



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## VLIV KVALITY VODÍKU NA VÝKON A ŽIVOTNOST SPALOVACÍCH MOTORŮ

EFFECT OF HYDROGEN QUALITY ON THE PERFORMANCE AND LIFETIME OF INTERNAL COMBUSTION  
ENGINES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Jošt

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matěj Poulíček

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Vojtěch Jošt**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Matěj Pouliček**  
Akademický rok: 2024/25

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

## Vliv kvality vodíku na výkon a životnost spalovacích motorů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato bakalářská práce analyzuje vliv kvality a čistoty vodíku na výkon a životnost spalovacích motorů upravených pro vodíkový pohon. Cílem je identifikovat klíčové parametry kvality vodíku a vyhodnotit jejich dopady na funkci a životnost motoru. Práce zahrnuje přehled vlastností vodíku, vliv nečistot na spalování, ekonomické a ekologické aspekty, a doporučení pro optimalizaci výroby, skladování a distribuce vodíku.

### Cíle bakalářské práce:

Analýza vlivu kvality a čistoty vodíku na výkon spalovacích motorů, včetně přehledu současných norem a standardů týkajících se kvality vodíku. Identifikovat klíčové parametry kvality vodíku, které ovlivňují provozní charakteristiky a životnost motorů. Vyhodnotit ekonomické a ekologické dopady použití vodíku různé kvality. Návrh doporučení pro optimalizaci výroby, skladování a distribuce vodíku.

### Seznam doporučené literatury:

GAVRILYUK, Alexander. Hydrogen Energy for Beginners. Pan Stanford Publishing Pte., 2014. ISBN 978-981-4364-78-2.

STOLTEN, Detlef a EMONTS, Bernd. Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. Německo: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr., 2016. ISBN 978-3-527-67429-9.

BASILE, Angelo a IULIANELLI, Adolfo. Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution. ISBN 978-0-85709-773-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je analyzovat vliv kvality a čistoty vodíku na výkon a životnost spalovacích motorů. Práce se zaměřuje na identifikaci klíčových parametrů kvality vodíku a na hodnocení vlivu různých nečistot na spalovací proces. Dále je věnována pozornost současným metodám výroby a skladování vodíku, včetně jejich dopadů na čistotu paliva a náklady spojené s těmito procesy. Práce také zohledňuje ekologické aspekty spojené s využíváním vodíku jako paliva a navrhuje opatření ke zvýšení efektivity a spolehlivosti vodíkových pohonů, včetně optimalizace konstrukce spalovacích motorů pro práci se znečištěným vodíkem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, vodíkové spalovací motory, kvalita vodíku, výroba vodíku, skladování vodíku

## ABSTRACT

The objective of this bachelor thesis is to analyse the effects of hydrogen quality and purity on the performance and lifetime of internal combustion engines. The thesis focuses on the identification of key hydrogen quality parameters and the evaluation of the effect of various impurities on the combustion process. In addition, attention is given to current methods of hydrogen production and storage, including their impact on fuel purity and the costs associated with these processes. The work also considers the environmental aspects associated with the use of hydrogen as a fuel and proposes measures to improve the efficiency and reliability of hydrogen propulsion, including optimization of the design of internal combustion engines for handling contaminated hydrogen.

## KEYWORDS

Hydrogen, hydrogen internal combustion engines, hydrogen quality, hydrogen production, hydrogen storage

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JOŠT, Vojtěch. *Vliv kvality vodíku na výkon a životnost spalovacích motorů*. Online, bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2025. Vedoucí práce Matěj Poulíček. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165951>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Matěje Poulíčka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 23. května 2025

.....

Vojtěch Jošt

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu Ing. Matěji Pouličkovi za cenné rady a připomínky při vypracování práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, blízkým a přátelům za podporu během studia.

# OBSAH

Úvod .....	11
<b>1 Princip spalovacího vodíkového motoru .....</b>	<b>12</b>
1.1 Spalování vodíku a konstrukce vodíkového motoru .....	12
1.2 Bezpečnostní aspekty spalování .....	13
<b>2 Výroba vodíku.....</b>	<b>15</b>
2.1 Elektrolýza vody.....	15
2.1.1 PEM.....	16
2.1.2 Alkalická elektrolýza.....	17
2.2 Parní reforming zemního plynu.....	19
2.3 Zplyňování uhlí .....	21
2.4 Jaderné reaktory 4.generace .....	23
<b>3 Skladování a doprava vodíku .....</b>	<b>24</b>
3.1 Metody skladování a doprava.....	24
3.1.1 Vysokotlaké skladování.....	25
3.1.2 Kryogenní skladování.....	26
3.1.3 Chemické skladování.....	29
3.2 Zhodnocení skladování.....	31
3.3 Vodíková křehkost.....	31
<b>4 Náklady na výrobu a skladování vodíku .....</b>	<b>34</b>
<b>5 Normy, standardy a regulace .....</b>	<b>36</b>
5.1 ČSN ISO .....	36
5.2 SAE International .....	37
5.3 ANSI.....	38
<b>6 Kvalita vodíku a vliv na výkon a životnost motoru .....</b>	<b>39</b>
6.1 Klíčové vlastnosti vodíku .....	39
6.2 Vliv nečistot na spalovací proces .....	39
6.2.1 Vodík .....	40
6.2.2 Voda .....	40
6.2.3 Uhlovodíky .....	40
6.2.4 Kyslík .....	40
6.2.5 Argon.....	41
6.2.6 Dusík.....	41
6.2.7 Oxid uhelnatý .....	41
6.2.8 Oxid uhličitý .....	41
6.2.9 Síra.....	42
6.2.10 Permanentní částice .....	42
6.2.11 Inertní prvky .....	42
6.2.12 Reaktivní prvky .....	42
<b>7 Optimalizace konstrukce motoru spalující znečištěný vodík .....</b>	<b>44</b>
7.1 Účinky vodíku na součásti motoru a motorový olej.....	44
7.1.1 Hlava válce a píst.....	44

---

7.1.2	Ventily a systém vstřikování.....	45
7.1.3	Výfukový systém .....	45
7.2	Používané materiály a jejich úpravy .....	45
7.3	Optimalizace konstrukce motoru .....	45
7.4	Optimalizace vstřikování a zapalování .....	47
7.5	Optimalizace výfukového systému .....	47
7.6	Mazání.....	48
7.7	Aditiva.....	48
<b>8</b>	<b>Optimalizace výroby a skladování vodíku.....</b>	<b>49</b>
8.1	Zvýšení produktivity a snížení ceny .....	49
8.2	Snížení emisí .....	49
8.3	Distribuce .....	50
	<b>Závěr .....</b>	<b>51</b>
	<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>62</b>

## ÚVOD

V současné době roste celosvětový tlak na snížení emisí skleníkových plynů a hledání alternativních zdrojů energie, které by mohly nahradit fosilní paliva. Vodík se jeví jako jedno z nejperspektivnějších paliv. V oblasti dopravy se využívá dvěma způsoby, buď prostřednictvím palivových článků nebo spalováním v upravených spalovacích motorech.

Palivové články se využívají u vozidel s elektropohonem, kde je vodík využíván jako nosič energie. Metoda je velmi účinná, nicméně vyžaduje velkou čistotu vodíku. Právě požadovaná čistota značně prodražuje jeho výslednou cenu.

Přímé spalování vodíku ve spalovacím motoru nabízí možnost využití stávající technologie s relativně malými úpravami. Výhodou je především rychlé doplnění paliva, známá konstrukce motorů a potenciálně nižší náklady na vodíkové palivo oproti palivu pro palivové články. Vodík jako palivo má vysokou energetickou hustotu na jednotku hmotnosti a při jeho spalování vzniká převážně vodní pára, čímž se výrazně snižují emise oxidu uhličitého. Nicméně čistota vodíku hraje zásadní roli v ovlivnění spalovacího procesu, provozních charakteristik a životnosti motoru.

Kvalita vodíku je ovlivňována především výrobou. Přítomnost nečistot, jako jsou voda, kyslík, oxid uhelnatý či síra, může kladně i negativně ovlivnit spalování. Příkladem nežádoucích jevů během spalování může být předčasné zapálení směsi nebo zpětný zášleh plamene (tzv. backfiring). Přítomné nečistoty mohou mít vliv na stabilitu spalování a životnost komponent motoru. Analýza vlivů jednotlivých kontaminantů je klíčová pro dosažení spolehlivého a efektivního provozu vodíkových spalovacích motorů v praxi. V následujících kapitolách je proto věnována pozornost nejen principům spalování, ale i procesům výroby, skladování a distribuce vodíku a jejich dopadům na provozní vlastnosti motorů.

Práce je rozdělena do několika hlavních částí. Nejprve je popsán princip spalovacího vodíkového motoru a bezpečnostní aspekty jeho provozu. Následuje přehled metod výroby a skladování vodíku se zaměřením na vliv těchto procesů na výslednou kvalitu paliva. Dále je analyzován dopad jednotlivých polutantů na spalování a životnost motoru. Závěrečné kapitoly se věnují návrhům optimalizací konstrukce motoru a doporučením pro výrobu a distribuci vodíku s ohledem na požadavky spalovacích motorů.

# 1 PRINCIP SPALOVACÍHO VODÍKOVÉHO MOTORU

Pro využití vodíku jako paliva existují dvě možnosti. Využití elektrické energie, získané pomocí elektrochemické reakce vodíku s kyslíkem v palivových článcích, pro pohon elektromotorů. Tato metoda kombinuje výhody rychlého doplnění paliva a efektivity elektromobilů.

Druhou možností je spalování vodíku v upraveném spalovacím motoru, podobně jako u běžných fosilních paliv. Vodík je smíchán se vzduchem, stlačen ve válci a následně zapálen. Je ho možné využívat jako primární palivo nebo jako aditivum v různých poměrech. U upravených zážehových motorů je zapálen pomocí zapalovací svíčky. V případě upravených vznětových motorů, kdy je vodík primárním palivem, je vznícen pomocí kompresního zapalování. V případě směsi, kde je vodík sekundárním palivem, je zapálen od paliva primárního (např. nafty).

Vodík má vysokou rychlost, teplotu hoření a velmi snadno se vznítí. To je jak výhodou, tak i nevýhodou. Vysoká rychlost a teplota hoření zefektivňuje spalování, ale snadné vznícení vodíku může mít za následek nežádoucí předčasnou detonaci.

Výsledkem spalování směsi vodíku je primárně vodní pára, ale při vyšších teplotách mohou vznikat oxidy dusíku. Čímž se značně minimalizují emise škodlivých látek, jako je například oxid uhličitý nebo uhelnatý. Kvůli nízké hustotě vodíku je nutné optimalizovat vstřikování a jeho skladování. Aby bylo dosaženo bezpečného provozu motoru je potřeba brát zároveň v potaz nebezpečnost vodíku vyplývající z jeho vysoké teploty hoření, neviditelného plamene a jednoduchého vznícení. Tyto nežádoucí jevy lze teoreticky zmírnit využitím vodíku s polutanty, které díky jejich vlastnostem mohou ovlivnit teplotu hoření směsi a rychlost šíření plamene, čímž klesne riziko detonačního spalování a backfiringu. Výhodou menší teploty hoření je také menší tvorba oxidů dusíku.

První vodíkový motor byl zkonstruován již v roce 1807 švýcarským inženýrem Francoisem Isaacem de Rivazem. Jednalo se o úplně první motor s vnitřním spalováním, který jako palivo využíval právě vodík smísený se vzduchem. Tento motor se kvůli své konstrukci a složitému manuálnímu ovládní neshledal s velkým úspěchem.[1] Zájem o motory poháněné vodíkem se vrací až v poslední době, kdy se řeší nedostatek fosilních paliv a hledá se vhodná alternativa.

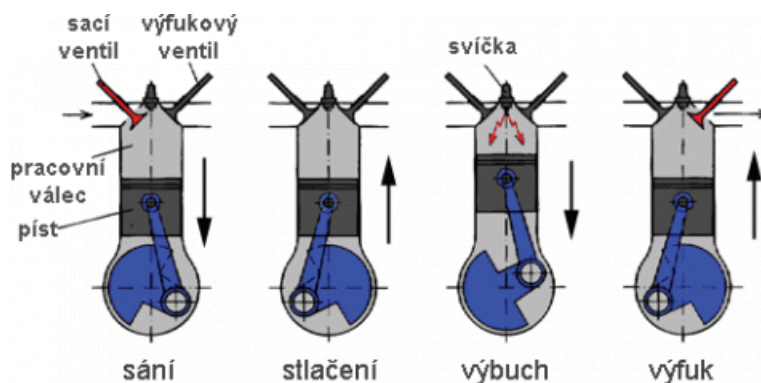
## 1.1 SPALOVÁNÍ VODÍKU A KONSTRUKCE VODÍKOVÉHO MOTORU

Vodík hoří velmi rychle, a i při chudé směsi má vysokou výhřevnost a stabilní plamen. To napomáhá ke snížení emisí oxidu dusíku. Motor poháněný vodíkem je při chudé směsi třeba přeplňovat.[25]

Vodík lze spalovat ve směsi se vzduchem nebo jako příměs v klasickém palivu jako je benzín, nafta nebo zemní plyn. Každá z těchto variant má své výhody i nevýhody.

Pro spalování vodíku se využívá konvenčních čtyřdobých zážehových pístových motorů, které jsou vhodně upraveny pro spalování paliva. Motor pracuje podle Ottova cyklu, popisující ideální tepelný oběh. Tento pracovní oběh čtyřdobého pístového spalovacího motoru se skládá ze 4 fází. (Viz obr. 1)

Během první fáze – sání, se píst pohybuje z horní úvrati do dolní. Těsně po dosažení horní úvrati a pohybu dolů se uzavírá výfukový ventil a otevírá se ventil sací. Během sací fáze se do válce nasává nová palivová směs. Následuje komprese, při které dojde těsně po dosažení dolní úvrati a pohybu pístu do horní úvrati, k uzavření i sacího ventilu. Při pohybu pístu z dolní do horní úvrati dochází ke kompresi palivové směsi, přičemž se směsi se zvyšujícím tlakem zvyšuje i teplota. Při dosažení horní úvrati dochází k zapálení stlačené směsi pomocí svíčky. Následuje fáze expanze, při které se píst pohybuje z horní úvrati do úvrati dolní, přičemž koná práci. Po dosažení dolní úvrati se otevírá výfukový ventil a při pohybu pístu z dolní úvrati do horní dochází k vytlačení zplodin z válce do výfukové soustavy.



