

Směs vodíku se zemním plynem jako palivo pro vysokoteplotní procesy

Hydrogen & Natural Gas Blends as Fuels for High-temperature Processes

Ing. Lukáš Lasota

Messer Technogas s.r.o.

E-mail: Lukas.Lasota@messergroup.com

SOUHRN:

Vodík je v současné době vnímán jako nástroj k dekarbonizaci jinak obtížně dekarbonizovatelných vysokoteplotních procesů. Spalování vodíku z hlediska tepelné techniky s sebou přináší nové výzvy z hlediska výzkumu, vývoje a aplikace. Současný stav techniky a znalostí v dotčených oblastech hovoří o možnosti vtlačet vodík do plynárenských soustav a využívat ho ve směsi se zemním plynem k jeho dekarbonizaci. U vysokoteplotních procesů je nutné posoudit vliv vodíku v zemním plynu na spalovací proces z fyzikálních a ekonomických hledisek. Je nutné brát v potaz zcela odlišné spalovací vlastnosti nové směsi plyných paliv a vhodně navrhovat flexibilní spalovací systémy. Vzhledem k přibližně třetinové výhřevnosti vodíku oproti zemnímu plynu je nutné tepelný příkon kompenzovat vyšším množstvím paliva. Kyslíko-palivový režim spalování je pro vodík z hlediska účinnosti rovněž velmi atraktivní, jelikož vede ke značnému snížení jmenovité spotřeby paliva.

KLÍČOVÁ SLOVA:

vodík, zemní plyn, kyslík, vysokoteplotní procesy, kyslíko-palivové spalování, dekarbonizace

SUMMARY:

Hydrogen is currently regarded as a tool for decarbonising what otherwise can be the high-temperature processes that can be decarbonised only with difficulties. In terms of thermal technology, hydrogen combustion has brought new challenges in research, development and application. The state-of-the-art in technology and the latest knowledge in these areas suggest the option of injecting hydrogen into gas systems and using hydrogen blended with natural gas to decarbonise the latter. In respect of high-temperature processes, the impact of hydrogen contained in natural gas on the combustion process must be examined in physical and economic terms. The completely different combustion characteristics of the new blend of gaseous fuels must be taken into account and flexible combustion systems must be designed accordingly. Hydrogen's NCV is approximately one-third that of natural gas and the thermal input must therefore be compensated for by a larger quantity of the fuel. Oxy-fuel combustion is also very attractive for hydrogen in terms of efficiency since it helps to reduce the nominal fuel consumption considerably.

KEY WORDS:

hydrogen, natural gas, oxygen, high-temperature processes, oxy-fuel combustion, decarbonisation

1. Úvod

Vodík je v současné době vnímán jako jeden z hlavních nástrojů pro dekarbonizaci průmyslových, jinak těžce dekarbonizovatelných, vysokoteplotních procesů [1]. V praxi se jedná zejména o spalovací procesy, při kterých se využívá fosilních paliv jako zdrojů tepelné energie. Takové procesy můžeme najít napříč celým průmyslovým spektrem, například v hutním, strojním, vápenickém, cementářském a sklářském průmyslu. Tyto procesy jsou energeticky velmi náročné a řadíme mezi ně výrobu a přípravu kovů a jejich slitin v tavicích agregátech, ohřev materiálů na tvářecí teploty, výrobu cementářského slínku a tavení sklářského kmene.

V následujícím textu bude rozebrána základní teorie sloužící k pochopení využití vodíku a zemního plynu ve vysokoteplotních spalovacích procesech. Část výpočtů a celá experimentální část článku čerpá z dat a výsledků nedávno zpracované rakouské stu-

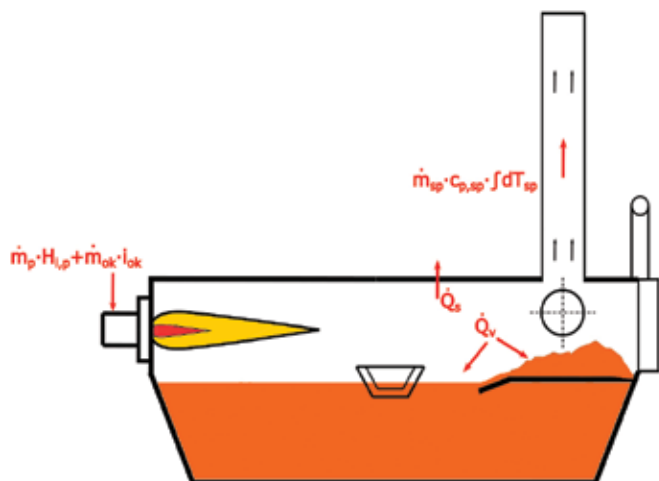
die ve spolupráci společnosti Messer s Technickou Univerzitou ve Štýrském Hradci.

2. Vysokoteplotní procesy

Charakteristickým rysem vysokoteplotních procesů, jak již název napovídá, jsou vysoké teploty dosahující nezdědky více než 1 600 °C. V praxi je takových teplot konvenčním spalováním paliv obtížně dosažitelné, a proto je nutné zvolit vhodné technologie a přístupy. Jedná se v zásadě o metody vedoucí ke zvýšení účinnosti spalovacího procesu a dá se říci, že v technické praxi se využívají dva základní přístupy:

- zpětné využití zbytkového tepla odpadních spalin;
- snižování/eliminace balastního dusíku v oksyličovadle.

V prvním případě se jedná o rekuperační a regenerační technologie, které pracují na principu předeřevu zejména spalovacího



Obr. 1 Průmyslová tavicí pec

vzduchu (ale v některých případech i paliva) ve vhodném výměníku tepla tak, že část zbytkového tepla odpadních spalin je využita k předehřevu spalovacích médií a tím se část tepla, které by již nebylo využito, vrací zpět do spalovacího procesu. V praxi se jako tepelné výměníky využívají zejména centrální i decentrální rekuperátory a regenerátory.

Druhým přístupem, kterým lze zvýšit účinnost spalovacího procesu je snižování a případně úplná eliminace dusíku, který je ve vzduchu zastoupen z přibližně 78%, a který ve vysokoteplotním spalovacím procesu působí pouze jako balast snižující účinnost přenosu tepla. K teorii proč tomu tak je se dostaneme v následujícím odstavci. V praxi se v tomto případě místo vzduchu jako oksidovač používá technicky čistý kyslík, případně se připravuje oksidovač ze vzduchu s vyšší koncentrací kyslíku (tedy 21% a více). V prvním případě mluvíme o kyslíko-palivovém spalovacím procesu, ve druhém případě pak o kyslíkem obohaceném spalovacím procesu.

3. Základy přenosu tepla

Abychom pochopili rozdíly mezi jednotlivými přístupy vedoucími ke zvýšení účinnosti spalovacího procesu, je nutné si nejdříve definovat základní mechanismy přenosu tepla během průmyslových vysokoteplotních procesů. Jako modelový příklad uvažujeme jednoduchý proces tavení kovové vsázky v průmyslové plamenné peci (viz obr. 1). Významy značek jednotlivých veličin na obrázku 1 jsou vysvětleny v textu níže.

Pec je určena k tavení kovové vsázky (ruda, šrot, předslitiny apod.), což je obecně energeticky velmi náročný proces. Zdrojem energie pro takový proces je v našem případě hořák spalující směs paliva a oksidovač. Vzniklé čerstvé spaliny z hořáku předávají teplo vsázce a žárovzdorné vyzdívce a poté opouštějí spalovací prostor odtažen.

Existují 3 principy přenosu tepelné energie:

- přenos tepla vedením (kondukcí);
- přenos tepla prouděním (konvekce);
- přenos tepla zářením (radiací).

