$

$$V_{SV}^{1,05} = 10,978 \frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$$

7.2 Tepelné ztráty kotle a účinnost ohniště

U plynových kotlů se nevyskytují ztráty mechanickým nedopalem a fyzickým teplem tuhých zbytků. Zahrnujeme pouze ztrátu chemickým nedopalem, komínovou ztrátu a ztrátu sáláním do okolí.

- Komínová ztráta:

$$z_k = \frac{I_{SP,85} - \alpha \cdot I_{vz,25}}{Q_i} = \frac{1320 - 1,05 \cdot 304,82}{35790} = 0,0279 \quad (7.21)$$

Entalpie spalin při teplotě 85 °C se získá lineární interpolací z tab. 5. Entalpie vzduchu při 25 °C se opět získá z tab.5.

- Ztráta chemickým nedopalem:

$$z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot V_{SS,min}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_i} = \frac{0,2116 \cdot 100 \cdot 8,38}{(21 - 3) \cdot 35790} = 2,75 \cdot 10^{-4} \quad (7.22)$$

Emisní limit CO: $mgCO = 100 \text{ mg/Nm}^3$

Obsah kyslíku pro referenční stav: $O_{2ref} = 3 \%$

- Ztráta sáláním do okolí:

po odečtení z grafu $z_{so} = 0,0117$

Celková účinnost ohniště:

$$\eta_o = 1 - z_k - z_{co} - z_{so} = 1 - 0,0284 - 2,75 \cdot 10^{-4} - 0,0117 = 0,96 \quad (7.23)$$

$$\text{Množství paliva přivedeného do kotle: } m_{pal} = \frac{Q_{vp}}{Q_i \cdot \eta_o} = \frac{15241}{35870 \cdot 0,960} = 0,44 \frac{m^3}{s} \quad (7.24)$$

7.3 Tepelný výpočet ohniště

Tepelný výpočet ohniště je založen na použití teorie podobnosti v tepelných procesech ve spalovacích komorách v závislosti na čtyřech podobnostních kritériích, a to:

- Teplotě nechlazeného plamene t_{ad}
- Součiniteli M
- Boltzmannově čísle B_o
- Stupni černosti ohniště a_o

Obecně v prostoru ohniště určujeme 4 základní teploty, a to:

- teoretickou teplotu spalování
- teplotu nechlazeného plamene
- teplotu na konci ohniště
- střední teplotu plamene

Teoretická teplota spalování je teplota, kterou by měly produkty spalování v adiabatickém a stechiometrickém procesu spalování. Závisí pouze na vlastnostech paliva a určuje se z I-t diagramu.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.4 adiabatická teplota uvažuje dokonalé spalování s definovaným přebytkem vzduchu, kde neuvažujeme odvádění tepla. Teplota nechlazeného plamene závisí na výhřevnosti, na teplotě vzduchu, přebytku vzduchu v ohništi, na poměrné recirkulaci a teplotě recirkulovaných spalin.

Teplotu na konci ohniště určujeme pomocí Gurvičova poloempirického vzorce pro poměrnou teplotu spalin:

$$\theta_{ok} = \frac{Bo^{0,6}}{(M \cdot a_0^{0,6} + Bo^{0,6})} \quad (7.25)$$
$$t_{ok}^{skut} = \frac{273,15 + t_{ad}}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15$$

Součinitel M je bezrozměrná veličina respektující polohu hořáků, respektive polohu maximálního tepelného toku. Závisí na poloze maximální teploty plamene a spalovaném palivu. M určíme pomocí rovnice:

$$M = A - B \cdot x \quad (7.26)$$

kde A, B jsou konstanty paliva a x je součinitel polohy maximální teploty plamene. Pro spalování plynu a mazutu je

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x$$

Poloha maximálního plamene zahrnuje poměrnou výšku hořáku x_h a korekci plamene Δx , která zohledňuje naklápění hořáků a jejich umístění. [62]

Boltzmannovo číslo je podobnostní kritérium přenosu tepla v ohništi, které bylo vytvořené pro návrh ohniště. Závisí na množství paliva přivedeného do kotle, účinné sálavé ploše, univerzální Stefanově-Boltzmannově konstantě, teplotě nechlazeného plamene, střední tepelné jímavosti v ohništi a součiniteli uchování tepla, který je závislý na účinnosti kotle a jeho ztrátách. [63]

Stupeň černosti ohniště charakterizuje sálavé vlastnosti plamene a produkty spalování v ohništi. K jeho určení slouží výpočtová metoda jejíž postup se liší na druhu použitého paliva. Metoda předpokládá zeslabení sálavého toku v důsledku přítomnosti tuhých částic a tříatomových plynů. [63]

Prostor ohnišť je vyplněn horkými spalinami v hořákové oblasti především plamenem. Intenzita sálání závisí na konstrukčních rozměrech ohniště, zejména na tvaru, tloušťce plynové vrstvy, složení plynů a teplotě. Tloušťku plynové vrstvy je nesnadné stanovit s přihlédnutím na odlišné tvary ohnišť (válec, kvádr atd.). Proto byl zaveden tzv. ekvivalentní poloměr, který je totožný s účinnou tloušťkou plynu, kdy složitý tvar se převede na polokulovitý prostor. Využívá se následujícího vztahu, kdy hodnota se volí podle tvaru ohniště. [62]

$$s = (3,6 - 4) \cdot \frac{V_o}{F_{st}} \quad (7.27)$$

Ke stanovení stupně černosti plamene se používá poloempirická metoda a liší se podle druhu paliva. Plamen považujeme za plynné těleso, kdy ho můžeme rozdělit na svítivý, nesvítivý a polosvítivý. U plamene nesvítivého dochází k sálání pouze tříatomových plynů a vzniká při spalování antracitů a plynů, kde se netvoří saze. Plamen svítivý vzniká při spalování kapalných paliv a tuhých paliv s vysokým podílem prchavé hořlaviny. Polosvítivý plamen nalezneme u spalování hnědých a černých uhlí. [63]

U ohnišť parních kotlů se na sálání podíly spaliny, plamen či vznášející se tuhé částice. Na sálání se podílí převážně tři i více atomové plyny, převážně CO₂ a H₂O. V palivu obsažený vodík a uhlík se spalují současně. Vodík má větší vztah ke kyslíku než uhlík, kdy uhlík zůstává jemně rozptýlen v plameni, kdy dochází k tvoření sazí a jejich žhnutí způsobuje svítivost plamene. Černost plamene je závislá na svítivosti plamene případně nesvítivosti. [62]

Je nutné brát v úvahu nánosy na stěnách ohniště zanesené popelem. Nánosy mají rozdílnou tloušťku, složení a jejich rozložení závisí na konstrukci ohniště, spalovaném palivu a jakým způsobem provozujeme kotel. Toto vše respektuje tzv. součinitel zanesení stěn ohniště ζ , který zjištěn pomocí experimentů z měření na kotlích v provozu. Z důvodu vytvoření vrstvy popílku na povrchu způsobuje zvýšení teploty. Velké zvýšení teploty povrchu nánosu bylo zjištěno i u ohnišť na zemní plyn, kde prach v plameni pochází z přiváděného vzduchu z atmosféry. Tento součinitel zmenšuje množství tepla předaného sáláním v ohništi. Závisí na spalovaném palivu, typu ohniště, výkonu kotle, na provozních a aerodynamických poměrech. Obecně lze stanovit součinitel zanesení stěn ohniště ζ ze vztahu:

$$\zeta = \frac{T_m^4 - T_a^4}{T_m^4 - T'^4} \quad (7.28)$$

kde T_m [K] je střední teplota ve varnicích, T_a [K] je teplota povrchu stěny a T' [K] je teplota vody ve varnicích. [62]

Součinitel tepelné efektivity stěn ψ je závislý na úhlovém součinitele osálání x_u , závislém na uspořádání trubek (pro membránovou stěnu $x_u = 1$), a součiniteli zanesení stěn ohniště ζ zmíněném výše.