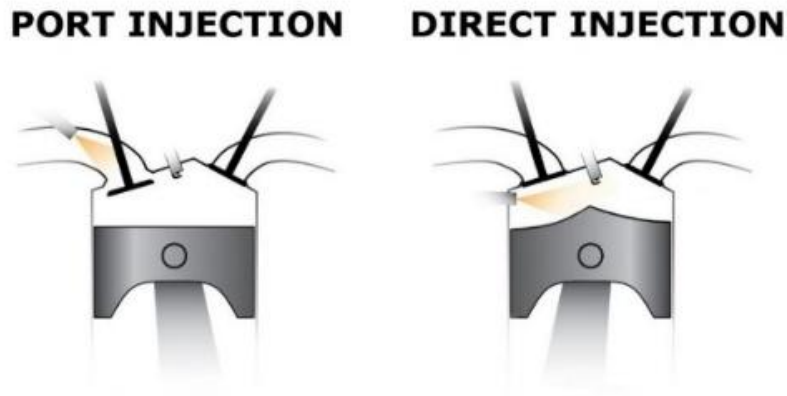
Obr. 1 Schéma pracovního cyklu čtyřdobého pístového motoru [2]

## 1.2 BEZPEČNOSTNÍ ASPEKTY SPALOVÁNÍ

Nejčastějším problémem při využívání vodíku jako paliva pro spalovací motor je předčasné vznícení a detonace paliva. To se při zvyšujícím se obsahu vodíku ve směsi paliva projevuje tzv. klepáním. Ke klepání dochází při samovolné detonaci, nezpůsobené jiskrou od zapalovací svíčky, směsi předtím, než je píst těsně za horní úvrati. K tomuto jevu dochází i u běžných fosilních paliv. U vodíku je problém způsobován nízkou iniciační energií 0,02 mJ, širokým rozsahem hořlavosti a rychlostí hoření. K iniciaci detonace nejčastěji dochází od horkých míst, jako je horká zapalovací svíčka nebo výfukový ventil.[3][4]

Dalším nebezpečným jevem může být, kvůli rychlosti hoření a jednoduchému vznícení, tzv. zpětný zášleh plamene. Ke zpětnému zášlehu do sacího potrubí může dojít při špatném načasování zavírání sacího a výfukového ventilu. Tzv. backfiring může být způsoben i malou zhášecí vzdáleností vodíku (přibližně 0,64 mm). K backfiringu může dojít i přes uzavřený sací ventil, právě díky malé zhášecí vzdálenosti. Při špatné konstrukci palivového systému by tento jev mohl být velmi nebezpečný.[5]

Proto je potřeba konstrukci vodíkového spalovacího motoru velmi vhodně navrhnout. Velkou hrozbou je palivový systém. Ten lze rozdělit na tři hlavní typy: centrální, nepřímé a přímé vstřikování. Porovnání přímého a nepřímého vstřikování je znázorněno na obrázku 2. Jako nejbezpečnější se jeví právě typ přímého vstřikování. Ten značně snižuje pravděpodobnost nežádoucích jevů, umožňuje přesně dávkovat množství vstřikovaného paliva a lépe regulovat poměr vodíku a vzduchu.[3][4][6]



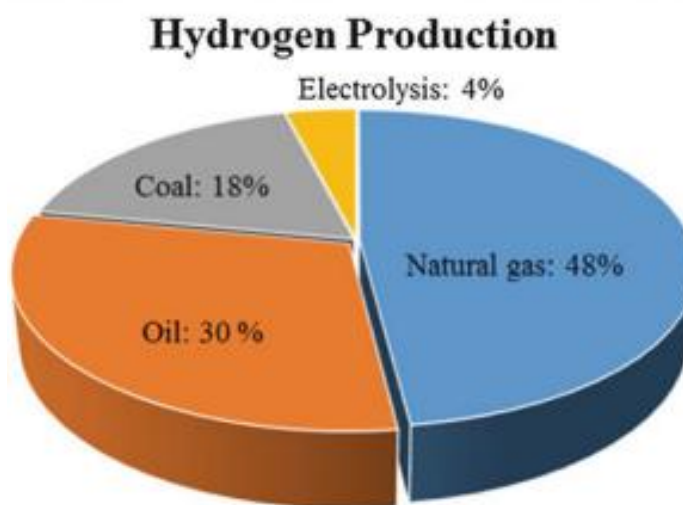
Obr. 2 Schéma přímého a nepřímého vstřikování [7]

Při návrhu je třeba v neposlední řadě dbát na dobré odvětrávání klikové skříně a motorového prostoru. K únikům paliva dochází i u klasických paliv, které mají větší hustotu než vodík. Při špatném odvětrání by mohlo dojít ke vznícení nahromaděného vodíku. To by mohlo způsobit i požár vozidla. Úniky lze zmírnit vytvořením směsi vodíku a polutantů s většími molekulami, čímž se zhorší prostupnost směsi kolem pístních kroužků.[81]

Konstrukci motoru a palivové soustavy je teoreticky možné zjednodušit, a tím i zlevnit, využitím znečištěného vodíku s příměsí polutantů, jako jsou například oxid uhličitý, dusík nebo argon. To může mít v některých případech pozitivní vliv i na provoz spalovacího motoru. Tyto nečistoty v určitých koncentracích mohou snižovat teplotu hoření plamene, čímž dojde k omezení nežádoucích jevů, jako je backfiring nebo detonační hoření. Nižší teplota spalování zpomaluje rychlost hoření a redukuje pravděpodobnost předčasného zážehu, což je klíčové pro zajištění stabilního chodu motoru a prodloužení životnosti jeho komponent. Kontrolované množství těchto polutantů tak může zlepšit spolehlivost motoru. Zároveň je nutné dbát na to, aby jejich koncentrace neovlivnila celkovou účinnost spalování nebo nezpůsobila jiné provozní problémy. Vlivu jednotlivých polutantů se podrobněji věnuje šestá kapitola.

## 2 VÝROBA VODÍKU

Výroba vodíku je momentálně nejvíce zastoupena zpracováním fosilních paliv, a to přibližně 96 % z celkové výroby. Nejčastějším způsobem je parní reforming zemního plynu nebo zplynování uhlí. Zbývá 4 % se vyrábí elektrolýzou vody. Jednoduché znázornění rozdělení popisuje obrázek 3. Potenciálním způsobem by mohla být výroba v momentálně vyvíjených jaderných reaktorech čtvrté generace – HTGR, čímž by se produkce vodíku měla zlevnit.[1][9] U každé metody vznikají s vyrobeným vodíkem i další prvky, které ve směsi mohou být potenciálními polutanty a mohly by mít vliv jak na samotný spalovací motor, tak na jiné komponenty.



Obr. 3 Rozložení produkce vodíku [11]

### 2.1 ELEKTROLÝZA VODY

Elektrolýza vody je nejstarší a nejznámější metodou výroby vodíku.[1] Ve většině případů se vodík vyrábí z hydroxidu sodného nebo hydroxidu draselného, kde vodík je vedlejším produktem při elektrolýze solanky, výroba pomocí elektrolýzy vody je pouze malým podílem. Jedná se o jednu z nejefektivnějších metod, kdy účinnosti nízkoteplotní a vysokoteplotní elektrolýzy se pohybují mezi 80 – 95 %.[9] Oproti jiným procesům využívajících k výrobě fosilní paliva, je další výhodou, že se jedná o bezemisní metodu výroby. Podstatou je štěpení vazeb prvků ve sloučenině pomocí jednosměrného elektrického proudu, za vzniků jednotlivých prvků dané sloučeniny.[12] Takto vyrobený vodík lze barevně označit jako žlutý, růžový nebo zelený – podle zdroje elektrické energie.

Podle skupenství vody můžeme elektrolýzu rozdělit na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nebo podle iontu přenášející náboj na kyselou a alkalickou. Při kyselé elektrolýze přenáší náboj ionty  $H^+$  a při alkalické náboj přenáší ionty  $OH^-$ . [9] Základní proces štěpení vody popisuje chemická rovnice rozkladu vody na vodík a kyslík.



Kde se 2 molekuly vody rozdělí na 2 molekuly vodíku a kyslíku. Z pohledu čistoty vodíku se kyslík dá považovat za polutant, i když se neuvolňuje ve velkém množství, ale při vyšších koncentracích zvyšuje hořlavost látky a může reagovat a tvořit oxidy.

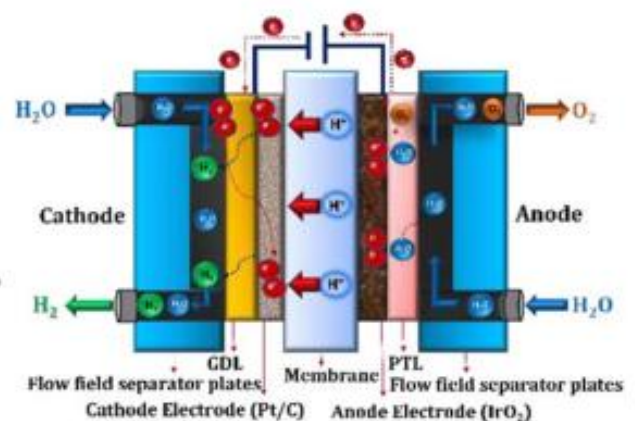
### 2.1.1 PEM

Nejperspektivnější metodou výroby vodíku pomocí elektrolýzy je technologie PEM.[14] Metoda se řadí do skupiny kyselé elektrolýzy vody. Využívá se zde proton-výměnné membrány jako pevného elektrolytu – deionizované vody. Tato membrána propouští pouze protony a odděluje prvky vodíku a kyslíku. Nosičem elektrického proudu je kladný náboj (kationt) vodíku  $H^+$ . Schematicky znázorněno na obrázku 4.[9][14]

Rozklad probíhá na anodě (kladně nabitě elektrodě), která je vyrobena z oxidu iridia ( $IrO_2$ ), kde dojde k oxidační reakci. Voda se rozloží na kyslík, protony vodíku a elektrony. Následně protony vodíku prochází přes membránu ke katodě (záporně nabitě elektrodě), vyrobené z platiny, kde dochází k redukční reakci protonů vodíku  $H^+$  s elektrony. Výsledkem reakce je tvorba molekul vodíku  $H_2$ . Výstupními produkty PEM je na katodě uvolněný vodík v plynném skupenství a na anodě ve stejném skupenství uvolněný kyslík  $O_2$ . [9][14][15] Vodík může být dále zachycen a uskladněn nebo dále využit jako průmyslový plyn, eventuálně v palivových člancích. Stejně tak kyslík, může být zachycen a použit pro jiné účely nebo volně vypuštěn do atmosféry.



Rovnice 2 popisuje oxidační reakci na anodě. Rovnice 3 popisuje následnou redukční reakci na katodě. Rovnice 3 vyjadřuje celkovou reakci.[14]



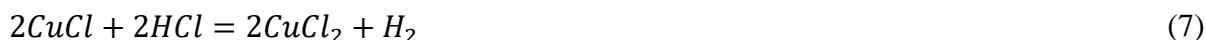
Obr. 4 Schéma PEM technologie [14]

Předností této metody je vysoká čistota vodíku, která dosahuje až 99,9999 %. Dále využití vstupujícího média ve formě čisté deionizované vody.[15] Další výhodou je životnost elektrolyzéro. Ta se pohybuje mezi 50 000 a 100 000 provozními hodinami. Dalším možným pozitivem je vyšší hustota provozního proudu, [14] čímž se zvýší rychlost chemických reakcí, ale naopak může dojít ke zvýšení teploty a rychlejší degradaci elektrod. Výhodou pro následné využití PEM může být kompaktní a odlehčená konstrukce elektrolyzéro.[17][18] Tohoto lze využít při aplikaci u osobních motorových vozidel nebo vozů MHD.

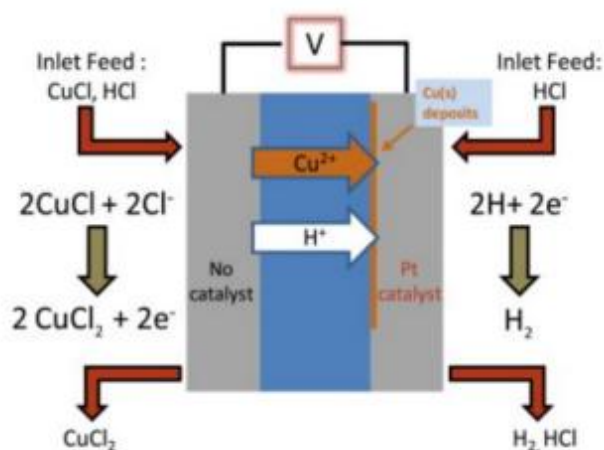
Nevýhodou jsou v první řadě vyšší pořizovací náklady PEM elektrolyzérů, z důvodu použití drahých kovů, platiny a iridia, na elektrody a katalyzátory. Další nevýhodou je citlivost na čistotu deionizované vody, kvůli zanášení membrány nečistotami. Dále kyselé prostředí, které napomáhá korozi komponentů.[14][18]

Krom klasické metody PEM, kde se k získávání vodíku rozkládá deionizovaná voda na vodík a kyslík, existuje podobná metoda, při které se využívá elektrolyzy chloridu měďného (CuCl) a kyseliny chlorovodíkové (HCl). (Obr. 5) Výslednými produkty této varianty metody PEM jsou dvě molekuly chloridu měďnatého (CuCl<sub>2</sub>) a molekula vodíku (H<sub>2</sub>).[15]

Průběh elektrolyzy je zde obdobný jako u tradiční metody PEM. Do elektrolyzérů vstupuje chlorid měďný (CuCl) a kyselina chlorovodíková (HCl). Po dvou částečných reakcích vychází vodík s doprovodným chloridem měďnatým. V první půlce reakce dochází na anodě k oxidační reakci chloridu měďného (CuCl) a kyseliny chlorovodíkové (HCl) na chlorid měďnatý (CuCl<sub>2</sub>) a na katodě se uvolňuje vodík. Tedy celkově z chloridu měďného (CuCl) a kyseliny chlorovodíkové (HCl) vznikne chlorid měďnatý (CuCl<sub>2</sub>) a vodík (H<sub>2</sub>).[15][19]



Rovnice 5 popisuje reakci na anodě. Rovnice 6 popisuje reakci na katodě. Rovnice 7 vyjadřuje celkovou reakci.



Obr. 5 Schéma CuCl – HCl elektrolyzérů [15]

### 2.1.2 ALKALICKÁ ELEKTROLÝZA

Výroba vodíku pomocí alkalické elektrolyzy (AWE), používaná více než 100 let, je díky nižším nákladům a delší životnosti v porovnání s PEM, momentálně nejvíce používanou komerční technologií.[9][15]

Podstatou metody je nízkoteplotní elektrolyza (teploty se pohybují mezi 30 °C a 90 °C), při které dochází k rozkladu vody nejčastěji v elektrolytu 20 – 30% hydroxidu draselného na vodík a kyslík. V elektrolyzérů dojde ke dvěma částečným reakcím, podobně jako u metody PEM. Na katodě dochází k redukci molekuly vody, kdy vzniká vodík a ionty hydroxidu(OH<sup>-</sup>).