V našem případě průmyslové palivové pece se uplatňují všechny tři mechanismy přenosu tepla. Z hlediska vnějšího přenosu tepla jsou však relevantní pouze konvekce a záření.

(a) Vedení (kondukcce)

Tento způsob přenosu tepla je charakterizován přenosem energie z molekuly na molekulu prostřednictvím srážek v plynné, kapalné nebo pevné fázi. Přenos energie vedením je řízen teplotním gradientem a je úměrný součiniteli tepelné vodivosti λ dané látky. Při uvažování stacionárního děje se měrný tepelný tok vedením vypočítá pomocí Fourierova zákona (rovnice 1). Vedení má na celkový vnější přenos tepla (tedy ze spalin na vsázku a zdívo) zanedbatelný vliv, jelikož hoření probíhá v plynné fázi. Řeší se pouze u přenosu tepla uvnitř vsázky. Z hlediska vnějšího přenosu tepla ze spalin na vsázku není významný.

$$\dot{q}_{ved} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1)$$

(b) Proudění (konvekce)

Přenos tepla vlivem proudění spalin ve spalovací komoře se nazývá konvekce. Na rozdíl od kondukcce je konvekce přenos tepla, kdy makroskopickým pohybem objemu spalin s výraznou entalpií a kinetickou energií dochází k přenosu tepla při jejich proudění z teplejších (chladnějších) do chladnějších (teplejších) míst. Obecně lze konvekci rozdělit na nucenou a přirozenou. Přirozená konvekce je vyvolána rozdíly hustoty v plynné nebo kapalné fázi v důsledku změny teploty. Nucená konvekce je přenos tepla pohybem kapaliny v rámci působení vnějšího proudového pole. Vzhledem k tomu, že přenos tepla přirozenou konvekci má mnohem menší intenzitu než nucená konvekce, je v této části uvažována pouze druhá z nich. Pro technické účely je důležitý konvektivní přenos tepla ze spalin na povrch tělesa, který je ovlivněn podmínkami proudění v mezní vrstvě na povrchu. Se zvláštním důrazem na spalování se teplo přenáší z teplejší plynné fáze na chladnější stěny pece a vsázku prostřednictvím mezní vrstvy. Měrné teplo je pak úměrné rozdílu teplot mezi plynem a povrchem (viz rovnice 2). V následující rovnici je α součinitel přestupu tepla. Součinitel α vyjadřuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu stěny. Čím je součinitel vyšší, tím intenzivněji k výměně tepla dochází. V praxi je nutné jej přesně stanovit na základě kritériálních rovnic. T_{sp} a T_s jsou teploty spalin a na povrchu stěny tělesa, které obtékají.

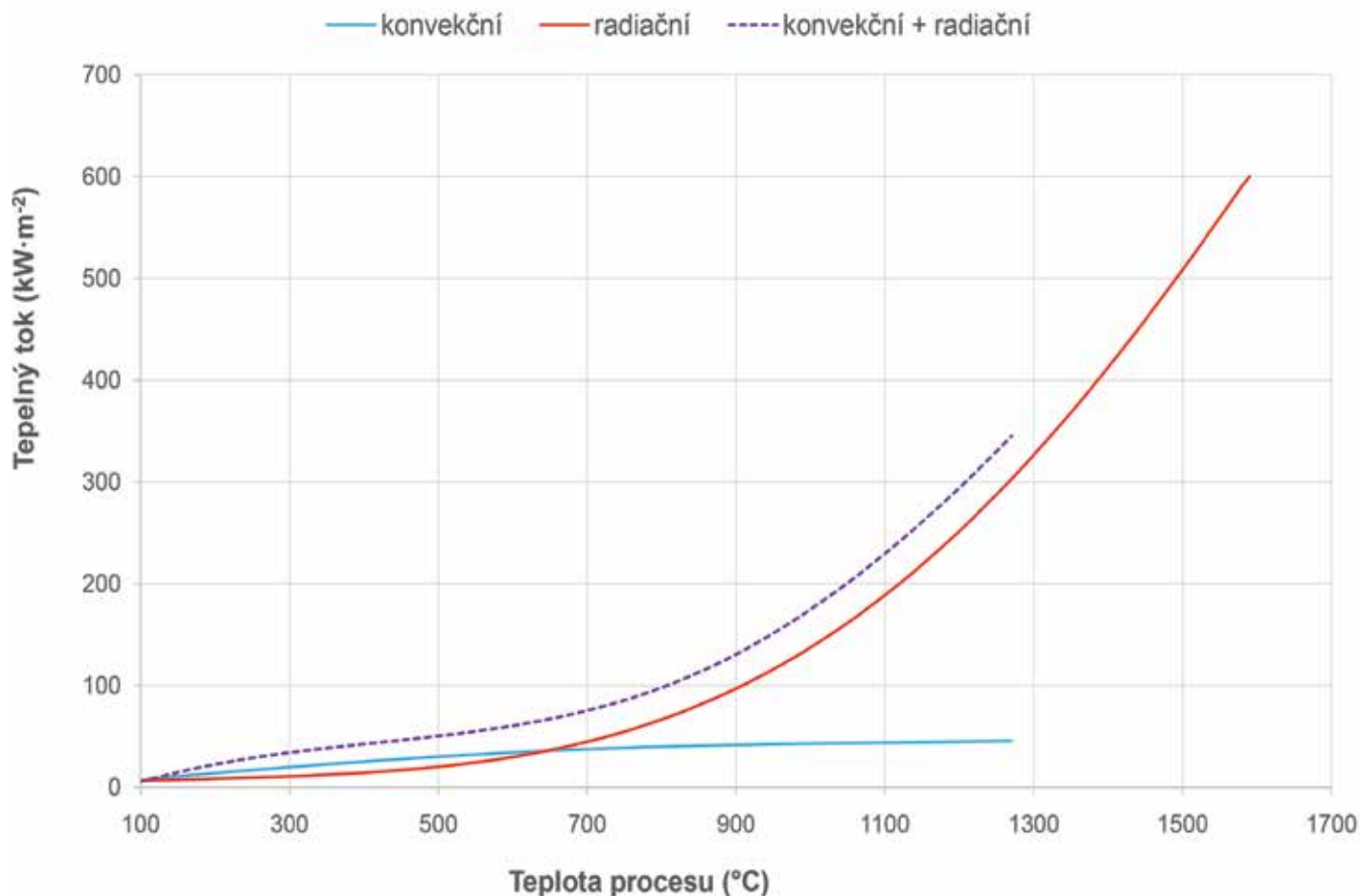
$$\dot{q}_{konv} = \alpha \cdot (T_{sp} - T_s) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2)$$

(c) Záření (radiace)

Sdílení tepla prostřednictvím elektromagnetického vlnění se nazývá záření (radiace). Záření lze klasifikovat v závislosti na vlnové délce. Tepelné záření v technických aplikacích má vlnovou délku mezi 0,1 a 100 μm , což zahrnuje viditelné vlnové spektrum a část ultrafialového a infračerveného spektra [5].

Záření mezi tělesy

Každé těleso s teplotou vyšší než 0 K vyzařuje tepelné záření, přičemž zářivý tepelný tok je úměrný čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. Maximální zářivý tepelný tok při určité teplotní hla-



Obr. 2 Srovnání režimů přenosu tepla v závislosti na procesní teplotě [3]

dině může vyzařovat tzv. absolutně černé těleso, podle rovnice 3. V této rovnici je σ Stefanova-Boltzmannova konstanta s hodnotou $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$ a T_s je jeho povrchová teplota.

$$q_{rad,0} = \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3)$$

Vyzařovaná energie skutečného tělesa (šedého) je nižší než záření absolutně černého tělesa. Proto se zavádí pojem emisivity šedého tělesa ε , která se určuje jako poměr intenzity vyzařování šedého tělesa k černému při stejné teplotě. Tepelný tok vyzařovaný šedým povrchem je tedy definován rovnicí 4, kde ε je emisivita tohoto povrchu.