Při spalování plyných paliv je poměrná část objemu ohniště m zaplněna svítivým plamenem a zbývající část nesvítivým plamenem. Součinitel m se volí s ohledem na poměrné zatížení ohniště. V mezích zatížení 0,4 až 1,2 MW.m⁻³ se určí m pomocí lineární interpolací. [64]

Ve vzorcích pro součinitel zeslabení sálání částicemi sazí k_{sz} a součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny k_{s,r_s} je mnoho konstant, kde nelze popsat jejich fyzikální význam.

7.3.1 Stanovení teploty nechlazeného plamene

Teplu přivedené vzduchem (teplotu vzduchu volím 80 °C):

$$Q_{vz} = \alpha \cdot I_{VZ,80} = 1,05 \cdot 989 = 1038,5 \frac{kJ}{kg} \quad (7.29)$$

Celkové užitečné teplo uvolněné v ohništi:

$$Q_u = Q_i \cdot (1 - z_{co}) + Q_{vz} = 35790 \cdot (1 - 2,74 \cdot 10^{-4}) + 1038,5 = 36818,6 \text{ kJ/m}^3 \quad (7.30)$$

Stanovení teploty nechlazeného plamene:

$$t_{ad} = f(Q_u) = 1968 \text{ °C}$$

7.3.2 Teplota na konci ohniště

Na počátku odhadnu teplotu na konci ohniště a dopočítám entalpii z tab. 5.

$$t_{ok} = 1400 \text{ °C}, I_{ok} = 25572 \text{ kJ/m}^3$$

Střední tepelná jímavost v ohništi:

$$(O_s \bar{c}_s)_o = \frac{Q_u - I_{ok}}{t_{ad} - t_{ok}} = \frac{36818 - 25572}{1968 - 1400} = 19,80 \frac{kJ}{m^3 \cdot \text{°C}} \quad (7.31)$$

Součinitel uchování tepla:

$$\varphi = 1 - \frac{z_{co}}{\eta_k + z_{co}} = 0,9996 \quad (7.32)$$

Součinitel tepelné efektivity stěn:

$$\psi = x_u \cdot \zeta = 1 \cdot 0,65 = 0,65$$

kde: x_u je úhlový součinitel osálení pro membránovou stěnu, ζ je součinitel zanesení stěn ohniště.

Součinitel M:

$$M = 0,54 - 0,2 \cdot x_{pl} = 0,47$$

Podmínka $M \leq 0,48$

Poloha maximální teploty plamene:

$$x_{pl} = x_h + \Delta x = 0,2 + 0,15 = 0,35 \quad (7.33)$$

kde Δx je korekce plamene, x_h je poměrná výška hořáku.

Poměrná výška hořáku:

$$x_h = \frac{h_h}{h_0} = \frac{1,1}{5,5} = 0,2 \quad (7.34)$$

Kde výšku hořáku h_h volím s ohledem na součinitel M a h_0 vypočítám pomocí vzorce:

$$h_0 = h_{oh} - \frac{g}{2} = 6 - \frac{1}{2} = 5,5 \text{ m} \quad (7.35)$$

kde g je šířka tahu.

Stupeň černosti ohniště:

$$a_o = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \psi} = \frac{0,2781}{0,2781 + (1 - 0,2781) \cdot 0,65} = 0,37 \quad (7.36)$$

Stupeň černosti plamene:

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0,1 \cdot 0,49 + (1 - 0,1) \cdot 0,255 = 0,2781 \quad (7.37)$$

Stupeň černosti nesvítivé části ohniště:

$$a_{ns} = 1 - e^{-k_s \cdot r_s \cdot p_c \cdot s} = 1 - e^{-1,47 \cdot 0,1 \cdot 2} = 0,255 \quad (7.38)$$

Stupeň svítivé části plamene:

$$a_{sv} = 1 - e^{-(k_s \cdot r_s + k_{sz}) \cdot p_c \cdot s} = 1 - e^{-(1,47 + 1,89) \cdot 0,1 \cdot 2} = 0,49 \quad (7.39)$$

Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí:

$$k_{sz} = 0,306 \cdot (2 - \alpha) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{273,15 + t_{ok}}{1000} - 0,5\right) \cdot \frac{C_r}{H_r} \quad (7.40)$$

$$k_{sz} = 0,306 \cdot (2 - 1,05) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{273,15 + 1400}{1000} - 0,5\right) \cdot 3 = 1,89 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Poměr obsahu vodíku a uhlíku v původním vzorku:

$$\frac{C_r}{H_r} = 0,12 \cdot \sum \left(\frac{m}{n}\right) \cdot (C_m H_n)_i = 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 1\right) \cdot 100 = 3 \quad (7.41)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny:

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + t_{ok}}{1000}\right) \cdot r_s \quad (7.42)$$

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,194}{\sqrt{0,0283 \cdot 2,1}} - 1,02\right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{273,15 + 1400}{1000}\right) \cdot 0,283 = 1,47 \frac{1}{m \cdot MPa}$$

Účinná tloušťka sálové vrstvy:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_o}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{a_{oh} \cdot b_{oh} \cdot h_{oh}}{2 \cdot (a_{oh} \cdot b_{oh} + a_{oh} \cdot h_{oh} + b_{oh} \cdot h_{oh})} \quad (7.43)$$

$$s = 3,6 \cdot \frac{45}{2 \cdot (3 \cdot 2,5 + 3 \cdot 6 + 2,5 \cdot 6)} = 2,0 \text{ m}$$

Parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách:

$$p_s = r_s \cdot p_c = 0,283 \cdot 0,1 = 0,0283 \text{ MPa} \quad (7.44)$$

Objemové podíly tříatomových plynů:

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{VV, min}}{V_{SV, min} + (\alpha - 1) \cdot V_{VV, min}} \quad (7.45)$$

$$r_{H_2O} = \frac{2,12 + (1,017 - 1) \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,515}{10,50 + (1,05 - 1) \cdot 9,515} = 0,194$$

$$r_{RO_2} = \frac{V_{CO_2}^\alpha}{V_{SV, min} + (\alpha - 1) \cdot V_{VV, min}} \quad (7.46)$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,997}{11,68 + (1,05 - 1) \cdot 9,68} = 0,089$$