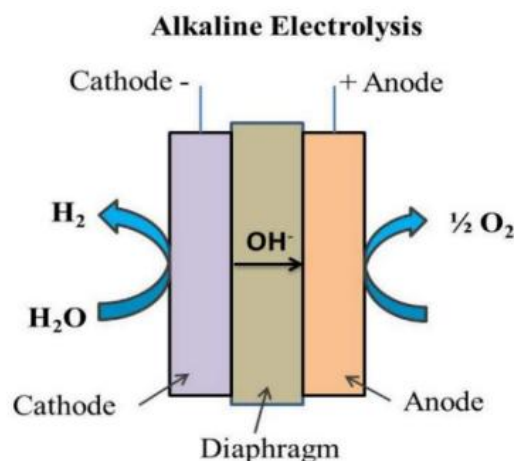
Tyto ionty prochází přes porézní membránu k anodě a dochází k uvolňování kyslíku a vody. (Obr. 6) Anoda a katoda jsou vyrobeny z nerezové niklové oceli. Membrána se dříve vyráběla z Azbestu, ale nyní se používají keramické a kompozitní materiály, např. Zirfon, které nemají špatný vliv na životní prostředí. Vyrobený vodík má čistotu až 99,9998 % při účinnosti 60–80 %.[9][13][14][15]



Rovnice 8 popisuje částečnou reakci na anodě, rovnice 9 popisuje částečnou reakci na katodě a rovnice 10 popisuje celkovou reakci.

Použitím levnějších materiálů dílů elektrolyzáru jsou hlavní výhodou nízké náklady. Dále dlouhá životnost a spolehlivost, kdy životnost se pohybuje mezi 20000 až 100000 hodinami. Životnosti a spolehlivosti je docíleno robustní konstrukcí. Proto je tento elektrolyzáru vhodný pro průmyslové použití s očekávanou dlouhodobou a stabilní produkcí vodíku. Elektrolyzáru je, díky jednodušší konstrukci, schopný odolávat výkyvům energie a je ho tedy možné pohánět i energií z obnovitelných zdrojů. To přispívá k výrobě tzv. zeleného vodíku.[15][20]

Mezi nevýhody patří omezená hustota proudu, a to pouze 0,2–0,8 A·cm<sup>-2</sup>. V porovnání s metodou PEM je hustota proudu až pětinašobně menší. Další nevýhodou je použití korozivního elektrolytu hydroxidu draselného, který může reagovat s méně odolnými součástmi elektrolyzáru. Elektrolyzáru má nižší efektivitu při vyšším tlaku, takže pokud je vodík vyžadován ve stlačeném stavu, tato metoda není nejvhodnější. [14][15][20]



Obr. 6 Alkalické elektrolyza [15]

Elektrolyticky vyrobený vodík se vyznačuje svou vysokou čistotou a účinností metod. Takto čistý vodík je vhodný především pro citlivé palivové články, které jsou náchylné na kontaminanty. Pro spalovací motory je takto čistý vodík zbytečně drahý. Cena jednoho vyrobeného kilogramu vodíku se pohybuje mezi 70 a 170 Kč. Nicméně tato metoda je do budoucna perspektivní, s nástupem nových jaderných reaktorů 4. generace.

Tab. 1 Obsah polutantů – výroba PEM [23]

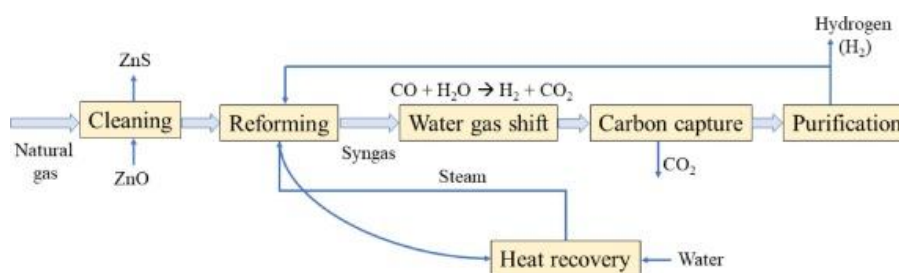
PEM		
Název	Značka	Množství [ $\mu\text{mol/mol}$ ]
Oxid uhelnatý	CO	0,02 ÷ 0,20
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,02 ÷ 5,00
Metan	CH <sub>4</sub>	0,01 ÷ 0,50
Voda	H <sub>2</sub> O	0,06 ÷ 5,00
Sirovodík	H <sub>2</sub> S	0,002 ÷ 0,040
Kyslík	O <sub>2</sub>	0,5 ÷ 25,0
Dusík	N <sub>2</sub>	1 ÷ 100
Argon	Ar	0,5 ÷ 80,0
Formaldehyd	CH <sub>2</sub> O	0,005
Kyselina mravenčí	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,1
Amoniak	NH <sub>3</sub>	0,1
Helium	He	5 ÷ 45
Uhlovodíky	CH <sub>x</sub>	0,05 ÷ 0,50

Tabulka 1 obsahuje množství polutantů obsažených ve vodíku, vyrobeného metodou PEM. Rozsahy hodnot množství vychází z 8 vzorků paliv, odebraných čtyřmi metrologickými institucemi. Pravděpodobnost přítomnosti polutantů je velmi malá, mezi více časté se řadí voda, kyslík a dusík.

## 2.2 PARNÍ REFORMING ZEMNÍHO PLYNU

Nejrozšířenější a levnější metodou výroby vodíku je parní reforming zemního plynu, případně bioplynu. Vodík vyrobený touto metodou je označován jako modrý nebo šedý. Za modrý vodík se označuje ten, který je vyroben s nižší uhlíkovou stopou. Principem procesu je reakce složky zemního plynu, metanu nebo biometanu, s vodní párou. Při tomto procesu dochází ke vzniku vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Reakce probíhá při teplotách mezi 700 a 950 °C, proces výroby vyžaduje použití katalyzátoru, nejčastěji na bázi niklu, který urychluje proces a zvyšuje jeho účinnost. Ta se pohybuje okolo 75 %.[8][14]

Při procesu výroby vodíku se ohřívá zemní plyn, který je z největší části zastoupen metanem. Plyn je ohříván pomocí vodní páry za přítomnosti katalyzátoru na bázi oxidu nikelnatého. Při zvýšené teplotě a tlaku mezi 3 a 5 MPa dochází k reformní reakci metanu a vodní páry v poměru přibližně 1:3, tím vzniká vodík, oxid uhelnatý a v malém množství oxid uhličitý. Oxid uhelnatý lze konverzní reakcí s vodní párou přeměnit na vodík a oxid uhličitý. Výrobní proces znázorňuje obrázek 7. Touto konverzní reakcí se zvýší efektivita produkce. Vedlejším produktem tedy je oxid uhličitý.[21][22]

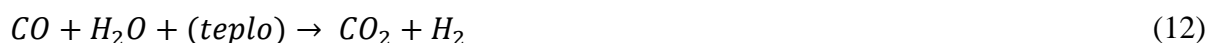


Obr. 7 Proces reformingu zemního plynu [22]

Dvoufázovou chemickou reakci lze popsat následujícími rovnicemi. V první fázi dochází k reformingu neboli rozbourávání zemního plynu. Metanu je za vysoké teploty přivedena vodní pára, výsledkem reakce je oxid uhelnatý a vodík. Tuto reakci popisuje rovnice 11.



Pro zvýšení efektivity následuje konverzní reakce oxidu uhelnatého, při které se vzniklému oxidu uhelnatému přivede vodní pára. Získané produkty jsou další vodík a oxid uhličitý, který je potřeba zachytávat a případně dále zpracovávat, aby nebyl volně uvolňován do atmosféry. Reakci popisuje rovnice 12.



Mezi hlavní výhody reformingu patří technologická vyspělost, tím je metoda velmi ekonomická a efektivní. To je vhodným aspektem pro masovou výrobu vodíku. Nicméně zvýšená produkce oxidu uhličitého může působit jako nevýhoda. To je nutné vhodně zabezpečit, aby byl co nejvíce snížen negativní dopad na životní prostředí.[8][21][22]

Pro vozidla poháněná palivovými články je vysoká čistota vodíku klíčová, a proto takto vyrobený vodík vyžaduje dodatečné čištění od polutantů ve formě oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, malého množství metanu nebo dusíku. Jejich přítomnost ve směsi může být u spalovacích motorů výhodou. Směs s polutanty  $\text{CO}_2$  a  $\text{N}_2$  může snižovat teplotu a rychlost hoření plamene, to má kladný vliv na snížení rizika backfiringu a detonačního hoření.

Tab. 2 Obsah polutantů – výroba reformingem zemního plynu [23]

Reforming zemního plynu		
Název	Značka	Množství [ $\mu\text{mol/mol}$ ]
Oxid uhelnatý	CO	0,010 ÷ 0,053
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,01 ÷ 0,42
Metan	CH <sub>4</sub>	0,01 ÷ 0,44
Voda	H <sub>2</sub> O	0,5 ÷ 2,0
Sulfa	H <sub>2</sub> S	0,04
Kyslík	O <sub>2</sub>	0,5 ÷ 50,0
Dusík	N <sub>2</sub>	1 ÷ 100
Argon	Ar	0,5 ÷ 80
Formaldehyd	CH <sub>2</sub> O	0,005
Kyselina mravenčí	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,1
Amoniak	NH <sub>3</sub>	0,1
Helium	He	12 ÷ 50
Uhlovodíky	CH <sub>x</sub>	0,05 ÷ 1,00

Tabulka 2 uvádí množství polutantů vyplývajících z výroby vodíku parním reformingem metanu se střídavou tlakovou adsorpcí. Rozsahy množství vychází z 8 různých vzorků paliv, měřených 4 metrologickými institucemi. S největší pravděpodobností se ve finálním produktu, mimo vodíku, bude vyskytovat oxid uhelnatý, dusík, metan nebo argon. Tyto nežádoucí složky mohou mít vliv na chod a životnost spalovacího motoru.[23]

Některé nečistoty mohou negativně ovlivnit výkon motoru, například oxid uhelnatý může snižovat účinnost spalování, zatímco přítomnost vody nebo metanu může ovlivnit stabilitu hoření. Na druhou stranu lze tyto polutanty využít ke snížení teploty hoření, což pomáhá redukovat riziko detonačního spalování a zpětného zášlehu plamene. Proto může motor pracovat stabilněji a jeho součásti mohou být méně tepelně namáhány, což prodlužuje jejich životnost.

Momentálně je tato metoda výroby vodíku jednou z nejlevnějších. Konečný produkt vyžaduje následné čištění, aby vodík dosáhl žádané čistoty hlavně pro palivové články, citlivé na vodíkovou čistotu. Takové úpravy mohou být nákladné a pro využití vodíku ve spalovacím motoru zbytečné. Cena kilogramu vyrobeného vodíku se pohybuje mezi 23 a 80 Kč, na výdejním stojanu cena za kilogram dosahuje 240 Kč. „*Náklady na čištění vodíku se pohybují mezi 40 až 60 % z celkové ceny v závislosti na technologii.*“ [57] Zkrácení výrobního postupu o čištění může přinést nejen ekonomické výhody, ale i zjednodušení konstrukce palivového systému, díky nižším teplotám spalování snížení opotřebení motorových komponent a lepší řízení hoření pro stabilnější chod motoru.

### 2.3 ZPLYŇOVÁNÍ UHLÍ

Zplyňování uhlí je neekologičtější variantou z metod využívající fosilních paliv. Při zplyňování reaguje pevné palivo s vodní párou a vzduchem při teplotě 800–1200 °C a tlaku mezi 0,1 a 4 MPa. Reakcí vzniká vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a další vedlejší plynné produkty jako je metan nebo dusík. [24] Takto vyrobený vodík je označován jako černý nebo hnědý, v závislosti na typu zplyňovaného uhlí.

Proces zplyňování probíhá v reaktoru, do kterého vstupuje uhelný prach smísený s vodou a vzduch. Při vysoké teplotě se začne voda odpařovat a tvořit vodní páru, tento proces postupně přemění pevné uhlí na tzv. syntézní plyn (syngas). Uhlík reaguje s kyslíkem a dochází k oxidační reakci, popsanou rovnicí 13, produktem je oxid uhelnatý.

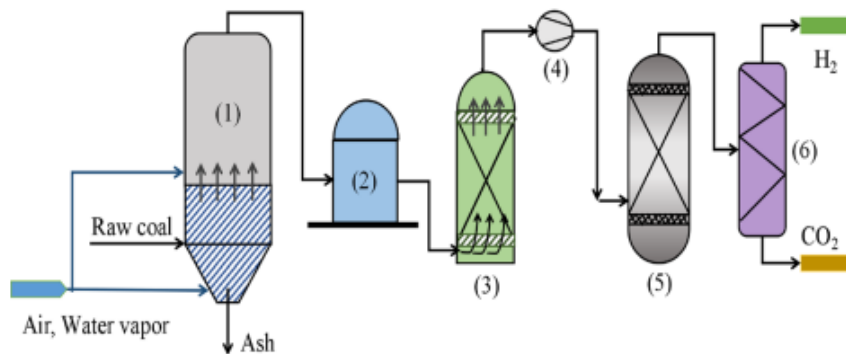


Následuje konverze oxidu uhelnatého pomocí vodní páry, produktem reakce je vodík s oxidem uhličitým. Popisuje rovnice 14. Tato reakce probíhá za nižších teplot. Při vysokoteplotní konverzi se teploty pohybují okolo 360 °C za přítomnosti katalyzátorů ve formě oxidu železitého a chromitého. Ty jsou vysoce náchylné na vyšší obsah sloučenin síry. A při nízkoteplotní konverzi se teploty pohybují v rozsahu 200–250 °C, zde jsou katalyzátory na bázi oxidu měďnatého a zinečnatého. Jsou stejně náchylné na obsah síry ve směsi, jako katalyzátory využívané u vysokoteplotní konverze. [25]



Posledním krokem této metody je čištění vodíku. Z reakční směsi se odstraní oxid uhličitý a případný sirovodík. Vodík lze čistit fyzikálním nebo chemickým principem. Avšak toto čištění není dostatečné a je třeba vodík ještě dočistit od zbylého oxidu uhličitého a malého množství dusíku. Výrobní proces zobrazuje obrázek 8. [24][25]

V případě použití pro spalovací motory nejsou nároky na čistotu tak vysoké, takže následné čištění nebo dočišťování není zcela nutné. To může být prostor pro možné úspory v průmyslové výrobě. Právě díky obsaženým polutantům, které je náročné odstranit, není tato metoda vhodná pro palivové články. Takto vyrobený vodík stojí v přepočtu na české koruny mezi 27 až 50 Kč za kilogram.