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4)$$

Tepelný tok mezi dvěma povrchy o různých teplotách vzniká v obou směrech, tedy tepelná energie není přenášena pouze ve směru z teplejšího tělesa na chladnější, ale také naopak. Sálavý tepelný tok vyzařovaný teplejší stěnou je však vyšší, a proto lze čistý sálavý tepelný tok od teplejší stěny k chladnější vypočítat podle rovnice 5.

$$\dot{q}_{rad, tep. \rightarrow chlad.} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{tep.}} + \frac{1}{\varepsilon_{chlad.}} - 1 \right)} \cdot (T_{tep.}^4 - T_{chlad.}^4) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (5)$$

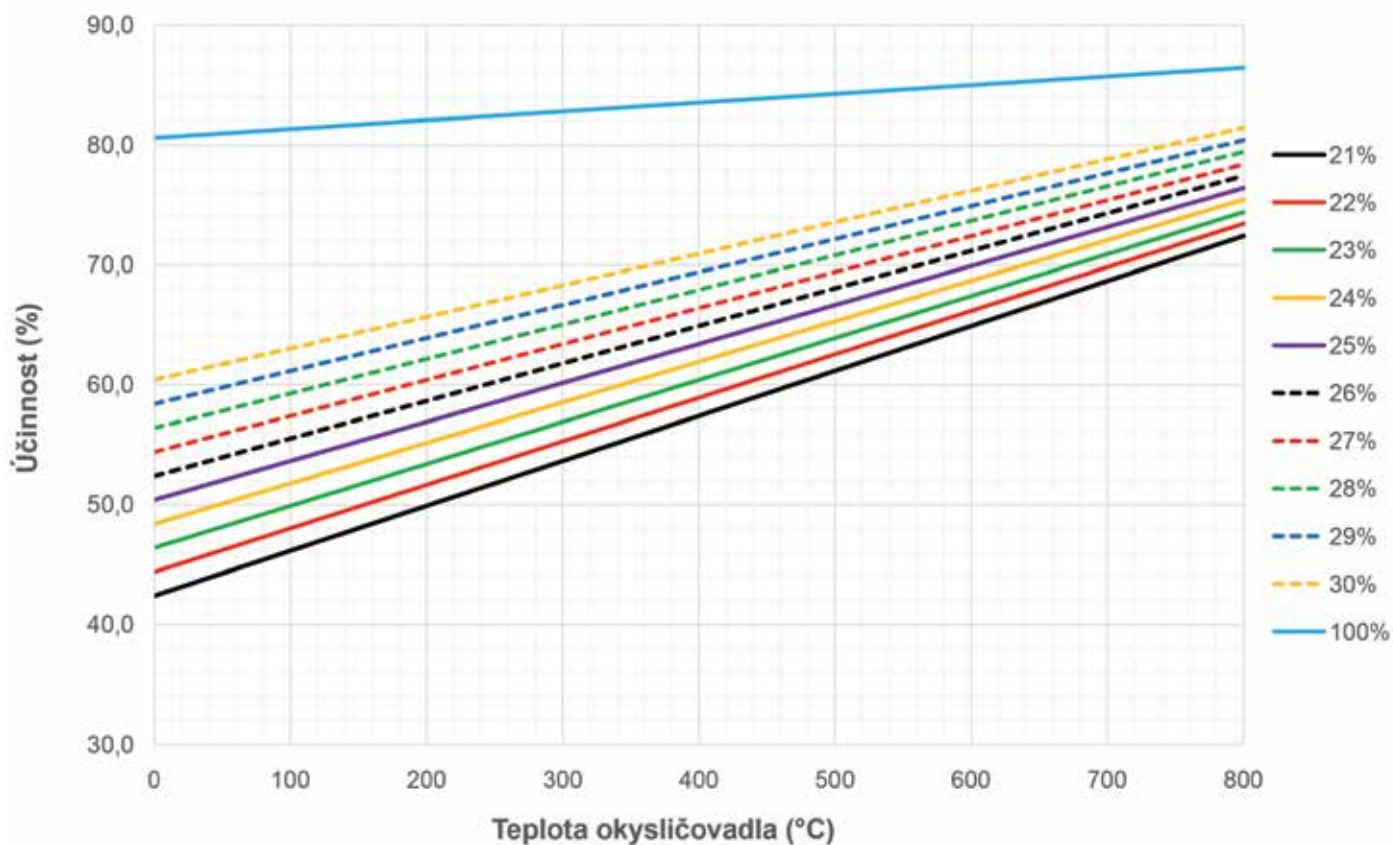
Sálání spalin

Na rozdíl od černého tělesa interagují plyny s tepelným zářením pouze v určitých pásmech vlnových délek, které jsou závislé na struktuře molekul. Proto je třeba pro tento případ sdílení tepla určit celkovou emisivitu směsi plynů. Při typických procesech spalování uhlovodíků jsou hlavními složkami spalin CO_2 , H_2O a N_2 . Meziprodukty, radikály a složky s menšími koncentracemi mají pouze malý příspěvek k přenosu tepla zářením. Kromě toho lze jedno a dvouatomové plyny jako N_2 a O_2 považovat za průteplivé (diatermní) pro tepelné záření. Tepelnou energii, která je vyzařována spalinami a přenášena na povrch tělesa, lze vypočítat podle rovnice 6. V této rovnici jsou ε_{sp} a ε emisivity spalin a stěn, a_{sp} je pohltivost plynu pro záření a T_{sp} a T_s jsou teploty spalin a ozařovaného povrchu.