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,194 + 0,089 = 0,283$$

Boltzmannovo číslo:

$$B_0 = \frac{\varphi \cdot m_{pal} \cdot (O_s \bar{c}_s)_o}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \psi \cdot F_{st} \cdot (273,15 + t_{ad})^3} \quad (7.47)$$

$$B_0 = \frac{0,9969 \cdot 0,44 \cdot 19,82}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,65 \cdot 81 \cdot (273,15 + 1968)^3} = 0,260$$

Teplota na konci ohniště:

$$t_{ok}^{skut} = \frac{273,15 + t_{ad}}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_0}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad (7.48)$$

$$t_{ok}^{skut} = \frac{273,15 + 1968}{1 + 0,47 \cdot \left(\frac{0,37}{0,260}\right)^{0,6}} = 1416 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entalpie odpovídající této teplotě je $i_{ok} = 25465,72 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$

Tepelný výkon v prostoru ohniště:

$$Q_o = m_{pal} \cdot (1 - z_{SO}) \cdot (Q_u - i_{ok}) \quad (7.49)$$

$$Q_o = 0,44 \cdot (1 - 0,0117) \cdot (36818 - 25465,72) = 4979,61 \text{ kW} \quad (7.50)$$

7.4 Výpočet vlivu přídavku vodíku

V této části jsem provedl výpočet vlivu přídavku vodíku ve směsi zemním plynem a sledoval, jak se mění určité parametry jako například adiabatická teplota, výhřevnost paliva, množství paliva přivedeného do kotle nebo výkon v ohništi. Při každém přidání vodíku do směsi bylo nutné přepočítat vlastnosti paliva viz. tab. 6, neboť se měnila jeho výhřevnost. Přepočty objemových podílů složek a nové hodnoty výhřevností jsou uvedeny v následující tabulce.

Složka ZP	Objemový podíl složky vodíku v zemním plynu [%]								
	5	10	15	20	25	30	50	70	100
CH₄	98,32	88,5	83,57	78,7	73,74	68,82	49,16	29,50	0
CO₂	0,066	0,063	0,059	0,056	0,052	0,049	0,035	0,021	0
N₂	0,798	0,756	0,714	0,672	0,630	0,588	0,420	0,252	0
H₂	5	10	15	20	25	30	50	70	100

Tab. 6 Složení zemního plynu pro jednotlivé složení

OBJEMY SPALIN							
podíl H ₂ [%]	$V_{CO_2}^{1,05}$	$V_{N_2}^{1,05}$	$V_{O_2}^{1,05}$	$V_{Ar}^{1,05}$	$V_{H_2O}^{1,05}$	$V_{SS}^{1,05}$	$V_{SV}^{1,05}$
0	0,9809	7,68	0,098	0,090	2,13	8,848	10,978
5	0,9319	7,40	0,095	0,087	2,08	8,512	10,590
10	0,8830	7,11	0,091	0,084	2,02	8,164	10,186
15	0,8339	6,87	0,088	0,081	1,99	7,873	9,866
20	0,7853	6,54	0,084	0,077	1,91	7,482	9,395
25	0,7359	6,25	0,080	0,074	1,86	7,136	8,994
30	0,6866	5,96	0,076	0,070	1,80	6,791	8,594
50	0,4908	4,81	0,062	0,057	1,59	5,423	7,009
70	0,2948	3,67	0,047	0,043	1,37	4,054	5,422
100	0,0007	1,95	0,025	0,023	1,04	1,999	3,040

Tab. 7 Tabulka spalín pro jednotlivé koncentrace

Z tab.9 si lze povšimnout, že s rostoucím podílem vodíku klesá výhřevnost paliva, což má za následek zvýšení spotřeby paliva v kotli viz. tab. 8.

SPOTŘEBA PALIVA V ZÁVISLOSTI NA PŘÍDAVKU VODÍKU										
podíl H ₂ [%]	0	5	10	15	20	25	30	50	70	100
m_{pal} [m ³ /s]	0,44	0,47	0,48	0,50	0,52	0,55	0,57	0,69	0,88	1,47

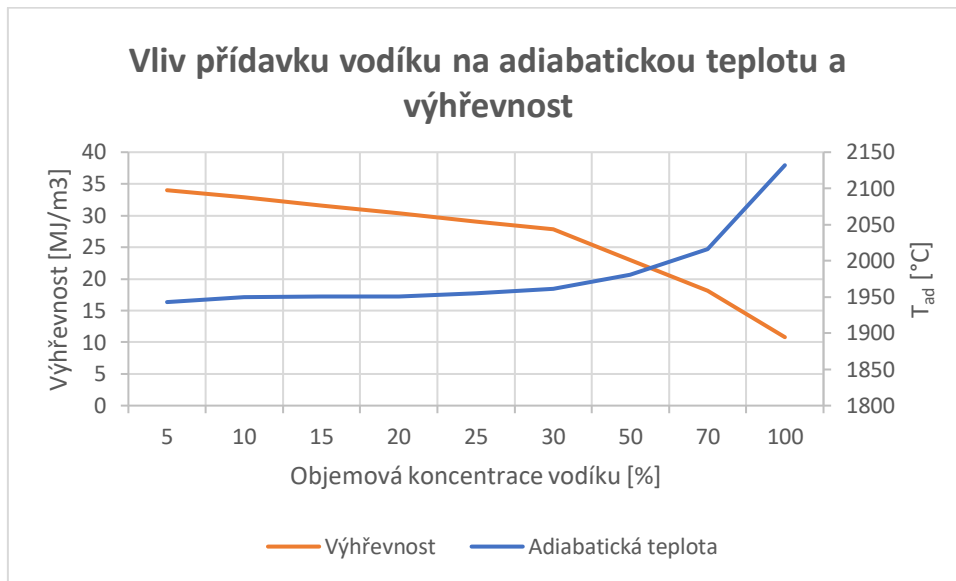
Tab. 8 Závislost spotřeby paliva na přídávku vodíku

Nyní jsou zde uvedeny I-t tabulky spalín pro přídávky vodíku 0-25 %. Další výpočty jsou v příloze.

Na následujícím grafu č. 1 lze vidět závislost výhřevnosti a adiabatické teploty na objemové koncentraci vodíku. S rostoucí objemovou koncentrací ze začátku adiabatická teplota mírně roste, ale přibližně od objemové koncentrace 70 % roste rapidně rychle. Co se týče výhřevnosti paliva, dochází s přidáváním vodíku k jejímu snížení. Hodnoty výhřevnosti a adiabatické teploty jsou uvedeny v tab. 9.