(1) Coal gasifier, (2) Gas tank, (3) Desulfurization tower, (4) Compressor, (5) CO converter, (6)

PSA hydrogen extraction tower

Obr. 8 Proces zplyňování uhlí. [26]

V tabulce 3 jsou uvedeny podíly výstupních plynů ze zplyňování uhlí. Ideální podmínky výroby jsou při teplotě 750 °C – 840 °C a tlak 2–4,5 MPa. Nízké hodnoty CO a CO<sub>2</sub> jsou způsobeny efektivním zachytáváním.[27]

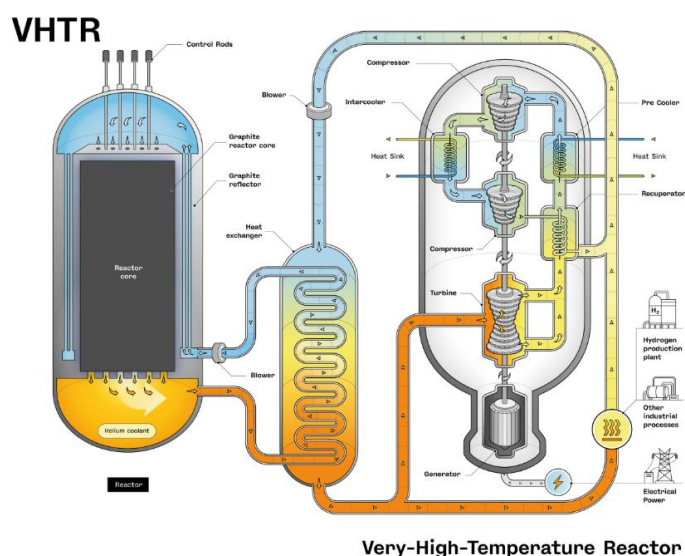
Tab. 3 Podíly výstupních plynů při optimálních podmínkách [27]

Zplyňování uhlí		
Název	Značka	Množství [%]
Vodík	H <sub>2</sub>	82 ÷ 84
Oxid uhelnatý	CO	0 ÷ 5
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0 ÷ 5
Metan	CH <sub>4</sub>	5 ÷ 15
Sirovodík	H <sub>2</sub> S	0,6 ÷ 0,9
Dusík	N <sub>2</sub>	< 1

## 2.4 JADERNÉ REAKTORY 4.GENERACE

Zatím teoretickou možností pro budoucí komerční výrobu tzv. růžového vodíku zůstávají jaderné reaktory 4. generace, které se vyznačují jednoduchostí, vyšší účinností a bezpečností. Jejich konstrukce umožňuje využití dříve použitého, pro dnešní jaderné elektrárny již nevhodného, jaderného paliva. To je docíleno uzavřeným palivovým cyklem. (Obr. 9) Recyklací vyhořelého paliva reaktor produkuje minimální jaderný odpad. Reaktor lze využít nejen na výrobu elektrické energie a tepla, ale také k výrobě vodíku. Předpokládané spuštění reaktorů 4. generace pro komerční provoz je v roce 2040.[25]

Čistý vodík bude produkován pomocí vysokoteplotní elektrolýzy a chemických cyklů. K tomuto využití budou sloužit tzv. VHTR (Very High Temperature Reactor), neboli vysokoteplotní reaktory chlazené heliem.[25][28]



Obr. 9 Vysokoteplotní jaderný reaktor 4. generace – produkce vodíku [28]

### 3 SKLADOVÁNÍ A DOPRAVA VODÍKU

Další částí, která může ovlivnit kvalitu vodíku je skladování a jeho přeprava. Vodík lze skladovat a převážet jako jiná, běžně používaná paliva. Používají se tři základní metody – uchovávání ve vysokotlakých nádobách, kryogenních nádobách (Obr. 10) nebo navázáním látky na jiný prvek – chemické uchovávání.

Konstrukční návrh těchto zařízení musí být velmi dobře promyšlen, s ohledem na okolí stavby, personál a jiné možné vlivy. Je třeba zohlednit možné úniky a jiné nebezpečné jevy. To může být, díky vlastnostem vodíků, při provozu problém. Vodík hoří bezbarvým neviditelným plamenem o teplotě přes 2000 °C. U plyných paliv, jako je zemní plyn, je velmi malá pravděpodobnost, že dojde ke vznícení směsi při úniku potrubím a případnému zášlehu plamene zpět. U vodíku to je pravý opak, vodík je velmi reaktivní a k iniciaci detonace směsi při úniku může dojít velmi rychle. Skladovací nádrž bývá opatřena tzv. komínem (potrubím pro odvod úniků do bezpečného prostoru). U dnes běžných skladovacích stanic na zemní plyn není potřeba takových bezpečnostních opatření jako tomu je u vodíku. Zde je žádoucí správné použití bezpečnostních ventilů proti zpětnému zášlehu, aby nedošlo k detonaci směsi v potrubí nebo hůře v nádobě.

Nevýhodou skladování vodíku je značná nutnost jeho čistoty. Ne každá metoda je vhodná pro znečištěný vodík. Výše zmíněné polutanty mohou mít nežádoucí vliv na možnosti skladování.



Obr. 10 Zásobník na vodík [29]

#### 3.1 METODY SKLADOVÁNÍ A DOPRAVA

Skladování a doprava je jedním z hlavních problémů využití vodíku jako paliva. Vodík se běžně vyskytuje jako plyn s nízkou hustotou, lehce difunduje a je vysoce hořlavý. Proto je nutné ho bezpečně uchovávat. Je možné využít tří metod, které lze rozdělit do dvou hlavních kategorií – fyzické a chemické skladování.

Do kategorie fyzického skladování vodíku se řadí dvě metody, při kterých je vodík skladován v nádržích v plynné nebo kapalné formě. Vodík v plynném skupenství je možné uchovávat ve vysokotlakých nádobách. Ty musí podléhat přísným bezpečnostním předpisům. Vysokotlaké nádoby musí být dokonale těsné a odolné vůči vysokým tlakům, aby se zamezilo úniku vodíku. Další možností, jak fyzicky uchovávat vodík, je kryogenní metoda skladování, kdy je vodík, který má teplotu varu -252,9 °C[30], ochlazován na velmi nízkou teplotu, aby došlo k jeho zkapalnění a následnému uskladnění v kryogenních nádobách. Do druhé kategorie, chemického uchovávání, spadá metoda, při které se vodík pomocí chemických vazeb naváže na molekuly pevného materiálu pomocí absorpce a adsorpce.

### 3.1.1 VYSOKOTLAKÉ SKLADOVÁNÍ

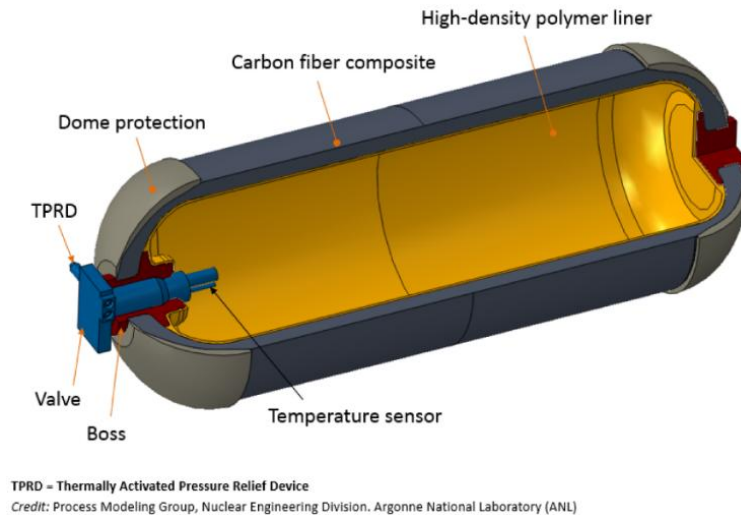
Skldování vodíku ve vysokotlakých tancích je momentálně nejrozšířenější metodou, díky své jednoduchosti a relativně nízké ekonomické náročnosti v porovnání se skladováním vodíku v kapalném skupenství. Cílem obou metod je získat co největší množství vodíku, do co nejmenšího rozměru nádoby. Toho je docíleno vysokým tlakem, který se pohybuje mezi 35 – 70 MPa[32], pro tuto kompresi je zapotřebí přibližně 5 – 20 % [32] z hodnoty nízké výhřevnosti vodíku. To je mnohonásobně méně než při využití kryogeniky.

Značnou výhodou této metody je již zmíněná jednoduchost zařízení. Zásobníky jsou levné, mají velkou kapacitu a nízkou hmotnost. Je možné je využít jako stacionární zásobník nebo pro mobilní použití. To je důležité pro samotnou distribuci vodíku od výroby ke koncovému využití. Pro stacionární využití se používá několika menších bezešvých tlakových nádob s menším objemem, které jsou spolu spojeny do celku pomocí vhodných ventilů a potrubí. (Obr. 11) Takové řešení má maximální povolený pracovní tlak 65 MPa[32] a objem láhve je 0,411 m<sup>3</sup>[32]. Nicméně je možné vyrobit i větší zásobník pro stacionární využití. Další možností je využití mobilních zásobníků v dopravě pro vodíkové automobily, vozidla hromadné dopravy nebo nákladní vozy. V tomto případě se jedná o mobilní zásobníky. Samotná konstrukce zařízení musí být vhodně navržena, aby splnila důležitá bezpečnostní kritéria. Materiál zásobníků by neměl podléhat vodíkové křehkosti při pokojové teplotě, měl by vydržet možný nárůst teplot při plnění a čerpání. Zásobník musí být velmi těsný, musí vydržet možný únik a případnou detonaci vodíku.

Tlakové nádoby je možné rozdělit podle materiálu. Kovové nádoby nebo nádoby ze slitin hliníku, kovové nádoby s částečným nebo plně kompozitním opláštěním a na plně kompozitní nádoby s polymerovou vložkou. (Obr. 12)



Obr. 11 Bezešvé tlakové láhve pro uskladnění vodíku [33]



Obr. 12 Schéma mobilního zásobníku pro automobilní využití [34]

Výhodou je rychle přístupný vodík v plynném stavu a samotná jednoduchost, vyspělost technologie, relativně nízké provozní náklady a modularita zásobníků. Ovšem nevýhodou mohou být energetické nároky na kompresy a potřeba odolných materiálů pro výrobu zásobníku. Ty musí zabránit úniku vodíku difundací a být odolné proti vodíkové křehkosti při pokojové teplotě. Při návrhu musí být kladen důraz na bezpečnostní hlediska spojená s možnými stavy, které by mohly nastat. To může být exploze samotné nádoby, únik skladovaného plynu nebo zvýšení teploty při plnění. Například Hyundai Nexo disponuje nádrží s možností uchovat až 6,3 kg vodíku.[8]

Využití vysokotlakých nádob v automobilovém průmyslu je nejvhodnější variantou pro uskladnění vodíku. Díky jednoduché konstrukci je docílena relativně nízká hmotnost a velká kapacita. Metoda uskladnění není náročná na samotnou čistotu vodíku. Do láhve je možné stlačit prakticky cokoliv s minimálními komplikacemi. Polutanty obsažené ve skladovaném vodíku při vysokém tlaku mohou fungovat jako inhibitory vodíkové křehkosti, což je velkou výhodou. Právě obsažený kyslík a oxid siřičitý brzdí křehnutí materiálu. Kontaminanty jako metan nebo dusík nemají žádný efekt. Naopak helium a voda křehnutí urychlují.[31]

### 3.1.2 KRYOGENNÍ SKLADOVÁNÍ

Kryogenní skladování vodíku spočívá v uchovávání vodíku v kapalném stavu při extrémně nízkých teplotách nižších, než je bod zkapalnění vodíku, tedy  $-252,9\text{ °C}$ [32]. Podchlazený a zkapalněný vodík je uchováván ve speciálně izolovaných nádržích, které minimalizují tepelné ztráty a tak i jeho odpařování. Značnou nevýhodou této technologie je násobně větší energetická náročnost oproti skladování ve vysokotlakých nádobách. Energie potřebná pro zkapalnění vodíku je mezi 30 – 40 % [32] z nízké výhřevnosti vodíku, to je podstatně více než u vysokotlakého skladování.

Tato metoda skladování je vhodná spíše pro stacionární, ale i mobilní využití. Zkapalněný vodík je skladován při teplotě  $-252,9\text{ °C}$ [32] a nižších provozních tlacích. Ty se pohybují mezi 3 až 18 bary. Společnost Chart Inc., specializující se na kryogenní energetická zařízení, je jedním z předních výrobců skladovacích i distribučních zařízení na světě. Ve svých prospektech uvádí zařízení pro skladování vodíku, od výrobníků až po vodíkové nádrže pro automobilní využití.

Malé mobilní nádrže, vhodné pro využití v automobilu operují s provozními tlaky mezi 3 až 8 bary a mají kapacitu  $35 \text{ kg} \pm 5 \%$  v závislosti na provozních podmínkách.[35] Malý mobilní zásobník je zobrazen na obrázku 13. Pro použití vodíku jako paliva je potřeba zkapalněný vodík odpařit zpět do plynného skupenství a následně přímo vstříknout do válce. K odpařování vodíku je využívána chladicí kapalina vozidla. Značnou nevýhodou nádrže je její samotná hmotnost, která činí 340 kg.[35] Takže využití takových nádrží je vhodné spíše pro kamiony nebo autobusy. Nádrže je možné řadit za sebe do celků, čímž se zvýší kapacita. Plnění je podobné klasickému tankování již rozšířených nádrží na stlačený nebo zkapalněný zemní plyn, tedy jednoduchým připojením jedné plnicí hadice přes bajonet.



Obr. 13 Mobilní kryogenní nádrž pro automobily [35]

Větší mobilní nádrže jsou využívány jako zařízení pro transport zkapalněného vodíku. Rozměry a od nich odvíjený objem se liší v závislosti na zemi, pro kterou je zásobník, podobný kamionovému návěsu pro převoz benzínu, určen. Model ST-18600H 155 (Obr. 14) má kapacitu 25 401 kg vodíku při délce přibližně 16 m a průměru 2,6 m. Pracovní tlak zásobníku je necelých 11 barů.[36]



Obr. 14 Návěs pro převoz zkapalněného vodíku ST-18900H 155 [36]

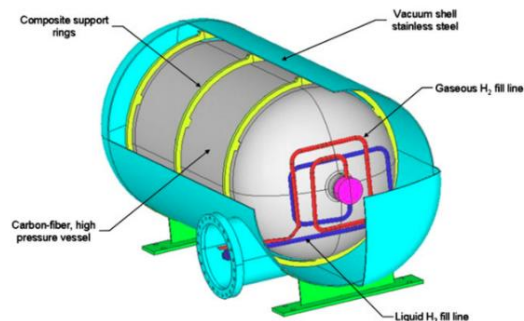
U stacionárních zásobníků nebo stanic nejsou limitovány rozměry ani hmotnost, takže se značně zvětšuje možná kapacita zařízení. Ta u jedné nádrže může být až 1500 kg[37]. Vyšší kapacity je možné využívat pro vodíkové čerpací stanice, podobné stanicím na zemní plyn. (Obr. 15) Zde se pracovní tlak pohybuje kolem 17 barů[37]. Nejen u čerpacích stanic je nutné zajistit bezpečnost provozu zařízení. To je konstruováno tak, aby nedocházelo k úniku vodíku při plnění ani čerpání. Je opatřeno protipožárními prvky, vakuovými uzávěry a bezpečnostními ventily. Pro zvýšení životnosti a kvality uchovávaného vodíku je optimalizován kondenzát v potrubním systému. Celé zařízení je možné vzdáleně řídit a při jakékoli poruše zasáhnout. Pro řízení tlaků se využívá ventilů, které při nutné potřebě regulace upustí tlak do tzv. komínu, který je vyveden do nutné výšky, kde je vodík bezpečně rozptýlen. Nádrže i zásobníky splňují různé bezpečnostní normy a certifikace, jako jsou např. standardy CGA G-5.5, CGA H-3 nebo normy ASME, DOT, SAE a jiné regulace.