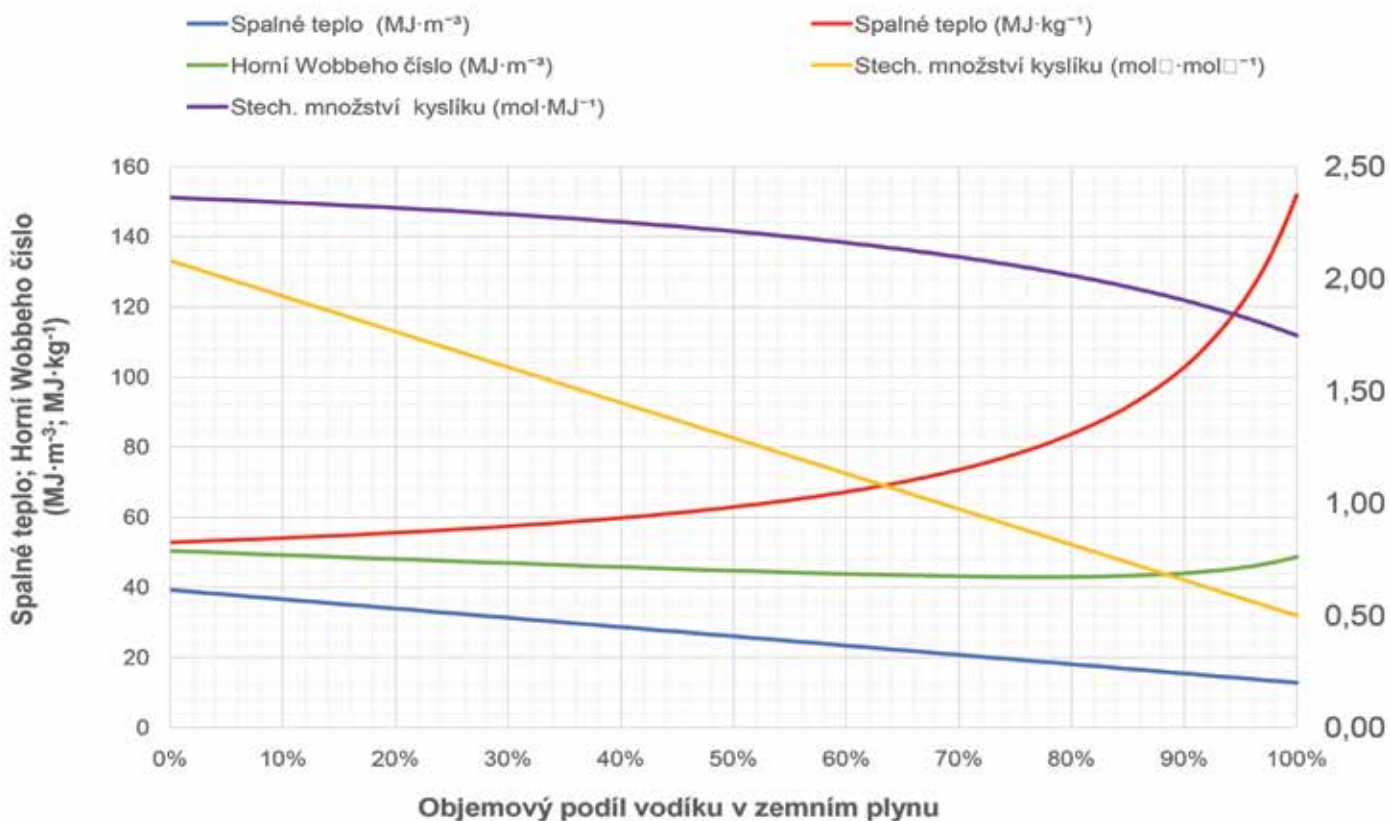
$$\dot{q}_{rad, sp} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_s}{1 - (1 - a_{sp}) \cdot (1 - \varepsilon_s)} \cdot (\varepsilon_{sp} \cdot T_{sp}^4 - a_{sp} \cdot T_s^4) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6)$$

U vysokoteplotních procesů je dominantním mechanismem přenosu tepla radiace, jelikož zářivý tepelný tok roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty spalin. Skutečnost znázorňuje obr. 2, kde jsou zobrazeny tepelné toky při vnějším přestupu tepla v závislosti na teplotě spalin.

Z obrázku 2 je rovněž patrné, že konvekce je dominantním mechanismem přenosu tepla pouze do teploty cca 600 °C [6].



Obr. 3 Laminární rychlost šíření plamene při různých koncentracích vodíku v palivu [4]



Obr. 4 Stechiometrický průtokový součinitel [4]

Přesné stanovení charakteru přenosu tepla v daném průmyslovém procesu za daných podmínek a stanovení tepelné práce daného zařízení je velmi náročné a vyžaduje přesnou definici okrajových podmínek a značnou výpočtovou práci. Detailní popis mechanismů přenosu tepla se všemi náležitosti je nad rámec tohoto článku.

Pro náš proces z obr. 1 můžeme velmi jednoduše stanovit tepelnou bilanci a posoudit tak účinnost vnějšího přenosu tepla [2]:

$$\dot{m}_p \cdot H_{i,p} + \dot{m}_{ok} \cdot i_{ok} = \dot{m}_{sp} \cdot c_{p,sp} \cdot \int_0^{T_{sp}} dT + \dot{Q}_v + \dot{Q}_s \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (7)$$

Levá strana rovnice vyjadřuje vstupní energie. Výraz $\dot{m}_p \cdot H_{i,p}$ vyjadřuje energii získanou spálením měrného množství paliva a výraz $\dot{m}_{ok} \cdot i_{ok}$ představuje entalpii okysličovadla, která např. při předehřevu spalovacího vzduchu hraje v bilanci zásadní roli. Pokud má okysličovadlo okolní teplotu, můžeme ji pro naše potřeby zanedbat. Obdobně pracujeme i s entalpií paliva – v bilanci jí však vůbec neuvažujeme, jelikož nepoužíváme jeho předehřev a entalpii nepředehřátého paliva v celkové bilanci při paliva zanedbáváme. Rovněž entalpii čistého kyslíku můžeme zanedbat. Q_v představuje teplo akumulované vsázkou a Q_s ztráty pláštěm pece.

Za účelem stanovení účinnosti spalování z hlediska vnějšího přenosu tepla nám stačí jednoduše srovnat energii, která přešla ze spalin na vsáčku a plášť tavicího agregátu podle rovnice 8 [2].

$$\eta = \frac{\dot{Q}_v + \dot{Q}_s}{\dot{m}_p \cdot H_{i,p} + \dot{m}_{ok} \cdot i_{ok}} = 1 - \frac{\dot{m}_{sp} \cdot c_{p,sp} \cdot \int_0^{T_{sp}} dT}{\dot{m}_p \cdot H_{i,p} + \dot{m}_{ok} \cdot i_{ok}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (8)$$

Účinnost spalovacího procesu ovlivňuje celá řada procesních a technických parametrů. Jedná se zejména o procesní teplotu, součinitel přebytku okysličovadla, použité palivo a okysličovadlo, rozměry a tvar spalovací komory apod. Jak již bylo řečeno v úvodu tohoto článku, zcela zásadní vliv na účinnost vysokoteplotního spalovacího procesu má předehřev okysličovadla a intenzifikace technicky čistým kyslíkem. Pro ilustraci, jakým způsobem se dá těmito přístupy ovlivnit účinnost spalovacího procesu, se podívejme na obr. 3. Zde jsou znázorněny křivky vyjadřující účinnost spalovacího procesu z hlediska vnějšího přenosu tepla v závislosti na teplotě předehřátí okysličovadla. Graf platí pro konkrétní podmínky spalování zemního plynu s konstantním přebytkem spalovacího vzduchu $\lambda = 1,1$ a teplotou procesu 1 200 °C. Je zde vyneseno několik křivek znázorňující situace, kdy je spalovací vzduch obohacen kyslíkem.

Z obr. 3 je patrné, že účinnost spalovacího procesu roste s teplotou předehřátí okysličovadla a zároveň také s koncentrací kyslíku v něm. Gradient přímkou naznačuje, že s rostoucí koncentrací kyslíku se vliv předehřátí okysličovadla snižuje.

Pro ilustraci si vezměme například proces předehřevu hutních polotovarů před válcováním v ohřívací peci. Taková zařízení dosahují vysokých tepelných příkonů v řádech desítek MW a zde je potřeba dosahovat vysokých teplot (až 1 300 °C). Pro zjednodušení nyní předpokládáme teplotu zdrojového spalovacího vzduchu a kyslíku jako 0 °C. Z obr. 3 je patrné, že pokud bychom pro tento proces využili spalovací vzduch bez předehřevu, dosáhli bychom účinnos-

ti spalovacího procesu přibližně 42%. V praxi se proto využívá předehřevu spalovacího vzduchu ve výměnících tepla. Obvykle se v našem případě ohřívací pece jedná o centrální rekuperátor, který je schopen předehřívát vzduch přibližně na 400 °C. Vidíme, že takovýmto opatřením dosáhneme zvýšení účinnosti přibližně na 57%. Pokud bychom se zároveň rozhodli i obohatit spalovací vzduch kyslíkem na 23%, zvýšíme účinnost až na 60%. Pokud bychom se rozhodli využívat místo spalovacího vzduchu technicky čistý kyslík, dosáhneme účinnosti přibližně 80%. Předehřev kyslíku se v praxi běžně nevyužívá, pouze u speciálních aplikací. Samozřejmě účinnost není jediný ukazatel, na který se z hlediska volby režimu ohřevu díváme. Důležitým hlediskem je samozřejmě ekonomika, kterou výhradně ovlivňují ceny paliva a kyslíku.