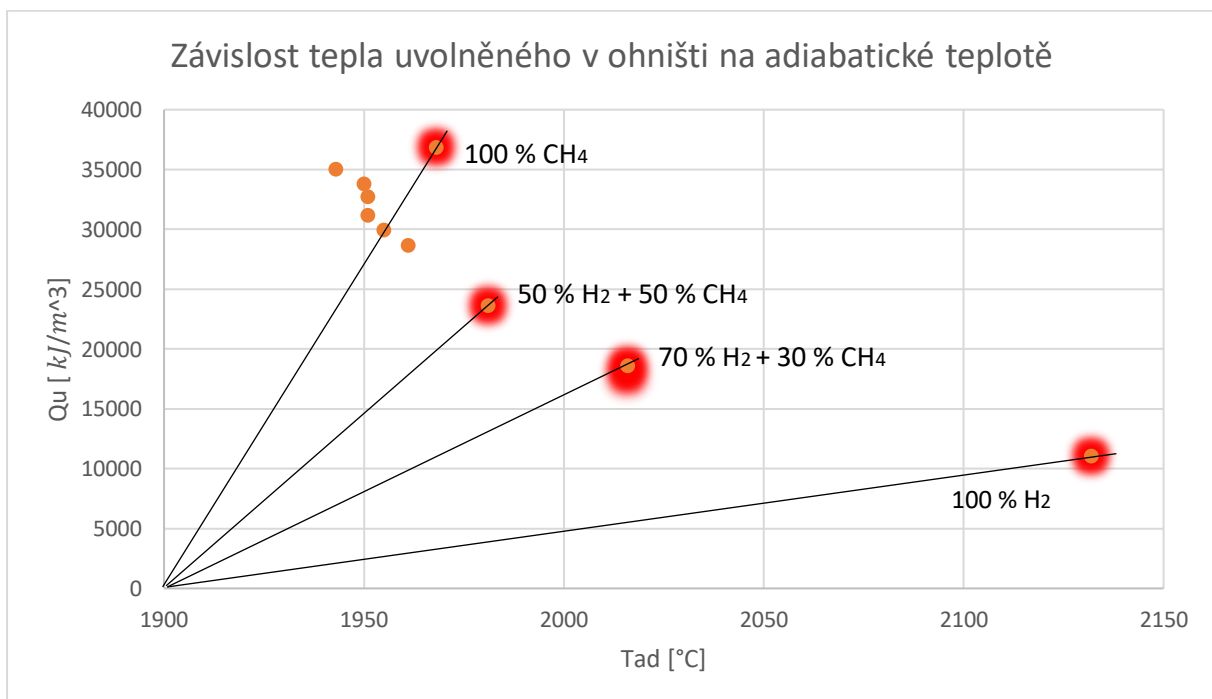
VÝHŘEVNOST A ADIABATICKÁ TEPLOTA										
H ₂ [%]	0	5	10	15	20	25	30	50	70	100
Q^r [kJ/Nm ³]	35870	33997	32870	31530	30310	29091	27872	22994	18116	10800
T_{ad} [°C]	1968	1943	1950	1951	1951	1955	1961	1981	2016	2132

Tab. 9 Vliv přídávku vodíku na adiabatickou teplotu a výhřevnost



Graf. 1 Závislost T_{ad} a Q_i^F na koncentraci vodíku

U tepelného výkonu v ohništi Q_o došlo k nepatrným změnám v oblasti přídavku 5-30 % objemové koncentrace vodíku. K největší změně dochází až při vyšší koncentraci vodíku ve směsi. Hodnoty lze vidět v tab. 9. Dále si lze povšimnout, že přídavek vodíku nemá značný vliv na účinnost. V grafu č. 2 můžeme pozorovat závislost rostoucí adiabatické teploty a snižujícího se tepla uvolněného v ohništi vlivem přidávání vodíku.



Graf. 2 Závislost Q_u na T_{ad}

VLIV PŘÍDAVKU VODÍKU NA TEPELNÝ VÝKON OHNIŠTĚ, TEPELNÁ ÚČINNOST OHNIŠTĚ A TEPLOTU NA KONCI OHNIŠTĚ										
H ₂ [%]	0	5	10	15	20	25	30	50	70	100
Q _o [kW]	4979	4740	4791	4811	4813	4816	4900	5088	5395	6340
η _o [%]	96	96,01	95,98	95,98	95,98	95,98	95,99	96,02	96,06	96,20
T _{ok} [°C]	1416	1425	1425	1422	1422	1425	1420	1414	1403	1365

Tab. 10 Vliv přídatku vodíku na tepelný výkon, účinnost a teplotu na konci ohniště

Vliv přídatku vodíku na parametry v ohništi viz. tab. 11:

VYPOČÍTANÉ PARAMETRY V OHNIŠTI										
H ₂ [%]	Q _u [kJ/m ³]	(O _s c _s) _o [kJ/m ³ .°C]	φ	B ₀	a _{pl}	a ₀	a _{sv}	a _{ns}	k _s · r _s [1/m.MPa]	k _{sZ} [1/m.MPa]
5	35000	19,8	0,9997	0,283	0,2791	0,37	0,49	0,256	1,476	1,899
10	33817	19,09	0,9997	0,280	0,2802	0,37	0,49	0,257	1,483	1,899
15	32728	18,42	0,9997	0,278	0,2819	0,38	0,49	0,258	1,483	1,899
20	31177	17,58	0,9997	0,279	0,2826	0,38	0,49	0,259	1,495	1,899
25	29917	17,05	0,9997	0,280	0,284	0,38	0,49	0,261	1,50	1,899
30	28670	16,07	0,9997	0,274	0,286	0,38	0,49	0,262	1,51	1,899
50	23639	13,14	0,9997	0,264	0,293	0,39	0,50	0,270	1,58	1,899
70	18608	10,17	0,9997	0,247	0,306	0,40	0,51	0,283	1,66	1,899
100	11061	5,74	0,9997	0,202	0,349	0,45	0,54	0,327	1,98	1,899

Tab. 11 Vypočítané parametry v ohništi

7.5 Shrnutí

Aby byl ověřen vliv přídatku vodíku na sálavost plamene, s tím související fyzikální parametry, a jeho vliv na tepelný výkon v ohništi. Výpočet byl proveden pro objemové koncentrace vodíku v rozsahu 5-100 %. Doporučená objemová koncentrace pro hořáky, vzhledem k jejich konstrukci je do 25 % objemové koncentrace vodíku ve směsi se zemním plynem. K ověření dalších vlastností byly ověřeny i další objemové koncentrace, včetně spalování pouze čistého vodíku. Výsledky byly porovnány s poznatky ze 6. kapitoly.

Tranzitní plyn dosahuje výhřevnosti 35,79 MJ/m³, co se týče vodíku, ten dosahuje hodnoty výhřevnosti pouze 10,8 MJ/m³. Pokud postupně zvyšujeme objemovou koncentraci vodíku ve směsi se zemním plynem, je velmi výhřevný metan nahrazován méně výhřevným vodíkem a jak lze vidět na předešlém grafu č.1, výhřevnost každé nové směsi lineárně klesá. Analogicky s klesající výhřevností klesá stechiometrická spotřeba vzduchu. Na druhé straně klesající trend výhřevnosti způsobí růst přivedeného paliva.

Přidáváním vodíku vzroste adiabatická teplota, kdy se růst výrazně projeví až v objemové koncentraci vodíku nad 50 %. Při nižší koncentraci ve směsi nedochází k výraznému růstu adiabatické teploty viz. graf č. 1. Kde také nedochází k výrazným změnám vlivem přídatku je celková účinnost, která se v požadovaném rozsahu mění pouze minimálně.

Co se týče tepelného výkonu, zde dochází též k nepatrnému nárůstu v rozmezí 1-2 % s dalším přidavkem vodíku. Výrazné zvýšení výkonu získáme až při vyšší objemové koncentraci vodíku, tedy přibližně od 30 %. Účinnost ohniště s přidáváním vodíku kolísá ± 2 % jako v již předem provedených studiích.