Obr. 15 Vodíková čerpací stanice [37]

Kryogenní zásobník má dvouplášťovou konstrukci s vakuem v meziprostoru, čímž je zajištěna větší tepelná izolace a jeho pevnost. (Obr. 16) Vnitřní nádrž i vnější plášť jsou vyrobeny ze svařených a zakroužených nerezových plechů do tvaru válce. Neexistují žádná omezení velikosti nebo tloušťky obálky, takže lze teoreticky vyrobit velmi velký zásobník, operující s vyššími pracovními tlaky.

V případě kryogenního skladování vodíku je nutné vstupující vodík prvně vyčistit. Přítomnost polutantů ve formě vlhkosti (vody), oxidu uhličitého a jiných, výše zmíněných polutantů má nežádoucí vliv na skladovanou směs vodíku i samotnou nádrž a je třeba je prvně odfiltrovat. Znečištěná směs má jiné vlastnosti než čistý vodík, takže může docházet k segregaci obsažených látek, kondenzaci vody a odparům. Krom vysoké energetické náročnosti a komplexnosti zařízení je tato metoda náchylná na čistotu vodíku. Ta pro spalovací motory není tolik klíčová, proto při úvaze negativ není tato metoda pro vozidla vhodná.



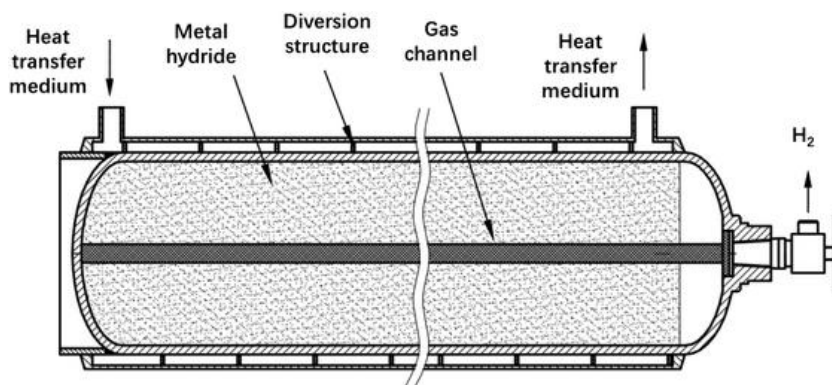
Obr. 16 Konstrukce kryogenního zásobníku [38]

### 3.1.3 CHEMICKÉ SKLADOVÁNÍ

Protože má vodík velmi nízkou energetickou hustotu, není ho prozatím tolik energeticky výhodné skladovat ve vysokotlakých nebo kryogenních nádržích. Zde má potenciál další varianta skladování. Chemické skladování využívá principu chemického navázání vodíku na jiné prvky, díky čemuž může být jednodušeji a bezpečněji skladován či přepravován oproti výše zmíněným metodám. Vodík lze vázat do sloučenin a následně ze sloučenin získat zpět jako samotný vodík. Pro uskladnění se využívá nádob, podobných tlakovým lahvím. (Obr. 17)

Metoda umožňuje bezpečnější a kompaktnější skladování vodíku oproti skladování v plynném nebo kapalném stavu. Dnes se využívají tři způsoby skladování. Nízkoteplotní a vysokoteplotní hydridy kovů jsou jednou z možností. Další možnost pro jednoduché uskladnění vodíku jsou kapalné organické nosiče vodíku (LOHC). Třetí možností, která se v poslední době dostává do popředí, jsou chemické sloučeniny, jako je např. amoniak.

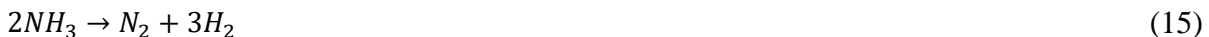
Využití hydridů kovů představuje perspektivní metodu uchování vodíku u aplikací, vyžadujících bezpečné a kompaktní uskladnění s možností reverzního uvolňování vodíku. Hydridy kovů a obecně chemické skladování dosahuje vyšších energetických hodnot oproti jiným metodám a minimalizují rizika spojená s vysokým tlakem či nízkými teplotami. Principem metody je navázání atomů vodíku na kovový materiál, čímž vzniká hydrid kovu. Proces probíhá při relativně nízkých teplotách a kontrolovaných podmínkách, to umožňuje bezpečné uchování vodíku bez většího rizika úniku nebo výbuchu. Vodík lze pomocí tepla a tlaku, čímž dojde k rozkladu hydridu kovu, znovu uvolnit a dále využít. Hydridy kovů se dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní v závislosti na teplotě, při které se uvolňuje vodík. Mezi nízkoteplotní hydridy se řadí hydridy na bázi hořčíku, titanu nebo lanthanoidů. Ty umožňují snadné a rychlé uvolnění vodíku při teplotách pod 200 °C. To je vhodné hlavně pro mobilní aplikace, kde je žádoucí rychlá dostupnost čistého vodíku ve spojení s bezpečným způsobem uskladnění. Nevýhodou je vyšší hmotnost materiálů. Některé hydridy mohou při skladování znečištěného vodíku dlouhodobě degradovat, což se může projevit např. na snižování kapacity. Své využití si nízkoteplotní hydridy najdou například u palivových článků. Druhým typem jsou vysokoteplotní hydridy, u kterých dochází k uvolňování vodíku při teplotách nad 300 °C. Jejich výhodou je vyšší skladovací kapacita, stabilita a životnost materiálů. Nevýhodou jsou nutné vysoké provozní teploty, složitější regenerace hydridů a vyšší náklady na materiál. Díky potřebě vyšších teplot se spíše využívají pro stacionární aplikace nebo v kombinaci se zdroji odpadního tepla, např. při průmyslových procesech.[39][40]



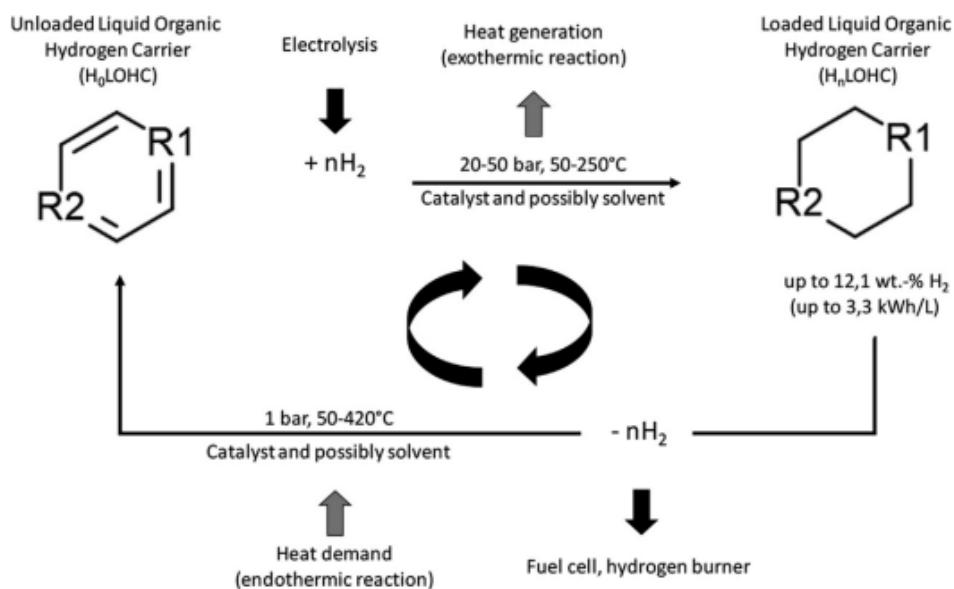
Obr. 17 Schéma skladování vodíku metodou hydridu kovu [44]

Druhým, dnes stále více testovaným způsobem chemického skladování, je využití kapalných organických nosičů vodíku (LOHC). Jedná se o potenciálně levný, bezpečný a jednoduše ovladatelný způsob skladování a přepravy vodíku ve velkém množství. Navíc tato metoda umožňuje dlouhodobé skladování bez odparu nebo jiných ztrát. K uskladnění vodíku je využíváno reverzibilní hydrogenace a dehydrogenace dvojných vazeb uhlíku, k tomu dochází za zvýšených teplot a tlaků. Naopak následné uvolňování vodíku probíhá za zvýšené teploty, ale při atmosférickém tlaku s nutným využitím heterogenního katalyzátoru. Schéma principu zobrazuje obrázek 18. Použitelnými nosiči jsou např. N-ethylkarbazol, dibenzyltoluen, metanol, toluen nebo kyselina mravenčí. Své využití LOHC najde v dopravě, energetice nebo jako možnost uložení přebytečné energie z obnovitelných zdrojů. V případě, že budou vyvinuty efektivní dehydrogenační procesy při nízkých teplotách, může být LOHC v budoucnu využíváno jako palivové médium pro mobilní aplikace. Velkou výhodou metody je její bezpečnost, LOHC jsou v běžných podmínkách nehořlavé a neexplozivní, díky chemickým vazbám se eliminuje riziko úniku a samovznícení. Kvůli podobným fyzikálním vlastnostem jako mají klasická fosilní paliva, je transport a manipulace snadná. Na hranici výhod a nevýhod jsou energetické nároky, se kterými se pojí šetrnost k životnímu prostředí. Při využití přebytečné energie z obnovitelných zdrojů může být proces dehydrogenace uhlíkově neutrální i při vysoké energetické náročnosti. Nevýhodou jsou komplexní katalyzátory, které jsou nutností pro efektivní hydrogenaci a dehydrogenaci. Katalytická technologie vyžaduje do budoucna další vývoj, pro zvýšení efektivity procesu.[39][41][42]

Třetí metodou pro uchovávání vodíku je využití chemických sloučenin jako je např. amoniak. To se jeví jako nejperspektivnější metoda do budoucna, jelikož amoniak obsahuje 17,6 % vodíku a lze jej snadno skladovat a přepravovat. Vodík je vázán ve formě amoniaku. Ten je možné skladovat jako kapalinu při pokojové teplotě a tlaku 8,5 bar nebo zchlazený na  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  při atmosférickém tlaku. K uvolnění vodíku dojde tepelným rozkladem neboli krakováním, na dusík a vodík (popisuje rovnice 15).



Tento proces si vyžaduje přítomnost katalyzátorů na bázi niklu nebo ruthenia a teploty v rozmezí 400 až 600  $^{\circ}\text{C}$ . Amoniak je dnes široce rozšířen v chemickém průmyslu pro výrobu hnojiv a jiných chemikálií, přičemž se z něj může zpětně získávat vodík. Amoniak samotný může být využíván jako palivo pro některé palivové články, které umožňují spalovat amoniak bez nutnosti rozkladu.



Obr. 18 Koncept LOHC skladování [39]

Pro svou snadnou skladovatelnost a přepravu je amoniak nejperspektivnější variantou pro vodíkovou infrastrukturu. Má vyšší obsah vodíku na jednotku objemu než kapalný vodík, díky čemuž je zvýšena efektivita přepravy vodíku. Výhodou je již existující rozsáhlá infrastruktura pro výrobu, skladování a přepravu, čímž se minimalizují investiční náklady. Nevýhodou je nutnost katalyzátoru a vysoké teploty při rozkladu. Amoniak je toxický plyn s dráždivými účinky, se kterým musí být zacházeno za přísných bezpečnostních opatření. Může docházet ke korozi mědi nebo slitin na její bázi, to ovlivňuje výběr materiálů pro další využití. Při krakování může být kvalita vodíku ovlivněna stopovým množstvím dusíku nebo samotného amoniaku. To může při spalování způsobovat vznik oxidů dusíku, což vyžaduje efektivní filtraci zplodin. Jak již bylo výše uvedeno, amoniak má korozivní účinky vůči některým kovům či plastům, které jsou používány ve vodíkových systémech.[39][42][43]

Přítomnost nečistot, jako jsou oxid uhelnatý, oxid uhličitý, metan, dusík či voda, může negativně ovlivnit schopnost hydridů absorbovat a desorbovat vodík, což vede ke snížení účinnosti skladování. Z tohoto důvodu je pro chemické skladování vodíku v hydridových systémech nezbytné používat vysoce čistý vodík. Pro aplikace ve spalovacích motorech, kde je možné tolerovat určité množství nečistot, je tato metoda nevýhodná. Vhodněji se jeví fyzické uchovávání vodíku.

### 3.2 ZHODNOCENÍ SKLADOVÁNÍ

Nejvhodnější metodou pro automobily se spalovacím motorem je tlakové skladování, které spojuje jednoduchost, relativně nízké náklady a schopnost uchovávat i méně čistý vodík. Kryogenní skladování nabízí vysokou energetickou hustotu, ale je problematické kvůli ztrátám a vysokým provozním nákladům. Chemické skladování je sice bezpečné, ale díky své hmotnosti a citlivosti na znečištění není pro spalovací motory ideální.

### 3.3 VODÍKOVÁ KŘEHKOST

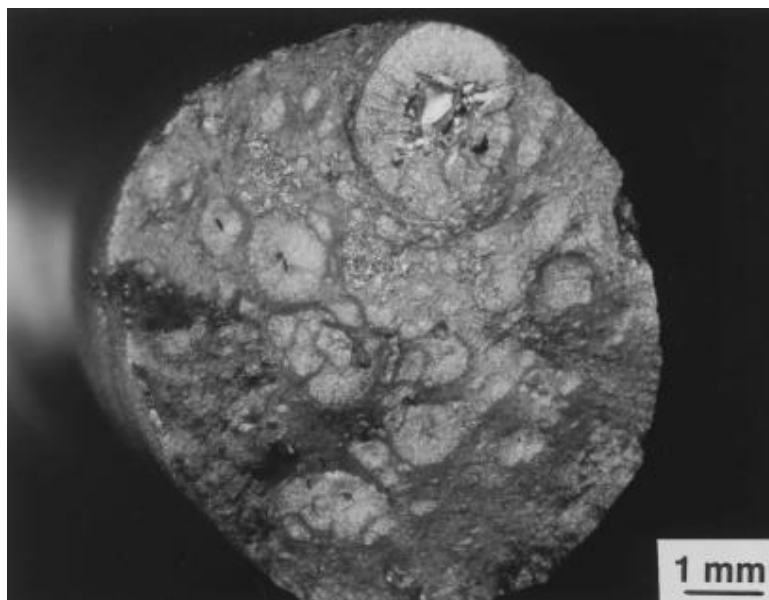
Výroba, skladování a konečné použití vodíku vyžaduje správný výběr používaných materiálů, které jsou schopny bezproblémově fungovat v interakci s vodíkem. Jedním z hlavních problémů pojících se s vodíkem je mimo jiné tzv. vodíková křehkost (HE z anglického hydrogen embrittlement).