4. Stechiometrie a vlastnosti směsi vodíku se zemním plynem

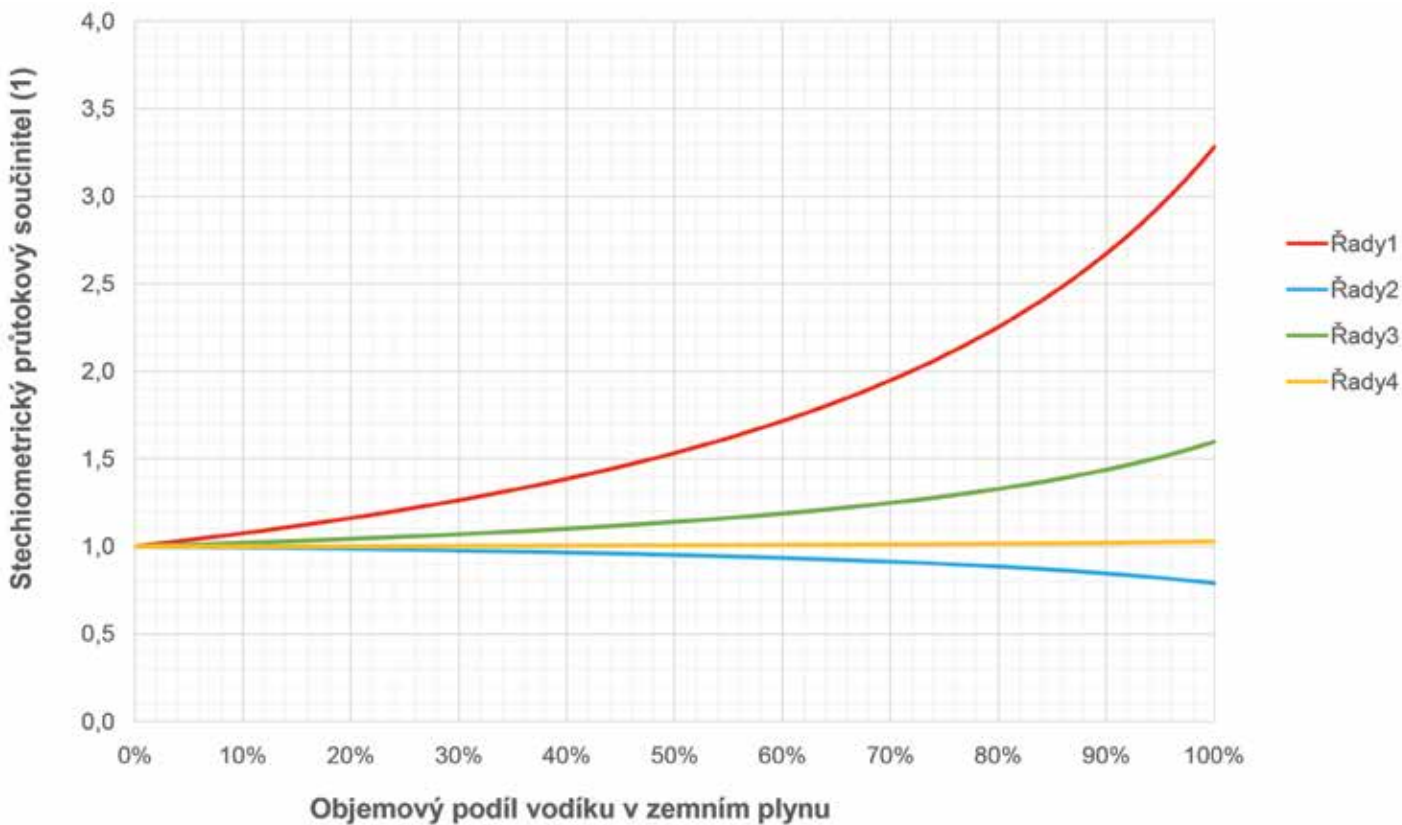
V současné době lze vhodně zvolenými opatřeními vedoucím ke zvýšení účinnosti spalovacího procesu dosáhnout významných úspor paliva a tedy i emisí CO₂. Pro splnění ambiciózních cílů Evropské komise, které představují dosažení uhlíkové neutrality v následujících dekádách, bude nutné nahradit konvenční fosilní paliva nízkouhlíkovými.

Vodík je v současné době vnímán jako nástroj, který může v budoucnu sehrát klíčovou roli v dekarbonizaci energeticky náročných a jinak těžce dekarbonizovatelných procesů. Možnosti výroby zeleného nebo modrého vodíku jsou rozmanité, od elektrolýzy vody využívající elektrickou energii z větrných, solárních nebo vodních zdrojů až po parní reforming se zachycováním oxidu uhličitého a dále k výrobě bioplynu bohatého na vodík prostřednictvím zplyňování biomasy [9,10].

Úplný přechod ze zemního plynu na zelený vodík v blízké budoucnosti není možný, uvažuje se tedy o jeho vtlačení do plynárenských soustav. Nově vzniklé palivo ve formě směsi vodíku se zemním plynem představuje výzvu z mnoha hledisek a vyžaduje další výzkum a vývoj v oblasti spalovací techniky.

Z hlediska možnosti záměny zemního plynu za vodík, případně nahrazení části jeho objemu, je nutné posoudit některé vlastnosti nového paliva. Vhodným indikátorem k posouzení záměnnosti paliv je horní Wobbeho číslo W_g . Na obr. 4 lze vidět pouze nepatrné změny horního Wobbeho čísla v závislosti na objemovém podílu vodíku v zemním plynu. Minima Wobbeho čísla je dosaženo při hodnotě přibližně 77% obj. vodíku v zemním plynu a jedná se o hodnotu 43 MJ·Nm⁻³, což je hodnota o 15% nižší než u čistého zemního plynu. Wobbeho číslo pro čistý vodík je 48,7 MJ·Nm⁻³, což je hodnota o 3% nižší než u čistého zemního plynu. Na obrázku jsou znázorněna i stechiometrická množství kyslíku vztažená na 1 m³ paliva a 1 MJ paliva. Hodnoty byly vypočteny na základě aktuálního složení zemního plynu v tranzitním plynovodu podle [7] a vodíku podle [5] pro vztažné podmínky: teplota 15 °C a tlak 101 325 Pa.

Zcela zásadní je nutnost kompenzovat tepelný příkon paliva jeho množstvím v závislosti na rostoucím objemovém podílu vodíku. Na obr. 5 jsou znázorněny křivky představující stechiometrické součinitele potřebných průtoků paliva a okysličovadla v závislosti



Obr. 5 Spalné teplo, horní Wobbeho číslo a stechiometrická množství kyslíku v závislosti na objemové koncentraci vodíku [4]

na množství vodíku v zemním plynu tak, aby byl zachován konstantní tepelný příkon. Výpočty byly provedeny pro stechiometrické spalení jednotky zemního plynu s čistým kyslíkem, kdy pro případ čistého zemního plynu je součinitel roven 1.

Z obr. 5 je patrné, že například pro podíl 72% vodíku v zemním plynu je již potřeba přibližně dvojnásobný průtok této palivové směsi oproti čistému zemnímu plynu pro zachování konstantního tepelného příkonu. Pro 100% nahrazení zemního plynu vodíkem je potřeba téměř 3,3krát vyšší průtok paliva. Se zvyšujícím se obsahem vodíku v zemním plynu zanedbatelně roste i objem vzniklých spalin. Naopak stechiometrická spotřeba kyslíku klesá. Tyto skutečnosti velmi komplikují návrh flexibilních hořáků schopných pracovat při různých koncentracích vodíku v zemním plynu.