V neposlední řadě byly pozorovány jednotlivé parametry, které souvisí s návrhem a výpočtem ohniště. Celkové užitečné teplo Q_u klesá z důvodu snižující se výhřevnosti nového paliva a klesajícím teplem přivedeném ve vzduchu Q_{vz} . Dále dochází ke snižování střední tepelné jímavosti ohniště, která je závislá na celkovém užitečném teple Q_u , které je s ní přímo úměrné, a také na adiabatické teplotě plamene, která je se střední tepelnou jímavostí nepřímou úměrná, tedy pokud nám roste adiabatická teplota plamene, dochází k poklesu jímavosti ohniště. Součinitel zanesení stěn ohniště ζ byl uvažován po celou dobu konstantní, ale předpokládá se jeho snižování na určitou hodnotu, čímž by došlo ke změně dalších parametrů např. Boltzmannova čísla.

Z tab. 11 si lze všimnout, že součinitel uchování tepla zůstává neměnný. Nedochozí k významným změnám účinnosti kotle a ztrát chemickým nedopalem. Stupeň černosti ohniště a_0 , stupeň černosti plamene a_{pl} , stupeň černosti nesvítivé části ohniště a_{ns} a stupeň svítivé části plamene a_{sv} roste s každou novou koncentrací směsi, kdy parametr součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny $k_s \cdot r_s$ postupně narůstá z důvodu růstu vyššího objemového podílu r_{H_2O} a klesající podíl r_{RO_2} . Posledním, ale důležitým parametrem je Boltzmannovo číslo, které s postupným přidáváním vodíku klesá. Pokud se podíváme na vzorec Boltzmannova čísla a doplníme si výše zmíněné poznatky, zjistíme, že přímo úměrné zvyšování přivedeného množství paliva a snižování střední tepelné jímavosti v ohništi se vzájemně kompenzuje, ale rostoucí adiabatická teplota je nepřímou úměrná Boltzmannově číslu, což vede k jeho snížení.

ZÁVĚR

Cíli této diplomové práce bylo popsat podrobně vlastnosti zemního plynu (metanu) a vodíku s vzájemným porovnáním, vliv plynů na režim spalování a vlastnosti plamene a následně posouzení vlivu sálavosti plamene na konstrukci ohnišť parních kotlů.

Vodík je nejlehčí a nejjednodušší prvek v periodické tabulce. Na druhé straně zemní plyn je směs uhlovodíků s většinovým podílem metanu. Zemní plyn má oproti vodíku mnohem vyšší výhřevnost, vyšší hustotu a zápalné teplo. Vodík na druhé straně při spalování dosahuje vyšší adiabatické teploty, a to až o 200 °C a až pětinasobné rychlosti plamene. Důvodem, proč můžeme míchat zemní plyn a vodík je velmi podobné Wobbeho číslo. Podle toho, z jakých zdrojů je vodík získáván rozeznáváme až 8 druhů. Do budoucna je plánováno převážně využívat zelený vodík, který je vyráběn elektrolytickým štěpením molekul vody, kdy pouze vzniká vodík a kyslík, kdy kyslík následně můžeme vypouštět do atmosféry. Dodávanou elektrickou energii k elektrolýze získáváme pomocí obnovitelných zdrojů energie, převážně ze solární nebo větrné.

Spalování zemního plynu s přídavky vodíku přináší nové poznatky, které bude nutné vzít v úvahu a bude nutné respektovat při návrhu a konstrukci energetických zařízení. Jedná se o vliv vodíku na plamen, přenos tepla, spaliny a tepelný výkon. Oproti zemnímu plynu bude nutné uvažovat odlišné meze výbušnosti, kdy vodík bude hořet s menším i vyšším množstvím vzduchu než u zemního plynu a tím bude kontrola hoření obtížnější. Spolu s rychlostí plamene patří meze výbušnosti ke konstrukčním problémům. Jakmile začneme přidávat vodík do zemního plynu, všimneme si růstu adiabatické teploty, zkrácení plamene a zvýšení spalovací rychlosti. Zkracováním plamene dochází k posuvu bodu s maximální teplotou směrem k hořáku, což může vést k jeho poškození. Důsledkem vyšší objemové koncentrace vodíku dochází k vlivům průšlehu hořáků a oddělení plamene od hořáků. Abychom se vyhnuli těmto problémům, bude nutné uvažovat objemové koncentrace vodíku v rozmezí 0-25 %.

Důvodem, proč chceme nahrazovat zemní plyn vodíkem je snižování emisí. Byl pozorován mírný nárůst emisí NO_x ve spalinách, kdy od hodnoty 90 % objemové koncentrace rostou rapidně z důvodu tvorby termického NO, které jsou spojeny s vyšší adiabatickou teplotou. Na druhé straně emise, CO ve spalinách klesají, což je zapříčiněno snižováním obsahu uhlíku v palivu. Přídavek vodíku má dále za následek snížení emisí CO₂, způsobené snižujícím se podílem uhlovodíkového paliva. Ve spalinách ale zaznamenáme nárůst H₂O ve spalinách z důvodu samotného vodíku H₂ ve směsi. Významným faktorem ve tvorbě emisí je adiabatická teplota.

Se stále přibývajícím koncentrací vodíku ve směsi mírně roste hustota tepelného toku, která následně poklesne. Nepatrný nárůst dosáhneme i u celkového tepelného toku, který se nachází v blízkosti hořáků. Vliv přídavku vodíku na tepelný výkon ohniště je téměř nepatrný i co se týče tepelné účinnosti ohniště, která se liší ± 2 % s každým přidáním vodíku do směsi. Sálání spalin je závislé na teplotě, především u spalování zemního plynu než u spalování vodíku z důvodu CO₂ emisí při spalování zemního plynu vedle emisí H₂O.

Výpočet vlivu přídavku vodíku na tepelný výkon ohniště byl proveden pro samostatně zvolené parametry kotle, kdy následně při výpočtu byl uvažován objemový podíl metanu, dusíku a oxidu uhličitého, kdy ostatní složky plynu byly zanedbány. Následně byl přidáván vodík v objemové koncentraci 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 50 %, 70 % a 100 %. Při přepočtech byla zachována geometrie kotle a měnily se vlastnosti spalin.

Tranzitní zemní plyn má 3,5x vyšší výhřevnost než vodík a následným zvyšováním objemové koncentrace vodíku ve směsi se zemním plynem je způsoben pokles výhřevnosti s každou novou směsí. Analogicky s klesající výhřevností klesá stechiometrická spotřeba vzduchu. Na druhé straně klesající výhřevnost způsobí růst přivedeného paliva. S přibývajícím koncentrací dochází k růstu adiabatické teploty, která se projeví v objemové koncentraci nad 50 %. Při nižší koncentraci ve směsi nedochází k výraznému růstu adiabatické teploty. Kde dále nedochází k výrazným změnám vlivem přídavku je celková účinnost, která se v požadovaném rozsahu mění pouze minimálně. Co se týče tepelného výkonu, zde došlo k nepatrnému nárůstu v rozmezí 1-2 % s dalším přídavkem vodíku. K výraznému zvýšení výkonu dojde až při vyšší objemové koncentraci vodíku, tedy přibližně od hodnoty 30 %.