Ta má vliv na mechanické vlastnosti kovových materiálů jako jsou oceli, precipitačně vytvrzované oceli nebo různé slitiny a superslitiny včetně slitin hliníku, který by kvůli své nízké hmotnosti mohl být variantou pro mobilní zásobníky. Díky vodíkové křehkosti dochází i při malých napětích ke křehkému lomu. Bylo dokázáno, že vodíková křehkost výrazně snižuje makroskopickou a mikroskopickou pevnost v tahu, únavovou pevnost a lomovou houževnatost. Ke snižování mechanických vlastností dochází v závislosti na frekvenci a rozsahu zatěžování. Vodík, díky své malé atomové stavbě, snadno proniká do kovových materiálů. Typickými zdroji vodíku v kovech je vysokotlaký vodík nebo korozivní reakce. To napomáhá difuznímu vnikání atomů vodíku do kovu. Difuze je proces migrace atomů, kdy částice jedné látky s vyšší koncentrací samovolně přechází do prostředí s nižší koncentrací. Pro difundování částice využívají různých mechanismů jako např. substituční nebo vakanční mechanismus, kdy difundující částice využívá chyb v krystalické mřížce kovu a zastává pozici chybějícího atomu. Pro vysvětlení vodíkové křehkosti byly vytvořeny různé mechanismy, popisující děj v kovu. Například tyto čtyři: vodíkem indukovaná fázová transformace (HIPT), vodíkem zesílený mechanismus rozkladu (HEDE), mechanismus lokalizované plasticity zesílené vodíkem (HELP) a vodíkem indukované vakance (HESIV).[45][46]

Model mechanismu HEDE je nejjednodušším mechanismem z výše zmíněných. Byl představen v roce 1959 společností Troiano. Jeho princip spočívá ve snížení kohezní pevnosti materiálu v oblasti špičky trhliny, kde dochází k indukci atomu vodíku. Snížení pevnosti je způsobeno přechodem elektronu vodíku z 1s orbitalu do 3d orbitalu atomu železa. Při posunu trhliny dochází k jejímu zvětšení vlivem přítomnosti vodíkových atomů a působením napětí dochází ke snížení pevnosti materiálu a vzniku trhlin. Tím dochází ke snižování povrchové energie a lámání materiálu. Metoda má jedinou limitaci, a to v omezení měření kohezní síly.[45][47]

Mechanismus HELP byl představen v roce 1972 a je dodnes uznáván. Popisuje nashromážděný vodík v blízkosti trhliny, který snižuje odolnost proti vodíku a zvyšuje pohyb dislokací, díky čemuž se dislokace chovají jako nositelé plastické deformace v trhlíně. Dislokace se pohybují kvůli vodíkem snížené mezi kluzu. Lomová plocha vykazuje lokální plastickou deformaci materiálu a pásy skluzu na špičce trhliny. Způsob lomu je závislý na koncentraci vodíku, mikrostruktuře a intenzitě napětí. Různé studie zjistily, že lokální plastická deformace je zde významnější než ta makroskopická. Mechanismus byl pozorován u různých materiálů s různými krystalickými mřížkami. Studie také neprokázaly přímou závislost mezi uvažovaným a skutečným modelem mechanismu HELP.[45][47]

Teorie tlaku vodíku popisuje jev, při kterém se atomy vodíku shlukují v místech defektů, jako jsou např. mikrotrhliny. Dochází k lokálnímu nahromadění atomů vodíku, které se spojují do vodíkových molekul, jenž se neustále rozšiřují směrem k defektům a přeměňují se na plynný vodík o vysokém tlaku. Takové lokální zatěžování postupně eskaluje k praskání materiálu. Při pohledu na zkoumaný vzorek je možné vidět dutiny, které následně vytvoří dutinový lom, takové dutiny jsou nazývány jako tzv. rybí oka. (Obr. 19)[45][51]



Obr. 19 Porušený vzorek s rybími oky [51]

Zvýšená čistota vodíku napomáhá vodíkové křehkosti. Proto využití znečištěného vodíku může mít kladný vliv na materiály, které přichází do kontaktu s vodíkovou směsí. Zlepšení projevů HE se různí s tlakem a teplotou směsi. Studie prokazují, že obsažený kyslík, oxid siřičitý a oxid uhelnatý fungují jako inhibitory, tedy zpomalují efekt vodíkové křehkosti. Kyslík při vyšším obsahu ve směsi může snížit rychlost růstu únavových trhlin a absorpci vodíku do materiálu. Při testech došlo po předúpravě s oxidem siřičitým až k úplnému zamezení adsorpce vodíku. Adsorpci je možné vrátit žiháním materiálu. Oxid uhelnatý u nízkolegovaných ocelí inhibuje růst únavových trhlin. Neutrální příměsí je metan, dusík, oxid uhličitý nebo oxid dusný. Naopak akcelerační účinky má sirovodík nebo obsažená voda. Uhlíkové a nízkolegované oceli vykazují degradaci mechanických vlastností při kontaktu s čistým vodíkem nebo vodíkovou směsí s kontaminanty urychlujícími HE. Naopak austenitické oceli vykazují vyšší odolnost vůči HE i při vyšších tlacích, spojených například se skladováním nebo stlačením při spalování.[31][51]

Vodíkové křehkosti je důležité předcházet. Proto se využívá vhodných materiálů a konstrukčních úprav pro minimalizaci koncentrace napětí nebo ochranných vrstev z vhodných materiálů pro zpomalení difuze vodíku. Vhodným, dnes běžně používaným materiálem jsou austenitické nerezové oceli. Ty nejsou tolik náchylné na vodíkovou křehkost nebo korozi. U materiálů, kde je vodík již obsažen, je možné využít tzv. vypékání pro uvolnění vodíku, podobně jako u chemického skladování v hydridech kovů. Při snaze zabránit difuzi vodíku je možné využívat již zmíněných ochranných vrstev, které lze rozdělit na nátěry a oplátování. Vhodné jsou nátěry s obsahem titanu, který může snížit náchylnost materiálu k vodíkové křehkosti, například u bórových ocelí lisovaných za tepla titan tvoří karbidy a zvyšuje tak odolnost materiálu. Další možností je vrstva redukováného oxidu grafenu, poskytující difúzní bariéru. Pro ochranu pokovením se využívá kadmiování a niklování nebo pokovení již zmíněným titanem. Vodíkové křehkosti lze předcházet i vhodným návrhem zařízení tak, aby nedocházelo k usazování vodíku v náchylných místech.[31][45]

Vodíková křehkost je závislá na více faktorech, mezi které patří materiálové vlastnosti, čistota vodíku, prostředí a mechanické namáhání materiálu. Proto je vhodné při konstrukci každého zařízení uvažovat nad všemi možnými vlivy. V případě využití nečištěného vodíku ve spalovacích motorech, je nutné zajistit kontrolu složení směsi tak, aby neobsahovala vyšší množství polutantů, napomáhajících degradaci materiálů.

## 4 NÁKLADY NA VÝROBU A SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Cenu vyrobeného vodíku ovlivňuje několik aspektů. Velmi záleží na požadované čistotě vodíku. Pro vysokou čistotu je potřeba pokročilých technologií, které zvyšují cenu. Používanou technologií pro čištění je například tlaková adsorpce (PSA), membránová separace nebo kryogenní destilace. V případě poptávky větších objemů, dojde ke snížení jednotkové ceny. Momentálně však není o vodíková paliva takový zájem, aby byly ovlivněny výrobní náklady. Dalším faktorem je kvalita vstupního plynu. Pokud je vstupní plyn více znečištěný, zvyšují se náklady na čištění. Výše uvedené metody výroby jsou různě energeticky náročné. Právě cena potřebných energií na výrobu zvyšuje náklady. Proto metody, které produkují i znečištěný vodík jako vedlejší produkt, jsou velmi výhodné a mohou tak značně snížit cenu vyrobeného vodíku. Svůj podíl na výsledné ceně má i stáří výrobních zařízení. Je pravděpodobné, že se s modernějšími technologiemi zvyšuje efektivita. I za předpokladu vyšších vstupních nákladů, se díky zrychlené návratnosti může výsledná cena paliva snížit. V neposlední řadě cenu ovlivňují stále vyvíjející se normy a regulace, upravující požadavky na samotné palivo. Zjednodušené srovnání nákladů na výrobu vodíku obsahuje tabulka 4.

Tab. 4 Srovnání výrobních nákladů podle typu vodíku [48]

Typ vodíku	Způsob výroby	Výrobní náklady [USD/kg]
Zelený	Elektrolýza z OZE	2,3 ÷ 7,4
Modrý	SMR+CCS	1,0 ÷ 2,1
Šedý	SMR bez CCS	0,7 ÷ 1,3
Hnědý/Černý	Zplynování uhlí	1,2 ÷ 2,0
Růžový	Elektrolýza z jaderné energie	2,2 ÷ 5,6

Zelený vodík, vyráběný elektrolýzou s využitím obnovitelných zdrojů energie, je vyráběn nejšetrněji k životnímu prostředí, protože vedlejším produktem vyrobeného vodíku je pouze vodní pára. Jeho výrobní náklady významně ovlivňuje samotná cena technologie, která je náročná na čistotu vstupujících elektrolytů a cenu elektřiny. Nicméně zelený vodík má vysokou čistotu, která je požadována pro vozidla s palivovými články. Díky stálému pokroku technologií elektrolýzérů se momentálně náklady na výrobu snižují. Výrobní náklady se pohybují mezi 2,3 až 7,4 USD/kg v závislosti na cenách elektrické energie.[48]

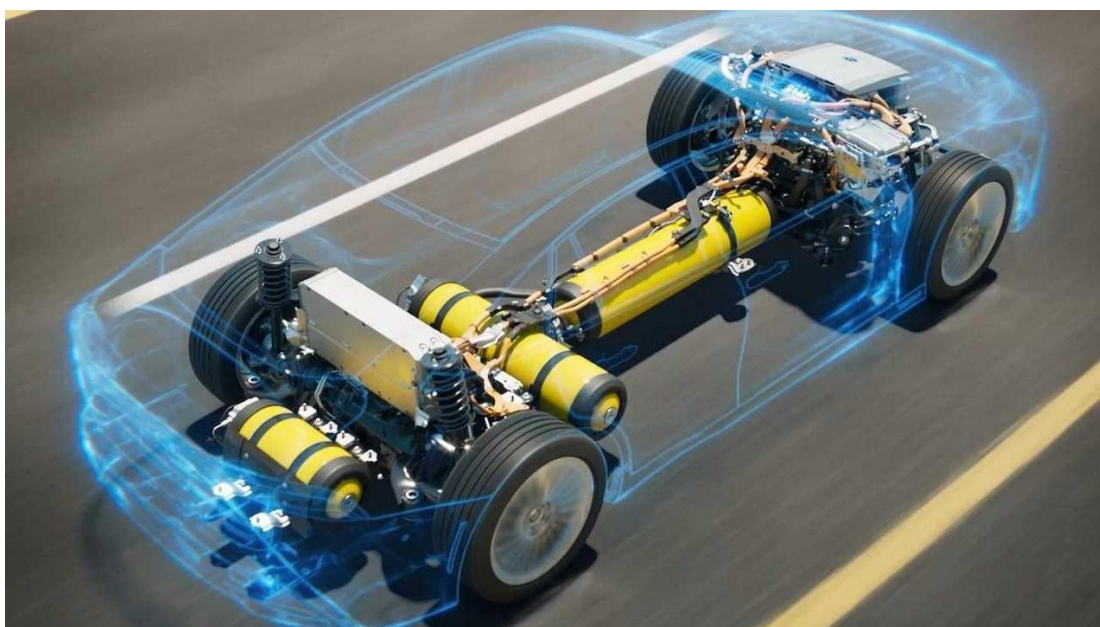
Modrý vodík, vyráběný z fosilních paliv, nejčastěji ze zemního plynu, prostřednictvím reformování metanu se zachycováním uhlíku, je levnější než zelený vodík, ale při jeho výrobě se vyskytují uhlíkové emise. Nižší náklady jsou způsobeny vspělostí metody reformingu a nízkou cenou zemního plynu. Výrobní náklady se pohybují mezi 1 až 2,1 USD/kg. Obdobně je vyráběn i šedý vodík, pouze nedochází k zachytávání uhlíku. Výrobní náklady šedého uhlíku jsou o něco nižší, a to 0,7 až 1,3 USD/kg.[48]

Hnědý a černý vodík, je vyráběn zplynováním uhlí – nejdříve se uhlí přemění na syngas a následně se zpracovává na vodík. Metoda je i přes nízké náklady málo rozšířená. To může být způsobeno velkou uhlíkovou stopou a složitějším výrobním procesem. Výrobní náklady jsou v rozmezí od 1,2 do 2 USD/kg.[48]

Růžový vodík, vyráběný vysokoteplotní elektrolýzou pomocí elektřiny z jaderných elektráren, je perspektivním nízkoemisním zdrojem. Jeho výrobní náklady jsou oproti zelenému vodíku velmi nízké, pohybují se mezi 2,2 až 5,6 USD/kg.[48]

Na výdejních stojanech se ceny pohybují o několik dolarů za kilogram více, podle marží prodejce. Možnost využití úplně nebo jen částečně čištěného vodíku může razantně snížit koncovou cenu paliva. Náklady na čištění vodíku, získávaného metodou krakování ropných plynů, se pohybují mezi 0,5 až 2 USD/kg, podle konkrétních požadavků na čistotu paliva.[49]

K uchování znečištěného vodíkového paliva v automobilech je nejvhodnější využívat vysokotlakých nádrží. Ty jsou dnes nejrozšířenější technologií, která využívá nákladných kompozitních materiálů. Krom samotné nádrže může systém prodražit nutná výrobní i montážní přesnost, složité armatury, senzory a ventily. Je pravděpodobné, že s rozvíjející se vodíkovou technologií, bude docházet k poklesu cen palivových systémů, podobně jako u samotného paliva. Příklad používaného palivového systému je na obrázku 20.



Obr. 20 Palivový systém Toyota Mirai [50]

## 5 NORMY, STANDARDY A REGULACE

Klíčovou částí jsou předpisy, normy a regulace. Ty jsou důležité z několika důvodů. Standardy a normy zajišťují konzistentní kvalitu vodíku. Normalizují používané technologie, aby výrobci automobilů a čerpacích zařízení, využívali stejných kompatibilních přípojek mezi vozidlem a čerpací stanicí. Dále zajišťují bezpečný provoz vodíkových zařízení, upřesňují manipulaci s vodíkem, aby se předcházelo únikům a možným nebezpečím. Dodržování standardů napomáhá k důvěryhodnosti vodíkových technologií mezi širokou veřejností. To může přinést snížování emisí vyprodukovaných osobními vozy.

Největšími organizacemi, které se zabývají vydáváním norem jsou ISO a SAE. Organizace zabývající se standardy jsou např. ANSI a ASME. Tyto organizace spolu spolupracují, aby byly normy globálně harmonizované a vzájemně se nevyvracely. V následujících tabulkách jsou vypsány kodifikace a názvy norem a standardů.