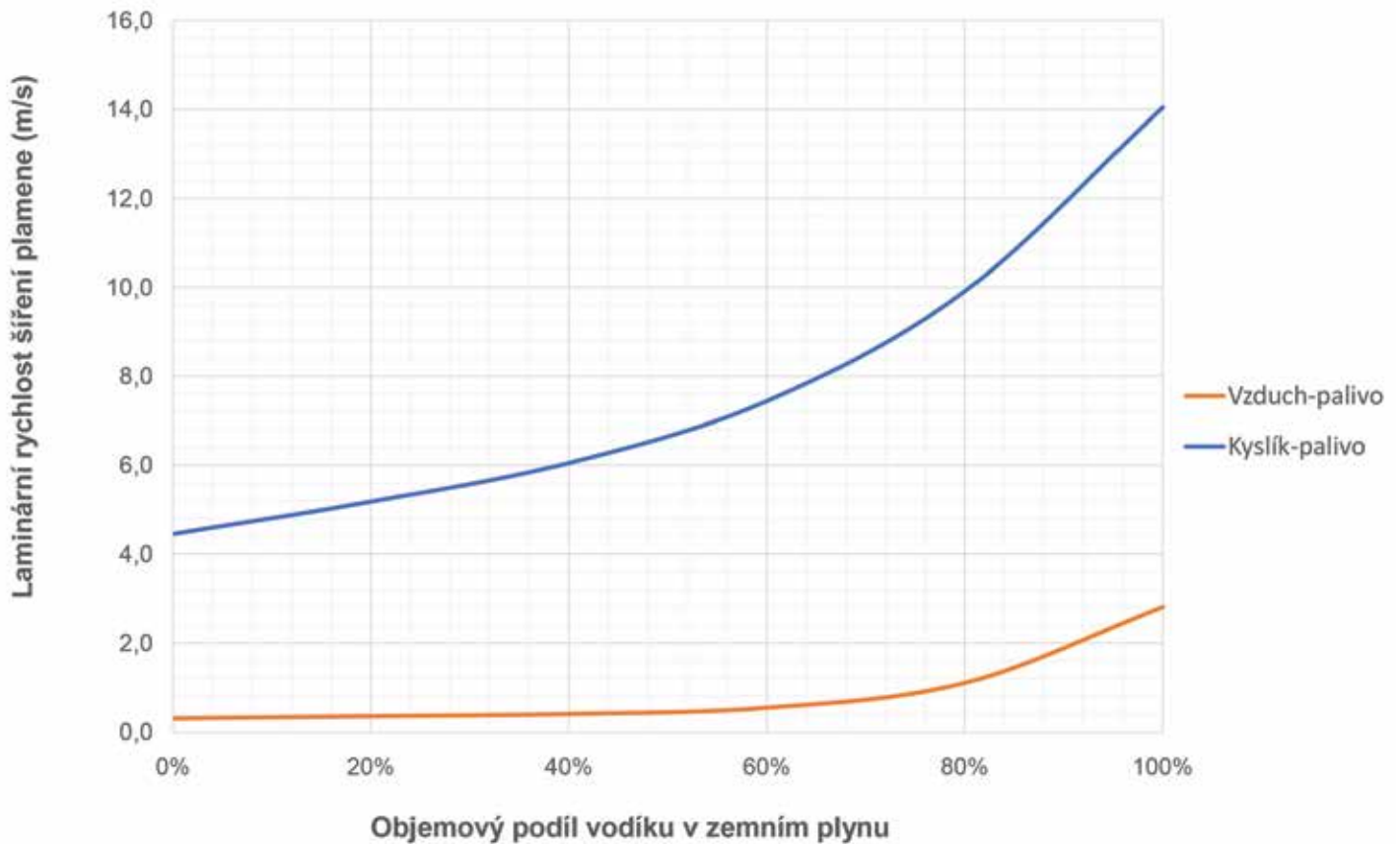
Dalším důležitým parametrem pro posouzení záměnnosti zemního plynu za vodík je laminární rychlost šíření plamene. Tato rych-

lost určuje minimální výtokovou rychlost médií z trysek hořáku tak, aby byl zajištěn stabilní plamen. Podle literatury je rychlost šíření plamene pro kyslíko-palivové spalování zemního plynu 4,42 m·s⁻¹. Při spalování vodíku se tato rychlost za stejných podmínek zvýší na 14,1 m·s⁻¹ kvůli vyšší reaktivitě vodíku s kyslíkem. U vzducho-palivového spalování je v případě zemního plynu laminární rychlost šíření plamene 0,35 m·s⁻¹ a v případě vodíku 2,75 m·s⁻¹. Na základě znalostí z dostupné literatury byly doloženy za určitých předpokladů laminární rychlosti šíření plamene – viz obr. 6. Vzhledem k nedostatku praktického výzkumu v této oblasti vlivem obtížného měření této veličiny je nutné brát zmíněný graf s jistou rezervou, hodnoty jsou stanoveny na základě výpočtových modelů.

Navzdory úvaze, že zvýšené objemové průtoky paliva s rostoucí koncentrací vodíku v důsledku zachování konstantního tepelného příkonu budou mít za následek vyšší výtokové rychlosti a tedy

Tabulka 1 Stechiometrie režimů spalování zemního plynu a vodíku

	Zemní plyn-vzduch	Vodík-vzduch	Zemní plyn-kyslík	Vodík-kyslík
Průtok paliva (Nm ³ ·h ⁻¹)	100	333	100	333
Průtok kysličovadla (Nm ³ ·h ⁻¹)	950	800	200	170
Průtok vlhkých spalin (Nm ³ ·h ⁻¹)	1 050	960	300	333
Průtok suchých spalin (Nm ³ ·h ⁻¹)	850	630	100	0
Průtok CO ₂ ze spalin (Nm ³ ·h ⁻¹)	100	0	100	0
Účinnost (%)	42,4	48,8	80,6	80,5



Obr. 6 Srovnání účinností spalovacího procesu v závislosti na přehřátí oksylichovadla

v konečném důsledku dojde k prodloužení plamene, dojde spíše ke zkrácení plamene vlivem vyšší reaktivnosti směsi a potažmo vyšší laminární rychlosti šíření plamene.

Z hlediska účinnosti vnějšího přenosu tepla můžeme opět s využitím rovnic 7 a 8 spočítat účinnosti spalovacího procesu a porovnat výsledky vzducho-palivového a kyslíko-palivového spalování čistého vodíku se zemním plynem. Pro naše účely uvažujme pec s vnitřní teplotou 1 200 °C, bez rekuperace/regenerace tepelné energie a konstantním tepelným příkonem cca 1 MW. Z hlediska stechiometrie pak můžeme přibližně očekávat výsledky podle tab. 1.

Z tab. 1 je patrné, že z hlediska účinnosti je u 4 základních režimů dosaženo rozdílných hodnot. Pokud srovnáme kyslíko-palivový režim se vzducho-palivovým, je zvýšení účinnosti zcela zřetelné.