Byly pozorovány jednotlivé parametry související s návrhem a výpočtem ohniště. Celkové užitečné teplo Q_u klesá z důvodu snižující se výhřevnosti nového paliva a klesajícím teplem přivedeném ve vzduchu Q_{vz} . Dochází ke snižování střední tepelné jímavosti ohniště závislé na celkovém užitečném teple Q_u , která je s ní přímo úměrná, a také na adiabatické teplotě plamene, která je s tepelnou jímavostí nepřímo úměrná, tedy pokud roste adiabatická teplota plamene, dojde k poklesu jímavosti ohniště. Součinitel zanesení stěn ohniště ζ byl uvažován po celou dobu konstantní, ale předpokládá se jeho snižování na nějakou hodnotu, čímž by došlo ke změně dalších parametrů např. Boltzmannova čísla. Součinitel uchování tepla zůstává neměnný, nedochází k významným změnám účinnosti kotle a ztrát chemickým nedopalem. Stupeň černosti ohniště, stupeň černosti plamene, stupeň černosti nesvítivé části ohniště a stupeň svítivé části plamene roste s každou novou koncentrací směsi, kdy parametr součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny postupně narůstá z důvodu růstu vyššího podílu r_{H_2O} a klesající podíl r_{RO_2} . Důležitým parametrem je Boltzmannovo číslo, které s postupným přidáváním vodíku klesá.

V souladu s Evropskou vodíkovou strategií implementace vodíku bude rozdělena do 3 etap. Plynárenská soustava začne testovat přimíchávání vodíku do směsi se zemním plynem a v závěrečné etapě, tedy do roku 2050, by mělo dojít ke komerčnímu nasazení vodíku v průmyslu. Využívání vodíku s sebou přináší mnoho otázek, které bude nutné zodpovědět např. vývoj nových materiálů pro hořáky, vliv příměsí dalších plynů pro zvýšení účinnosti a snížení emisí, udržování parametrů vodíku v plynovodech až ke spotřebiteli, výroba vodíku elektrolýzou v jaderných elektrárnách atd.

Zdroje

- [1] GLASSMAN, Irvin a Richard A YETTER. Combustion. Fourth edition. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2008. ISBN 978-0-12-088573-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-088573-2.X0001-2
- [2] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7. (CS)
- [3] FÍK, Josef. Spalování plyných paliv a plynové hořáky. 1. vyd. Praha: GAS, 1998, 232 s. Informační systém GAS. ISBN 80-861-7601-0.
- [4] VESELÝ, Stanislav. Spalovací komory spalovacích turbin. Vydání první. Brno: Galant Brno, s.r.o, 2007, 1149 stran: ilustrace, tabulky, grafy. ISBN 978-80-239-6657-2.
- [5] Plynárenská příručka – 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě, Praha, GAS s.r.o., 1997, ISBN 80-902339-6-1.
- [6] BAUKAL, Charles E. Industrial burners handbook. Boca Raton: CRC Press, 2004, 790 s : il., čb. fot. ISBN 0-8493-1386-4.
- [7] FRAYNE, Colin. Boiler Water Treatment - Principles and Practice, Volume I. New York: Chemical Publishing Company Inc., 2002. ISBN 9780820603711.
- [8] RAYAPROLU, Kumar. Boilers for power and process. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-11-4200-7536-6.
- [9] JENKINS, Barrie a Peter MULLINGER. Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation. 1st Edition. Butterworth-Heineman, 2008. ISBN 978-0-7506-8692-1.
- [10] Hořáky pro průmyslové aplikace, 2023. <https://www.horaky-pz.cz/> [online]. Klatovy: Ing. Pavel Jiřinec [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: 5
- [11] Zemní plyn - těžba, vlastnosti a rozdělení, 2015. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč: oenergetice.cz [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni>
- [12] Zemní plyn - spalné teplo a další vlastnosti, 2004. *Tzbinfo* [online]. tzbinfo [cit. 2022-10-05]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1963-spalovaci-vlastnosti-zp-i>
- [13] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "methane". *Encyclopedia Britannica*, 3 Jan. 2023, <https://www.britannica.com/science/methane>. Accessed 6 January 2023.

- [14] Hořáky pro spalování zemního plynu I, 2004. *Tzbinfo* [online]. tzbinfo [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2153-horaky-pro-spalovani-zemniho-plynu-i>
- [15] Hořáky pro spalování zemního plynu II, 2004. *Tzbinfo* [online]. tzbinfo [cit. 2023-11-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2170-horaky-pro-spalovani-zemniho-plynu-ii>
- [16] Vodík, 2021. *Periodická tabulka* [online]. [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>
- [17] Vodík – energetický nosič s budoucností neutrální z hlediska skleníkových plynů, 2021. *Tzbinfo* [online]. Viessmann, spol. s.r.o [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/23270-vodik-energeticky-nosic-s-budoucnosti-neutralni-z-hlediska-sklenikovych-plynu>
- [18] Vodík: Klíč k výrobě tepla a elektřiny bez emisí CO₂, 2022. *Viessmann* [online]. Viessmann, spol. s.r.o [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/bereiche/topne-systemy/vytapeni-vodikem.html>
- [19] Česká vodíková technologická platforma (HYTEP) [online]. Husinec: Česká vodíková technologická platforma, 2022 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/>
- [20] Vodíková strategie České republiky. In: Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. Praha: MPO, c2005-2021 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/plynnapaliva/zemni-plyn-v-ceske-republice-2010_2020--265410/
- [21] Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. In: ENERGY.GOV [online]. Washington DC: Energy Efficiency & Renewable Energy [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-naturalgas-reforming>
- [22] Gov. Edwards, Air Products Announce \$4.5 Billion Blue Hydrogen Clean Energy Complex. In: Office of the Governor [online]. Louisiana, 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://gov.louisiana.gov/index.cfm/newsroom/detail/3421>
- [23] Hydrogen Roadmap Europe [online]. 1st edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019 [cit. 2022-02-20]. ISBN 978-92-9246-331-1. Dostupné z: doi:10.2843/341510
- [24] MILLER, Hamish Andrew, Karel BOUZEK, Jaromir HNAT, Stefan LOOS, Christian Immanuel BERNÄCKER, Thomas WEIßGÄRBER, Lars RÖNTZSCH a Jochen MEIER-HAACK. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy Fuels* [online]. 2020, 4(5), 2114-2133 [cit. 2022-03-15]. ISSN 2398-4902. Dostupné z: doi:10.1039/C9SE01240K