### 5.1 ČSN ISO

Jednou z největších a nejznámějších organizací je organizace ISO (International Organization for Standardization). Jedná se o nezávislou, nevládní mezinárodní organizaci, složenou ze členů z národních standardizačních orgánů 170 zemí. Cílem organizace je tvorba různých mezinárodních norem včetně vodíkových technologií. Organizací vydané normy mají celosvětovou působnost a často se přejímají jako normy národní, které platí na území státu. Na území České republiky platí, krom mezinárodních a evropských, normy ČSN.

V tabulce 5 je výběr norem souvisejících s vodíkovými technologiemi výroby, skladování a následným využitím.

Tab. 5 Normy týkající se kvality vodíku, převzaté organizací ČSN od organizace ISO

Označení normy	Název
ČSN ISO 14687	Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu
ČSN ISO 19880-8	Plynný vodík – Čerpací stanice – Část 8: Kontrola kvality paliva

Norma ČSN ISO 14687 určuje maximální povolené koncentrace kontaminantů v palivu. Tím rozděluje kvalitu vodíku do několika tříd podle použití. Norma ČSN ISO 19880-0 definuje povolené limity nečistot ve stlačeném vodíku pro palivové články, příkladem takových kontaminantů mohou být zbytky maziva nebo prachové částice.[52][53]

Tab. 6 Specifikace kvality paliva pro aplikace jiné než silniční vozidla poháněná PEM palivovými články a stacionární aplikace. Přeloženo a upraveno viz. [52]

TYP I - TŘÍDA A									
Index vodíkového paliva <sup>a</sup> (minimální molární zlomek, %)				98,00	Para-vodík (minimální molární zlomek, %)				NS
Složky	Celkové plyny	Voda (H <sub>2</sub> O) (molární zlomek, %)	Celkové uhlovodíky	Kyslík (O <sub>2</sub> )	Argon (Ar)	Dusík (N <sub>2</sub> )	Oxid uhelnatý (CO)	Síra (S)	Permanentní částice
Maximální obsah:	20000 μmol/mol	Nekondenzuje za všech okolních podmínek <sup>b</sup>	100 μmol/mol	b	b	b	1 μmol/mol	2 μmol/mol	g
Klíč: NS: Nespecifikování a Index vodíkového paliva se stanoví odečtením "celkového množství nevodíkových plynů" vyjádřených v molárních procentech, od 100 molárních procent. b Kombinovaná voda, kyslík, dusík a argon: maximální molární zlomek 1,9 % (19000 μmol/mol). g Vodík nesmí obsahovat prach, písek, nečistoty, gumy, oleje nebo jiné látky v množství dostatečném k poškození čerpací stanice nebo vozidla (motoru), který je poháněn palivem									

Norma ČSN ISO 14687 klasifikuje plynná vodíková paliva do třídy A („plynný vodík; spalovací motory pro dopravu; domácí/komerční spalovací zařízení (např. kotle, sporáky a podobné aplikace)“ [52]) typu 1 (plynné palivo). Pro tuto specifikaci jsou vypsána povolená množství plynných kontaminantů v přeložené a upravené tabulce 6 vycházející z normy ČSN ISO 14687.

## 5.2 SAE INTERNATIONAL

SAE International (Society of Automotive Engineers) je mezinárodní organizace, zaměřující se na stanovování technických standardů pro automobilový, letecký a komerční dopravní průmysl. Standardizují normy pro bezpečnost, kvalitu paliv, materiálů, testovacích metod a jiných aspektů. Mimo standardizace se podílí na výzkumu, inovacích, vzdělávání a certifikaci pracovníků.

V tabulce 7 je výběr z norem vydaných organizací SAE souvisejících s vodíkovými technologiemi využívanými v automobilovém průmyslu.

Tab. 7 Normy vydané organizací SAE, přeloženo

Označení normy	Název
SAE J2719:2020	Kvalita vodíkového paliva pro vozidla s palivovými články
SAE J2579:2023	Norma pro palivové systémy vozidel s palivovými články a jiných vodíkových vozidel

Norma SAE J2719:2020 upravuje požadavky na čistotu vodíku pro vozidla s palivovými články. Norma SAE J2579:2023 zahrnuje bezpečnostní normy pro vodíkové palivové systémy v automobilech.[54][55]

### 5.3 ANSI

ANSI (American National Standards Institute) je americká organizace, koordinující standardizaci v USA. Spolupracuje s organizacemi jako ASME, SAE, ISO nebo NFPA. Vytváří průmyslové standardy v mnoha oblastech a je členem organizace ISO a IEC. Ve vodíkovém odvětví se ANSI zabývá spíše bezpečností konstrukce vodíkových zařízení a většina standardů vzniká ve spolupráci s jinými organizacemi (např. CSA).

V tabulce 8 jsou příklady standardů, týkajících se automobilního průmyslu.

*Tab. 8 Výběr ANSI standardů, přeloženo*

Označení normy	Název
CSA/ANSI HGV 3.1-2022	Součásti palivového systému pro vozidla poháněná stlačeným vodíkem
CSA/ANSI HGV 2-2023	Zásobníky na stlačený vodíkový plyn pro vozidla

## 6 KVALITA VODÍKU A VLIV NA VÝKON A ŽIVOTNOST MOTORU

Vodík je dnes nejčastěji vyráběn metodou parního reformingu zemního plynu, která je ekonomicky nejvýhodnější, avšak výsledný vodík obsahuje různé polutanty, jako jsou oxid uhelnatý, oxid uhličitý, metan nebo dusík. Většina vodíku využívaného jako palivo je určena pro PEM palivové články, které jsou extrémně citlivé na nečistoty, a proto je nutné vodík nákladně dočišťovat na velmi vysokou čistotu (obvykle 99,999 % H<sub>2</sub>). Pro vodíkové spalovací motory však takto vysoká čistota není nezbytná, protože motor dokáže spalovat i méně čistý vodík, což může výrazně snížit náklady na úpravu paliva. Využití vodíku ve spalovacích motorech je perspektivní alternativou běžných fosilních paliv, zejména díky možnosti výrazně snížit nebo zcela odstranit produkci uhlíkových emisí a dosáhnout vysoké účinnosti přeměny energie. Na druhé straně však použití vodíku jako paliva vyžaduje řešení specifických technických problémů, které mají přímý vliv na celkovou funkčnost a výkonnost motoru. Charakteristiky spalování vodíku, včetně jeho vysoké rychlosti hoření a širokého rozsahu hořlavosti, představují výzvu pro optimalizaci spalovacího procesu. Tyto vlastnosti mohou být pozitivně i negativně ovlivněny doprovázejícími kontaminanty v palivu.

### 6.1 KLÍČOVÉ VLASTNOSTI VODÍKU

Vodík má několik klíčových vlastností, které ovlivňují jeho využití ve spalovacích motorech. Široký rozsah hořlavosti umožňuje efektivní spalování i ve velmi chudých směsích, což zlepšuje účinnost motoru. Nízká iniciační energie způsobuje snadné zapalování, ale zároveň může vést k nežádoucímu předčasnému zážehu. Krátká zhášecí vzdálenost znamená, že vodíkové plameny je obtížnější uhasit než u benzínu, což může komplikovat řízení spalovacího procesu. Vysoká teplota samovznícení ovlivňuje volbu kompresního poměru motoru. Vysoká rychlost hoření umožňuje rychlý průběh spalování a zlepšuje termodynamickou účinnost motoru. Vodík má také rychlou difuzi, což napomáhá tvorbě homogenní směsi se vzduchem, ale při úniku se plyn rychle rozptýluje. Naopak nízká hustota komplikuje skladování, protože pro dostatečný dojezd vozidla je nutné využít vysokotlaké nebo kryogenní nádrže. Nízká energetická hustota směsi vodíku se vzduchem pak vede k nižšímu měrnému výkonu motoru.[56]

Dalším parametrem je obsah nečistot, mezi které patří: voda, uhlovodíky, kyslík, argon, dusík, oxid uhelnatý, síra nebo prachové částice. Nečistoty mohou ovlivnit spalovací proces nebo poškodovat díly motoru. V případě využití vodíku v kombinaci s jiným palivem záleží na poměru složek.

### 6.2 VLIV NEČISTOT NA SPALOVACÍ PROCES

Vodíková paliva obsahují různé znečišťující příměsi. Jejich množství je upravováno standardy a požadavky dané technologií využití. Palivové články jsou velmi náchylné na čistotu vodíku, oproti tomu spalovací motory tak náročné nejsou.

Ve směsích se mohou vyskytovat hořlavé i nehořlavé příměsi, které mají různý vliv na spalovací proces. Mezi nehořlavé příměsi patří CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O v podobě vodní páry nebo N<sub>2</sub>. Takové kontaminanty snižují rychlost a teplotu hoření plamene, čímž mohou snižovat tvorbu emisí v podobě oxidů dusíku nebo zmírnit riziko backfiringu a detonačního hoření. Naopak při velkém obsahu kontaminantů může dojít k vynechávání zapálení směsi. Hořlavé kontaminanty v podobě CO, zbylého metanu či jiných uhlovodíků, mohou zhoršovat účinnost spalování. Metan obsažený ve vodíku snižuje rychlost hoření. Oxid uhelnatý při hoření

oxiduje s kyslíkem a vzniká oxid uhličitý. Vodík s obsaženým oxidem uhelnatým hoří pomaleji, což má za následek snížení teploty výfukových plynů.[58][59]

### 6.2.1 VODÍK

Vodík díky svému širokému rozsahu hořlavosti a vysoké rychlosti plamene umožňuje účinné spalování. Samostatné spalování čistého vodíku je prakticky bezemisní, protože při spalování vodíku vzniká jen voda a teplo. Pouze při vysokých teplotách mohou vznikat emise NO<sub>x</sub>. Právě vysoké teploty při spalování čistého vodíku mohou přinést jisté výzvy. Mezi ty se řadí nestabilita hoření způsobená vysokou rychlostí plamene, unikání vodíku ze spalovacího prostoru nebo tepelné namáhání částí motoru. Rozžhavená místa mohou předčasně zažehávat směs vodíku. Tyto nežádoucí jevy lze omezit, s určitým kompromisem na výkon, pomocí polutantů.[59][60]

### 6.2.2 VODA

Voda, vodní kondenzát nebo vodní pára působí v palivu jako inertní složka. To má za následek snížení teploty a rychlosti hoření. Díky tomu může dojít ke snížení tvorby emisí NO<sub>x</sub>, které vznikají při vysokých teplotách. Studie na upraveném jednoválcovém motoru o objemu 400 ccm, spalujícím vodíkové palivo, prokázala až 79 % snížení emisí NO<sub>x</sub> při vstřikování vody při dávkování 5 kg/h. Další výhody může přinést řízená příměs vodní mlhy do spalovací komory, podobně jako tomu je u vstřikování vody u klasických spalovacích motorů. Příměsí jemné vodní mlhy dojde ke snížení teploty a omezení klepání motoru, v tomto případě je množství a rozptyl vody řízen podle potřeby. Při správném množství může voda zvýšit výkon motoru – odpařená voda zvyšuje objem plynů ve válci, čímž se zvýší tlak a tím i účinnost expanze. U vodíkového motoru s řízeným vstřikováním vody dosáhl motor při vysokém zatížení maximální indikované tepelné účinnosti 42,5 %. Avšak nekontrolovaný obsah vody (příměs v palivu) může způsobit nestabilní hoření paliva a případné vynechávání zapalování. Zkondenzovaná voda může dále způsobovat korozi kovových částí motoru nebo výfukového systému. Obsah vody v palivu se odvíjí od kvality samotného paliva, závisí na kvalitě výroby a skladování. Při vyšších koncentracích je vhodné obsah regulovat vysušením paliva, aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění výkonu a stability.[65][66][67]

### 6.2.3 UHLOVODÍKY

Uhlovodíky obsažené v palivu mohou vést k neúplnému spalování. Uhlovodíky jako je metan nebo ethanol mají nižší reaktivitu než vodík, tedy snižují rychlost hoření. To má za následek snížení rizika předzápalu, ale s tím i výkonu a účinnosti. Chudá směs a snížení teploty hoření vyústí v nedokonalé spalování samotných uhlovodíků, které poté přispívají k emisím skleníkových plynů. Optimalizací načasování vstřikování a zvýšením teploty je možné tyto účinky zmírnit, zlepšit tepelnou účinnost a snížit emise. Nespálené uhlovodíky následně tvoří karbonové usazeniny ve ventilech a pístních kroužcích, to vede k rychlejšímu mechanickému opotřebování motoru. Příkladem takového opotřebení může být snížená těsnost válce. Proto je maximální povolený obsah celkových uhlovodíků podle normy ČSN ISO 14687 100 μmol/mol.[52][68][69]

### 6.2.4 KYSLÍK

Kyslík se v samotné směsi může vyskytnout například po nedokonalé separaci při elektrolýze. Směs vodíku s kyslíkem je sama o sobě velmi výbušná, proto vyšší koncentrace kyslíku tvoří zvýšené riziko předčasného zapálení směsi ještě před správným zážehem, to se projevuje klepáním motoru. Vyšší koncentrace kyslíku zvyšuje oxidační potenciál směsi, což může zlepšit

rychlost a úplnost spalování, čímž dojde ke zvýšení výkonu a účinnosti. Nadměrný obsah kyslíku zvyšuje teplotu hoření, to napomáhá ke snižování emisí, CO, CO<sub>2</sub> a nespálených uhlovodíků, nicméně i k tvorbě nežádoucích emisí NO<sub>x</sub> a tepelnému namáhání součástí motoru. Například při přistřikování směsi vodíku s kyslíkem v kombinaci s naftou, do vznětového motoru byl při nízkém a středním zatížení zlepšen výkon a sníženy emise CO a CO<sub>2</sub>. V případě využívání primární palivové směsi chudé na palivo, je potřeba chladit blok motoru, aby nedošlo k tepelnému poškození. Povolené množství se pohybuje v jednotkách ppm, podle normy ČSN ISO 14687 maximálně 1,9 molárních procent.[52][59][70]

### 6.2.5 ARGON

Argon je inertní plyn, který se přímo nepodílí na spalování, nicméně může ovlivnit výkon motoru. Argon ředí směs paliva a jako nehořlavý plyn snižuje teplotu a množství uvolněné energie, čímž dochází ke snížení výkonu motoru. Snížená teplota a rychlost plamene snižuje riziko backfiringu, tvorbu emisí NO<sub>x</sub> a zmírňuje tepelné namáhání součástí motoru. Vyšší koncentrace může ovlivnit stabilitu spalování, to může mít nepřímý vliv na mechanické opotřebení způsobené rázy.[72]

### 6.2.6 DUSÍK

Dusík, jako hlavní složka vzduchu, ovlivňuje vlastnosti spalování podobně jako argon. Nicméně vysoký obsah dusíku může vést k větší tvorbě NO<sub>x</sub>, které musí splňovat emisní normy. Vhodnou metodou redukce emisí je recyklace spalin, tedy využití EGR ventilu s případným přístřikem vody. Další možností snížení emisí je použití SCR (selektivní katalytická redukce). V případě spalování s vysokými koeficienty přebytečného vzduchu může dojít ke snížení emisí NO<sub>x</sub> bez snížení výkonu.[67][70][73]