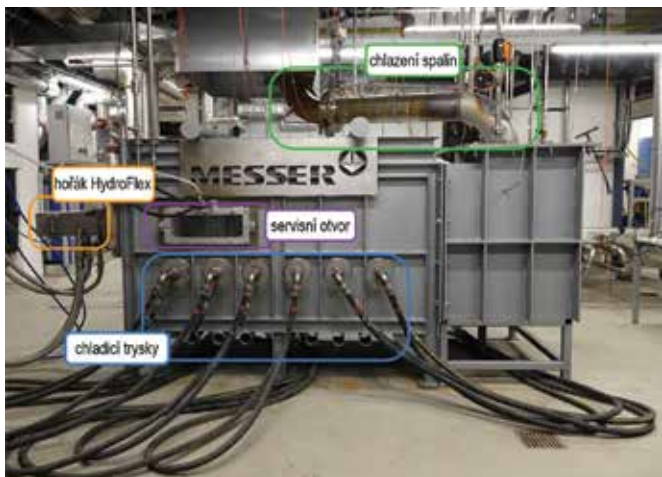
Zajímavé je, že mezi kyslíko-palivovými procesy spalování zemního plynu a vodíku není z hlediska účinnosti téměř rozdíl. U vzducho-palivových procesů lze 6,4% nárůst vysvětlit nižším objemem spalin v případě spalování čistého vodíku, kdy se s odcházejícími spalinami ztrácí méně energie.

Hodnoty z tab. 1 můžeme přepočítat na „efektivní“ příkon vztažený na vypočtené hodnoty účinnosti na základě korigovaného potřebného průtoku paliva.

V tab. 2 jsou vypočteny úspory emisí CO₂ v tunách za rok. Pochopitelně u vodíku je možné dosáhnout nulových procesních emisí CO₂. Není zde zahrnuta emisní stopa dotčených médií z hlediska těžby, výroby a distribuce. Velmi významného snížení emisí lze dosáhnout i vhodně navrženým kyslíko-palivovým procesem spalování zemního plynu a dosáhnout tak krátkodobých a středně-

Tabulka 2 Korigovaná stechiometrie režimu spalování zemního plynu a vodíku

	Zemní plyn-vzduch	Vodík-vzduch	Zemní plyn-kyslík	Vodík-kyslík
Účinnost (%)	42,4	48,8	80,6	80,5
Průtok paliva (Nm ³ ·h ⁻¹)	236	682	124	414
Průtok oksylichovadla (Nm ³ ·h ⁻¹)	2 242	1 638	248	207
Průtok CO ₂ ze spalin (Nm ³ ·h ⁻¹)	236	0	1 217	0
Emise CO ₂ (t/a)	2 317	0	1 217	0
Roční úspora CO ₂ (t/a)	ref.	2 317	1 100	2 317



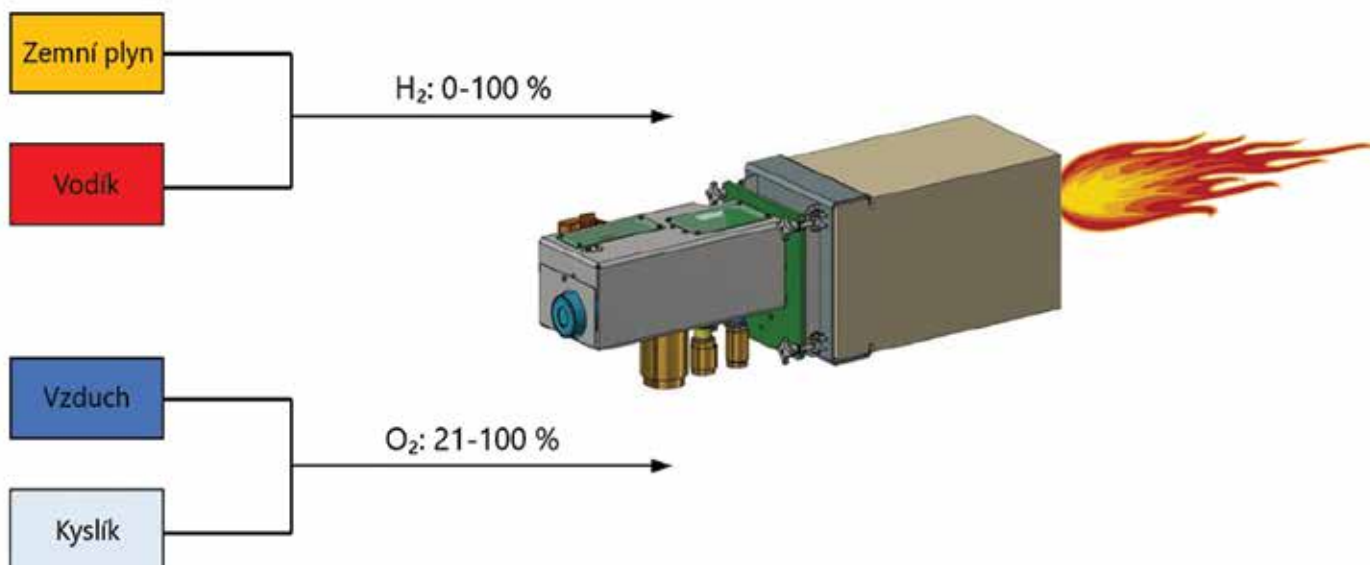
Obr. 7 Poloprovozní výzkumné spalovací zařízení [4]

dobých dekarbonizačních cílů v rámci dekarbonizace jinak těžce dekarbonizovatelných vysokoteplotních procesů.

5. Poloprovozní zkoušky

Jelikož je spalování vodíku ve směsi se zemním plynem potřeba dále zkoumat, byly v rámci studie [4] provedeny poloprovozní zkoušky a měření s cílem porovnat vliv zvyšujícího se množství vodíku v zemním plynu až do 100% koncentrace. Zkoušky byly vykonány na výzkumném spalovacím zařízení (obr. 7) ve formě malé zkušební pece umístěné v areálu Institutu tepelného inženýrství TU Graz.

Zařízení bylo osazeno prototypem patentovaného více-palivového hořáku, který je schopen spalovat směsi zemního plynu a vodíku s kyslíkem a spalovacím vzduchem v libovolném poměru těchto 4 médií. Hořák je znázorněn na obr. 8. Jedná se o hořák Messer HydroFlex a dá se říct, že se jedná o první hořák svého druhu. Hlavní výzvou při navrhování takového hořáku, jak již



Obr. 8 Hořák Messer HydroFlex

bylo zmíněno výše, je měnící se poměr výstupních rychlostí paliva a okysličovadla. Navrhování hořáků pouze na zemní plyn je jednodušší, jelikož stechiometrické násobky médií se v závislosti na zvyšujícím průtoku nemění. Návrh více palivového hořáku schopného spalovat vodík a zemní plyn v různých poměrech komplikuje fakt, že násobky stechiometrické násobky paliva a okysličovadla se zásadně mění (viz obr. 5).

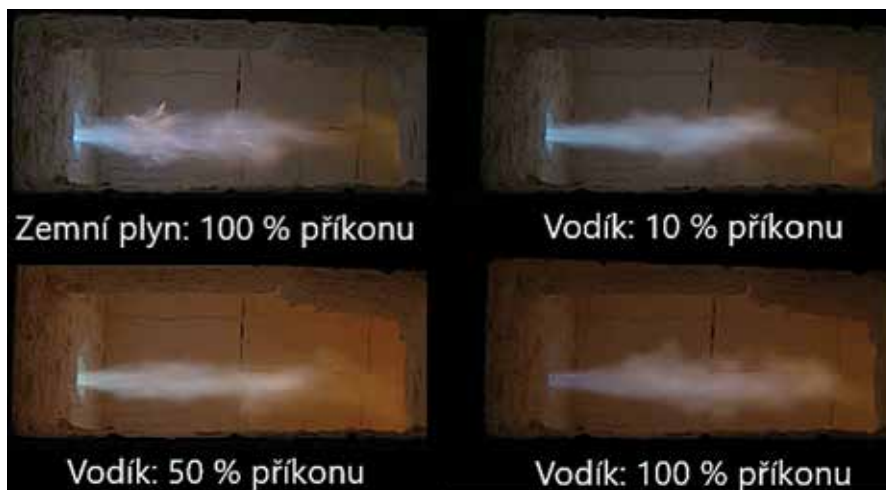
Zkoušky byly provedeny pouze v kyslíko-palivovém režimu, tedy bez spalovacího vzduchu.