- [25] SCHIEBAHN, Sebastian, Thomas GRUBE, Martin ROBINIUS, Vanessa TIETZE, Bhunesh KUMAR a Detlef STOLTEN. Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2015, 40(12), 4285-4294 [cit. 2022-03-17]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.01.123
- [26] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy. 2., přepr. vyd.* Praha: VŠCHT, 2006, 254 s. ISBN 80-708-0619-2
- [27] HADRAVA, Jan, Roman VOKATÝ, HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby. *Paliva* [online]. 2013, roč. 5, č. 3, 79 - 83 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=95>
- [28] SMIL, Vaclav. *Energie: průvodce pro začátečníky. 1.* Praha: Kniha Zlin, 2018. Tema (Kniha Zlin). ISBN 978-80-7473-634-6.
- [29] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků. 3. vyd.* Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [30] 6 Things to Remember about Hydrogen vs Natural Gas, 2021. *PowerEngineers* [online]. PowerEngineers [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://www.powereng.com/library/6-things-to-remember-about-hydrogen-vs-natural-gas>
- [31] Yitong Xie, Chaokui Qin, Zhiguang Chen, Pengfei Duan, Shuangqian Guo, The impact of hydrogen addition to natural gas on flame stability, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 84, 2022, Pages 35851-35863, ISSN 0360-199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.137>.
- [32] Xin, Y.; Wang, K.; Zhang, Y.; Zeng, F.; He, X.; Takyi, S.A.; Tontiwachwuthikul, P. Numerical Simulation of Combustion of Natural Gas Mixed with Hydrogen in Gas Boilers. *Energies* 2021, 14, 6883. <https://doi.org/10.3390/en14216883>
- [33] Auswirkungen von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoffgemischen auf Gasgebläsebrenn, 2020. *Prozesswärme* [online]. Spaichingen [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <file:///C:/Users/pepik/OneDrive/Plocha/Energetick%C3%A9%20in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD/Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce/v%C4%9Bdeck%C3%A9%20C4%8D1%C3%A1nky/P%C5%99e%C4%8Dten%C3%A9/A1434-Fachartikel-Prozessw%C3%A4rme-04-2020-dreizler-Auswirkungen-H2-und-H2-CH4-Gemische-pre%C4%8Dteno.pdf>
- [34] Zhigang Liu, Yan Xiong, Zirui Zhu, Zhedian Zhang, Yan Liu, Effects of hydrogen addition on combustion characteristics of a methane fueled MILD model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 36, 2022, Pages 16309-16320, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.132>.

[35] H.S. Zhen, C.S. Cheung, C.W. Leung, Y.S. Choy, Effects of hydrogen concentration on the emission and heat transfer of a premixed LPG-hydrogen flame, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 7, 2012, Pages 6097-6105, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.130>.

[36] H.S. Zhen, C.W. Leung, C.S. Cheung, Z.H. Huang, Combustion characteristic and heating performance of stoichiometric biogas-hydrogen-air flame, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 92, 2016, Pages 807-814, ISSN 0017-6310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.040>.

[37] Ročenka Surovinové zdroje ČR - nerostné suroviny | Česká geologická služba GEOFOND. Geofond.cz [online]. 2005 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.geofond.cz/cz/onas/dokumenty/rocenka-surovinove-zdroje-cr-nerostne-suroviny>

[38] Zemní plyn: Hlavní stránka. Zemniplyn.cz [online]. 2010 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.zemniplyn.cz/>

[39] <https://www.moneta.cz/komodity/cena-plynu>

[40] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. Centrální výroba vodíku. *Chemické listy* [online]. 2017, 111(2), 121-128 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/issue/view/2>

[41] ŠEVELOVÁ, Kamila, Kamil STÁREK, Ivo BERKA, Jan HEROSCH a Petr SALVET. Parní kotle (návody do cvičení) [online]. 1. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/414/?ucebni-opory>

[42] KOČIŠ, Štefan, Michal STÁŇA a Ladislav VILIMEC. Provoz a regulace energetických zařízení (skripta, návody do cvičení) [online]. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2007, 263 s. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/414/?ucebni-opory>

[43] Markus Mayrhofer, Michael Koller, Peter Seemann, Rene Prieler, Christoph Hochenauer, Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 41, 2021, Pages 21672-1686, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.228>.

[44] Industrial Boiler Types. In: Feedwater [online]. b.r. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://feedwater.co.uk/industrial-boiler-types/>

[45] <https://slideplayer.cz/slide/2339090/>

- [46] Chien-Li Lee, Chih-Ju G. Jou, Influence of the hydrogen-rich on the furnace thermal efficiency, Applied Thermal Engineering, Volume 93, 2016, Pages 556-560, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.050>.
- [47] Tiantian Wang, Hai Zhang, Yang Zhang, Hongjian Wang, Junfu Lyu, Guangxi Yue, Efficiency and emissions of gas-fired industrial boiler fueled with hydrogen-enriched nature gas: A case study of 108 t/h steam boiler, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 47, Issue 65, 2022, Pages 28188-28203, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.121>.
- [48] Yan Zhao, Vince McDonell, Scott Samuelsen, Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 19, 2020, Pages 11368-11379, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.071>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920306340>)
- [49] Ardha, Vishwanath Reddy, "Laminar Burning Velocities Of Gas Mixtures" (2009). *Open Access Theses & Dissertations*. 2637. https://scholarworks.utep.edu/open_etd/2637
- [50] What are the 3 Main Types of Hydrogen? 2021. Brunel [online]. [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://www.brunel.net/en/blog/renewable-energy/3-main-types-of-hydrogen>
- [51] VÝROBA NÍZKOUHLÍKOVÉHO VODÍKU. TÜV [online]. Czech Republic: TÜV [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/temata/vodik/zjistete-vice-o-hodnotovem-retezci-vodiku/vyroba-vodiku>
- [52] The hydrogen colour spectrum, 2023. National Grid [online]. USA: National Grid [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
- [53] Mustafa Ilbas, The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen–hydrocarbon combustion modelling, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 30, Issue 10, 2005, Pages 1113-1126, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.009>.
- [54] *Bezpečnost a efektivita skladování vodíku* [online], 2023. ČR: TÜV [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/temata/vodik/zjistete-vice-o-hodnotovem-retezci-vodiku/skladovani-a-distribuce-vodiku>
- [55] *Nová studie: vodíku pro evropskou síť by mělo být dost* [online], 2021. ČR: NET4GAS [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.net4gas.cz/cz/media/tiskove-zpravy/zpravy/nova-studie-dostatek-vodiku-pro-evropskou-sit-melo-byt-dost.html>
- [56] *Skladování, přeprava a distribuce vodíku* [online], 2023. ČR: TÜV [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie/skladovani-preprava-a-distribuce-vodiku>
- [57] *Skladování vodíku* [online], 2019. ČR: HydroRACE4School [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>

[58] Zemní plyn, 2016. *Zemní plyn* [online]. ČR: ČEZ [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/zempl_4.html

[59] Historie, 2016. *Net4Gas* [online]. Praha: Net4Gas [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.net4gas.cz/cz/o-spolecnosti/historie/>

[60] Podzemní zásobníky plynu, -. *Muzeum naftového dobývání a geologie* [online]. Hodonín: Muzeum naftového dobývání a geologie [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <http://muzeumropy.cz/podzemni-zasobniky-plynu-pzp/>

[61] Plyn v datech a mapách. Podívejte se, kudy a kolik ho do Evropy proudí, 2022. *Aktuálně.cz* [online]. ČR: Aktuálně.cz [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/plyn/r~7f5b0834c60211ec8d900cc47ab5f122/>

[62] LIBICH, Vladimír, 1980. *Vybrané stati z parních generátorů-Část 1*. Praha: SNTL.