Z naměřených dat vyplynulo, že vodík, ať už v čisté formě nebo v libovolné směsi se zemním plynem, lze bez problémů využít jako palivo pro vysokoteplotní spalovací procesy, pokud je použito vhodně navržených vysokorychlostních hořáků, aniž by muselo stávající spalovací zařízení projít výraznou rekonstrukcí. Velmi malé změny v rozložení teplot, délkách plamene a tepelných tocích ukazují, že hodnocená paliva lze použít zaměnitelně.

Na obr. 9 je zachycena změna tvaru plamene v závislosti na podílu nahrazeného energetického obsahu zemního plynu vodíkem.

Z obrázku 9 je patrné, že k zásadním změnám tvaru a délky plamene nedochází. Nápadné je snižování zářivosti v oblasti viditelného světelného spektra plamene s rostoucím podílem vodíku v zemním plynu. Tento jev si je možné vysvětlit nepřítomností částic ve formě čistého uhlíku (sazí) vznikajících při hoření uhlovodíkových paliv [8].

Výsledky rovněž ukazují, že 10% náhrada energetického obsahu zemního plynu vodíkem, což odpovídá koncentraci vodíku 28% a stechiometrickému násobku přibližně 1,24, je ve většině průmyslových vysokoteplotních ohřevů možná s minimálními úpravami stávajících zařízení a možností využití stávajících komerčně dostupných hořáků. Takovouto náhradou tedy můžeme docílit znatelného snížení emisí CO₂ z průmyslových vysokoteplotních procesů.



Obr. 9 Tvar plamene v závislosti na energetickém obsahu vodíku v zemním plynu [4]

6. Závěr

Na základě dosud známých faktů o spalování směsi vodíku se zemním plynem a provedených experimentů lze tvrdit, že v použití vodíku jako paliva pro vysokoteplotní spalovací procesy by z hlediska hořákové techniky neměly stát žádné významné překážky. Samozřejmě je nutné ještě provádět další výzkum a vývoj v této oblasti. Hlavní výzvu stále představuje výroba a distribuce vodíku v požadované nízkoemisní kvalitě. Současná doprava v bateriových vozech je značně neekonomická a pro energeticky náročné procesy je kapacitně nedostatečná. Větší ekonomický a technický smysl dává vtlačení vodíku do plynárenské soustavy a jeho doprava ve směsi se zemním plynem. Nabízí se také otázka, zdali nebude výhodnější využít zelený vodík k jeho konverzi na uhlovodíková paliva a v rámci cirkulární ekonomiky je dále využívat v dnes již dobře zavedených procesech.

Z dat vyplývá významný potenciál vodíku pro budoucí dekarbonizaci energeticky velmi náročných průmyslových vysokoteplotních procesů, nicméně pro její ekonomickou schůdnost je nutné škálovat a optimalizovat výrobu nízkoemisního a zeleného vodíku kvůli vyšší náročnosti na objemy ve srovnání se s čistým zemním plynem.

Rovněž přechod na kyslíko-palivové spalování zemního plynu může významným způsobem pomoci k naplnění krátkodobých a střednědobých dekarbonizačních cílů. Značný potenciál u kyslíko-palivových procesů připadá vedlejšímu produktu z elektrolýzy – kyslíku, který při procesu elektrolýzy vzniká v dostatečném množství a může být využit následně jako oksyličovadlo pro spalovací proces.

Literatura

- [1] A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. In: An official website of the European Union [online]. [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
- [2] Předehřev vyzdřených metalurgických pánví a agregátů pomocí kyslíkopalivových technologií. Hutnické lisy. 2022, LXXV(3-4), 60-66.
- [3] TRINKS, W. Industrial furnaces. 6th Edition. Hoboken, New Jersey: Jon Wiley & Sons, Inc.; 2004.

[4] SCHWARZ, Stefan, DAURER, Georg, GABER, Christian, DEMUTH, Martin, PRIELER, Rene, HOCHENAUER, Christoph. (2023). Experimental investigation of the combustion characteristics in oxy-fuel combustion of hydrogen-enriched natural gas on a semi-industrial scale. *International Journal of Hydrogen Energy*. 10.1016/j.ijhydene.2023.07.268.

[5] Hydrogen fundamentals. In: Hysafe [online]. 2006 [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: <http://www.hysafe.org/download/997>

[6] HAŠEK, Pavel. Tabulky pro tepelnou techniku. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1974.

[7] ČAPLA, Libor a Václav KOZA. Změny složení plynu distribuovaného v ČR [online]. In: . [cit. 2023-10-26]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/25237-zmeny-slozeni-plynu-distribuvaneho-v-cr>

[8] YIN Y., MEDWELL PR., GEE AJ., FOO KK., DALLY BB. Fundamental insights into the effect of blending hydrogen flames with sooting biofuels. *Fuel* 2023;331:125618. ISSN 00162361, doi:10.1016/j.fuel.2022.125618, URL, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623612024486>.

[9] FREMAUX S, BEHESHTI S-M, GHASSEMIH, SHAHSAVAN-MARCADEH R. An experimental study on hydrogen-rich gas production via steam gasification of biomass in a research-scale fluidized bed. *Energy Convers Manag* 2015;91:427e32. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.048>. ISSN 01968904

[10] RYDEN M., LYNDFELT A. USING STEAM REFORMING TO PRODUCE HYDROGEN WITH CARBON DIOXIDE CAPTURE BY CHEMICAL-LOOPING COMBUSTION. *Int J Hydrogen Energy* 2006;31(10):1271e83. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.003>. ISSN 03603199.

[11] KUZNETSOV M., REDLINGER R., BREITUNG W., GRUNE J., FRIEDRICH A., ICHIKAWA N. Laminar burning velocities of hydrogen-oxygen-steam mixtures at elevated temperatures and pressures. *Proc Combust Inst* 2011;33(1):895e903. ISSN 15407489, doi:10.1016/j.proci.2010.06.050, URL, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1540748910000763>.

[12] MAZAS A, FIORINA B, LACOSTE D, SCHULLER T. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygenenriched methane flames. *Combust Flame* 2011;158(12):2428e40. ISSN 00102180, doi:10.1016/j.combustflame.2011.05.014, URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001021801100160X>.

[13] ECKART S., RONG FZ., HASSE C., KRAUSE H., SCHOLTISSEK A. Combined experimental and numerical study on the extinction limits of non-premixed H₂/CH₄ counterflow flames with varying oxidizer composition. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48(37):14068e78. ISSN 03603199, doi:10.1016/j.ijhydene.2022.12.061, URL, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319922057652>.

[14] DROST S., ECKART S., YU C., SCHIEBL R., KRAUSE H., MAAS U. Numerical and experimental investigations of CH₄/H₂ mixtures: ignition delay times, laminar burning velocity and extinction limits. *Energies* 2023;16(6):2621. ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en16062621, URL, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2621>.



Ing. Lukáš Lasota (*1991)

Absolvent fakulty metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-TUO v současné době vykonávající práci Aplikačního inženýra pro vysokoteplotní procesy ve společnosti Messer Technogas. V oborech tepelné techniky, plynárenství a technických plynů se pohybuje od roku 2011.