[63] ZEMAN, Prof. Ing. Vladimír, 1969. *Parní kotle*. Brno: Rektorát VUT v Brně

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

Seznam obrázků a grafů

- Obr. 1 Profil obecné spalovací reakce
- Obr. 2 Závislost tvorby emisí NO_x a CO na poměr paliva a spal. vzduchu
- Obr. 3 Závislost adiabatické teploty na předehřevu paliva
- Obr. 4 Závislost adiabatické teploty na předehřevu okysličovadla
- Obr. 5 Vliv předehřevu na délce plamene
- Obr. 6 Ložiska zemního plynu v ČR
- Obr. 7 Vývoj ceny ZP
- Obr. 8 Závislost členských států EU na dodávkách plynu z Ruska
- Obr. 9 Objem plynu přivedeného plynovody
- Obr. 10 Schéma povrchové technologie
- Obr. 11 Podzemní zásobníky
- Obr. 12 Plynárenská soustava v ČR
- Obr. 13 Schéma výroby zeleného a modrého vodíku
- Obr. 14 Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů
- Obr. 15 Schéma parního reformování zemního plynu
- Obr. 16 Alkalická elektrolýza
- Obr. 17 Vysokoteplotní elektrolýza
- Obr. 18 PEM elektrolýza
- Obr. 19 Prognóza spotřeby nízkouhlíkového vodíku
- Obr. 20 Vodíková strategie
- Obr. 21 European Hydrogen Backbone
- Obr. 22 Vliv příměsí vodíku na adiabatickou teplotu, výhřevnost a Wobbeho číslo
- Obr. 23 Vliv přídavku vodíku na průšleh a blow off
- Obr. 24 Poloha maximální teploty
- Obr. 25 Růst spalovací teploty a posun místa nejvyšší teploty
- Obr. 26 Vliv vodíku na emise, CO a NO_x
- Obr. 27 Koncentrace CO₂ ve spalinách
- Obr. 28 Koncentrace N₂ ve spalinách
- Obr. 29 Koncentrace H₂O ve spalinách

Obr. 30 Vliv adiabatické teploty na tvorbu spalin NO_x a CO

Obr. 31 Experimentální měření délky plamene v závislosti na koncentraci vodíku

Obr. 32 Teplota hořáku v závislosti na příměsi vodíku a zkrácení plamene

Obr. 33 Hustota tepelné toku v závislosti na koncentraci vodíku

Obr. 34 Vliv vodíku na tepelný výkon

Obr. 35 Výkon částí kotle v závislosti na objemové koncentraci vodíku ve směsi

Obr. 36 Vliv příměsi vodíku na spalovací rychlost

Graf. 1 Závislost T_{ad} a Q_i na koncentraci vodíku

Graf. 2 Závislost Q_u na T_{ad}

Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti zemního plynu

Tab. 2 Vlastnosti vodíku

Tab. 3 Cena výroby vodíku s kurzem k datu 12.1.2023

Tab. 4 Měrné entalpie složek spalin

Tab. 5 I-t tabulka spalin pouze pro metan

Tab. 6 Složení zemního plynu pro jednotlivé složení

Tab. 7 Tabulka spalin pro jednotlivé koncentrace

Tab. 8 Závislost spotřeby paliva na přídatku vodíku

Tab. 9 Vliv přídatku vodíku na adiabatickou teplotu a výhřevnost

Tab. 10 Vliv přídatku vodíku na tepelný výkon, účinnost a teplotu na konci ohniště

Tab. 11 Vypočítané parametry v ohništi

Seznam zkratek a symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
Q_s	Spalné teplo	MJ/m ³
Q_i^r	Výhřevnost	MJ/m ³
h	Hutnota plynu	
ρ	Měrná hmotnost plynu	kg/m ³
K	Hmotnost kondenzované páry	
P	Objem spáleného plynu	
W	Wobbeho číslo	MJ/m ³
α	Přebytek spalovacího vzduchu	-
β	Přebytek přiváděného vzduchu	-
Q_u	Celkové užitečné teplo uvolněné v ohništi	kJ/m ³
α_r	Absorptivita	-
γ_r	Reflektivita	-
τ_r	Transmisivita	-
Q	Celkový tepelný výkon	W
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	-
ε	Emisivita	-
T	Teplota povrchu	K
S	Plocha povrchu	m ²
p	Tlak	Pa
T_{ad}	Adiabatická teplota	°C
a_{oh}	Délka	m
b_{oh}	Šířka	m
h_{oh}	Výška ohniště	m
m_{pp}	Hmotnostní průtok páry	kg/s
i_{pp}	Entalpie přehřáté páry	kJ/kg
i_{nv}	Entalpie napájecí vody	kJ/kg
Q_{vp}	Výrobní teplo páry	W
$V_{O_2,min}$	Minimální potřeba kyslíku	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
$V_{VS,min}$	Minimální množství suchého vzduchu	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
$V_{VV,min}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
p_c	Celkový tlak	Pa
φ	Relativní vlhkost	
p''	Parciální tlak pro teplotu 20 °C	Pa
$V_{H_2O}^V$	Objem vodní páry	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
V_{CO_2}	Objem CO ₂ ve spalinách	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
V_{N_2}	Objem N ₂ ve spalinách	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
V_{Ar}	Objem Ar ve spalinách	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$

$V_{SS,min}$	Objem suchých spalín	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
$V_{H_2O}^S$	Objem vodní páry ve spalínách	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
$V_{SV,min}$	Minimální objem vlhkých spalín	$\frac{m_n^{-3}}{m_n^{-3}}$
z_k	Komínová ztráta	-
z_{co}	Ztráta chemickým nedopalem	-
z_{so}	Ztráta sáláním	-
η_o	Celková účinnost ohniště	%
m_{pal}	Množství paliva přivedeného do kotle	m^3/s
M	součinitel	-
B_0	Boltzmannovo číslo	-
a_0	Stupeň černosti ohniště	
Q_{vz}	Teplo přivedené vzduchem	$\frac{kJ}{kg}$
$(O_s \bar{c}_s)_o$	Střední tepelná jímavost v ohništi	$\frac{kJ}{m^3 \cdot ^\circ C}$
a_{pl}	Stupeň černosti plamene	-
a_{sv}	Stupeň svítivé části plamene	-
a_{ns}	Stupeň černosti nesvítivé části ohniště	-
k_{sz}	Součinitel zeslabení sálání částicemi sazí	$\frac{1}{m \cdot MPa}$
$k_s \cdot r_s$	Součinitel zeslabení sálání tříatomových plynů	$\frac{1}{m \cdot MPa}$
C_r/H_r	Poměr obsahu vodíku a uhlíku v původním vzorku	-
x_u	Úhlový součinitel osálání	-
x_{pl}	Poloha maximální teploty plamene	-
x_h	Poměrná výška hořáku	-
ψ	Součinitel tepelné efektivity	-
ζ	Součinitel zanesení stěn ohniště	-
h_h	Výška hořáku	m
g	Šířka tahu	m
s	Účinná tloušťka sálavé vrstvy	m
Q_o	Celkový výkon ohniště	W

Seznam příloh

Příloha 1 – Stechiometrické výpočty