### 6.2.7 OXID UHELNATÝ

Oxid uhelnatý je běžnou nečistotou ve vodíkovém palivu, které je získáváno z fosilních paliv. Obsažený oxid uhelnatý při hoření oxiduje na oxid uhličitý a snižuje teplotu a rychlost hoření. To stabilizuje spalování a snižuje riziko detonačního hoření. Nižší teplota má za následek menší tvorbu NO<sub>x</sub>, ale i snížení výkonu. To je možné kompenzovat přeplňováním. Ve vyšších koncentracích podporuje tvorbu karbonových usazenin, které mohou ucpávat vstříky nebo mechanicky opotřebovávat součásti motoru. V kombinaci s vlhkostí může přispívat ke korozi. Normou povolený maximální obsah CO je 1 μmol/mol.[52][67][70]

### 6.2.8 OXID UHLIČITÝ

Oxid uhličitý je nejčastěji zastoupený polutant ve vodíkovém palivu. CO<sub>2</sub> výrazně snižuje teplotu a rychlost hoření, čímž stabilizuje spalování. Při měření na Wanklově rotačním motoru, upraveném pro spalování vodíku, bylo zjištěno, že oxid uhličitý má pozitivní vliv na dynamické a ekonomické aspekty provozu motoru. Příměsí CO<sub>2</sub> došlo ke snížení teploty hoření, čímž se snížila produkce emisí NO<sub>x</sub>. S rostoucím obsahem CO<sub>2</sub> dochází ke snížení špičkového tlaku ve válci, to vede k nižšímu namáhání a hluku motoru. Při zvýšené koncentraci CO a CO<sub>2</sub> dochází ke zvýšené tvorbě uhlíkových emisí, které je třeba následně řešit. Pro snižování emisí dusíku nebo oxidu uhelnatého a uhličitého se využívá recirkulace spalin pomocí EGR ventilu nebo selektivních katalyzátorů. [63][64]

### 6.2.9 SÍRA

Obsažená síra v podobě sirovodíku nebo jiných sloučenin může i v malém množství ovlivnit spalovací proces a emise. Hořlavý sirovodík je spalován za vzniku vody a oxidu siřičitého, který zvyšuje hodnoty emisí SO<sub>x</sub>. Oxid siřičitý a pevné částice sirovodíku působí korozivně nebo mohou poškodit katalyzátor. V případě spalování sloučenin síry může dojít ke koroznímu poškození částí motoru. Vzniklé oxidy síry může s vlhkostí reagovat na kyselinu sírovou. K tvorbě dochází při vysokých teplotách a větších koncentracích síry ve směsi. Kyselina sírová se může tvořit už ve válci, případně po kondenzaci kyselých složek v chladnějších místech (např. výfukové potrubí). Z tohoto důvodu je třeba klást důraz na kontrolu obsahu sloučenin síry v palivu – maximální množství pro spalovací motory je 2 ppm. Nicméně při kontrolovaných koncentracích je možné pozorovat i pozitivní vliv. Při koncentracích do 3,8 % sirovodíku v palivové směsi dochází ke zkrácení době zážehu, čímž se urychluje reakce a zvyšuje tlak ve válci, s tím i výkon.[52][59][61]

### 6.2.10 PERMANENTNÍ ČÁSTICE

Vodíková paliva mohou být znečištěna prachem, rzí nebo aerosolem maziv z kompresorů či jiných zařízení. Takovéto částice se do vodíku mohou přimísit již při samotné výrobě, případně při skladování (tlakové skladování). Pevné částice přímo neovlivňují spalování, nicméně mohou způsobit mechanické opotřebení komponent motoru. Výše zmíněné předčasné zapálení směsi může být iniciováno horkými místy. Mezi ty se mohou řadit i horké mikročástice. Ty se zároveň mohou usazovat na stěnách spalovacího prostoru nebo ve výfukovém potrubí. Takto usazené a rozžhavené mikročástice mohou iniciovat detonaci směsi, backfiring nebo způsobovat mechanické poškození, případně napomáhat korozi a následně vodíkové křehkosti.[74]

Pro výše uvedené kontaminanty nejsou známy přesné studie, zabývající se koncentracemi jednotlivých prvků ve vodíkovém palivu v kontextu vlivu na výkonnost nebo životnost motoru. Nicméně obecně lze konstatovat následující.

### 6.2.11 INERTNÍ PRVKY

Mezi inertní prvky patří voda, argon, dusík a oxid uhličitý. Tyto nečistoty přímo neovlivňují hoření směsi, nicméně jejich přítomnost se může projevit snížením teploty hoření a stabilizací spalování, to má kladný vliv na tvorbu emisí NO<sub>x</sub>, snížení tepelného i mechanického opotřebování motoru a v neposlední řadě minimalizaci nežádoucích jevů – backfiringu, klepání a samovolného vznícení vodíku. Na druhou stranu, nižší teplota spalování má negativní vliv na výkon motoru a tvorbu emisí v podobě oxidu uhličitého a nespálených uhlovodíků. Spalování čistého vodíku je prakticky bezemisní. V době snahy snižování uhlíkové stopy je využití vodíkového paliva skvělou alternativou běžných fosilních paliv. Zvýšená emisivita spalování znečištěného vodíku může být nežádoucím faktorem, který by mohl snižovat ekologické výhody vodíkového paliva a vyžadovat další opatření k minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí.

### 6.2.12 REAKTIVNÍ PRVKY

Mezi reaktivní prvky se řadí samotný vodík, kyslík, oxid uhelnatý a síra. Tyto nečistoty ovlivňují hoření směsi, protože hoří také. Svou přítomností přispívají oxidační reaktivnosti paliva, čímž zvyšují rychlost hoření a energetickou hustotu směsi. Tím zvyšují výkonnost a zdokonalují spalování. Vyšší teploty mohou vést k zvýšenému tepelnému opotřebení, tvorbě karbonových usazenin a emisí oxidů dusíku, které je nutné dále řešit. Nerovnoměrné hoření

směsi může ovlivňovat stabilitu spalování. Rozpálená místa motoru mohou způsobovat předčasné zažehávání směsi, čímž zvýší riziko klepání.

Skladba palivové směsi je tedy jistý kompromis mezi výkonem, emisemi a případnou spolehlivostí motoru, kdy u vozidel určených pro běžné denní ježdění bude kladen důraz na spolehlivost a nízkou emisivitu vozidla. Naopak závodní vozy budou klást vyšší důraz na výkonnost palivové směsi s nižšími požadavky na životnost motoru nebo emise. Příkladem závodního vozu s vodíkovým pohonem je Toyota GR Yaris H<sub>2</sub> (Obr. 21). V případě těžké techniky je důležitý výkon a spolehlivost stroje.



Obr. 21 Toyota GR Yaris H<sub>2</sub> [78]

## 7 OPTIMALIZACE KONSTRUKCE MOTORU SPALUJÍCÍ ZNEČIŠTĚNÝ VODÍK

Vozidla poháněná vodíkovými spalovacími motory jsou slibnou cestou k dekarbonizaci dopravy. Velkou výhodou je možnost využití běžných spalovacích motorů, jen s drobnými úpravami. Na rozdíl od palivových článků, které vyžadují vysoce čistý vodík, spalovací motory dokážou využít i vodík obsahující určité množství polutantů, což může významně snížit náklady na jeho výrobu a čištění.

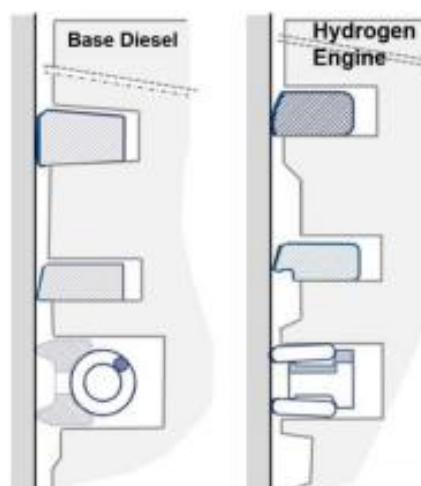
Aby bylo možné plně využít potenciál spalování méně čistého vodíku, je nutné upravit konstrukci motoru tak, aby byl schopen pracovat s variabilní kvalitou paliva bez negativního dopadu na výkon, životnost nebo emise.

### 7.1 ÚČINKY VODÍKU NA SOUČÁSTI MOTORU A MOTOROVÝ OLEJ

Mezi klíčové vlastnosti vodíku patří jeho vysoká difuzivita, nízká hustota, široký rozsah hořlavosti a v neposlední řadě křehnutí materiálu, které způsobuje. Z provedeného výzkumu vyplývá, že vodíkové motory mají sklon vytvářet nadměrné množství vody, která proniká do olejové vany. Pokud motor nemá možnost dosáhnout pravidelně plné provozní teploty, tato voda se neodpařuje z olejové směsi, což negativně ovlivňuje schopnost oleje dostatečně mazat součásti motoru. Obsažená voda se může mísit s olejem a tvořit tak nestabilní emulzi bílé barvy. Dále může docházet ke korozi olejové vany nebo při teplotách pod bodem mrazu může docházet k zamrznutí, což brání správnému mazání při startování motoru.[79][80]

#### 7.1.1 HLAVA VÁLCE A PÍST

Spalování vodíku vytváří vysoké tlaky a teploty ve válci, to vyžaduje robustní konstrukci pístu, ojníc a hlavy válce. V takovýchto podmínkách je vhodné využívat hliníkových pístů s upravenými kroužky, které dokážou odolávat náročným podmínkám, čímž zamezují únikům paliva mimo spalovací komoru. (obr. 22) Pro zvýšení odolnosti materiálu je možné využívat povlaků. V případě ochrany materiálu před vodíkovou křehkostí lze vytvořit keramickým nebo kovovým (např. niklovým) povlakem bariéru, zamezující difuzi vodíku. Hydrofobní povlaky snižují pravděpodobnost koroze. Vyšší teploty je možné redukovat již výše zmíněnými inertními kontaminanty, nicméně při vyšších teplotách je vhodné dodatečně chladit blok motoru.[81][82]



Obr. 22 Porovnání písních kroužků diesellový a vodíkový motor [81]

### 7.1.2 VENTILY A SYSTÉM VSTŘIKOVÁNÍ

Vysokým teplotám jsou vystavovány i ventily a sedla ventilů. Horké výfukové plyny obsahují vodní páru, nespálený vodík a v případě znečištěné palivové směsi i jiné prvky tvořící emise. Tepelné namáhání a vystavení vodní páře může vést ke korozi komponent, proto jsou preferovány materiály s vysokou tepelnou odolností. Mezi ty lze zařadit slitiny na bázi niklu nebo nerezovou ocel, která zvládá odolávat nepříznivým projevům vodíku. Vstřikovací systém musí být navržen tak, aby zvládl vysoký tlak, a v případě nepřímého vstřikování, průtok vodíku.[82] [83]

### 7.1.3 VÝFUKOVÝ SYSTÉM

Výfukový systém je obecně zatěžován vysokoteplotními výfukovými plyny. Ty obsahují vodní páru, oxidy dusíku a případně malé množství uhlíkových emisí. Pro takové aplikace jsou vhodné materiály jako je nerezová ocel nebo případně slitiny odolné vůči vysokým teplotám, korozi a vodíkové křehkosti. S výfukovým potrubím se pojí i tlumiče hluku a katalyzátory. Nespálené uhlovodíky a oxidy dusíku mohou ucpávat výfukový ventil, čímž dochází k jeho netěsnosti. Pro snížení emisí NO<sub>x</sub> je možné recyklovat spaliny pomocí EGR ventilu. Zbylé NO<sub>x</sub> a malé množství CO a CO<sub>2</sub> je třeba řešit vhodnými oxidačními nebo selektivními katalyzátory (SCR).[82] [84]

## 7.2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY A JEJICH ÚPRAVY

Při konstrukci vodíkového spalovacího motoru je správná volba materiálů zásadní. Použité materiály musí odolat vysokým teplotám, tlakům, korozi a vodíkové křehkosti.

Mezi vhodné materiály se díky svým vlastnostem řadí nerezové oceli nebo hliník. Hliník je běžně využívaný v motorech. Je lehký, dobře vede teplo a nekoroduje. Proto se hodí pro výrobu pístů nebo bloků motoru. Nerezové oceli se díky své odolnosti proti korozi využívají pro palivové a výfukové systémy. Mezi vhodné materiály se řadí i slitiny na bázi niklu nebo titanu, které poskytují odolnost proti vodíkové křehkosti a vysokoteplotní korozi. Pro zvýšení odolnosti namáhaných komponent vůči vodíku a opotřebením jsou využívány speciální povlaky a povrchové úpravy. Mezi ty se řadí běžně využívaná nitridace a chromování povrchu. [81][82][83]

## 7.3 OPTIMALIZACE KONSTRUKCE MOTORU

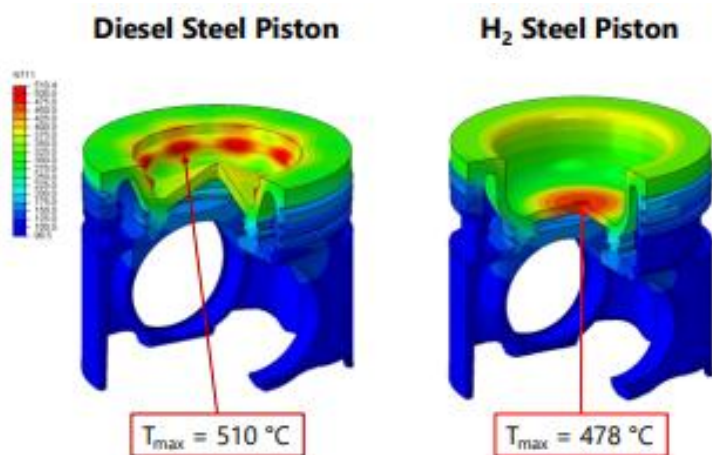
Aby bylo možné přizpůsobit tradiční spalovací motor pro provoz na vodík, je nezbytné provést řadu technických úprav. Mezi klíčové zásahy patří změny ve spalovacím prostoru, systému turbodmychadla, technologii vstřikování paliva i zapalovacím zařízení.

Písty lze rozdělit na ploché a miskové. (Obr 23) Ploché písty podporují vířivé proudění v komoře, čímž zlepšují homogenitu směsi vodíku a vzduchu. Výsledkem je rovnoměrnější spalování, nižší tlakové špičky, snížené emise NO<sub>x</sub> a menší náchylnost ke klepání. Při chudých směsích je navíc dosaženo vyšší spalovací stability. Spalování probíhá v hlavě válce, obdobně jako u klasických zážehových motorů. V průběhu spalování dosahují teploty v komoře 2044 °C. Písty jsou chlazeny zespodu pomocí ostříku motorovým olejem, což pomáhá odvádět teplo vznikající během spalovacího cyklu.[75][76]



Obr. 24 Plochý píst (vlevo), miskový píst (vpravo) [76]

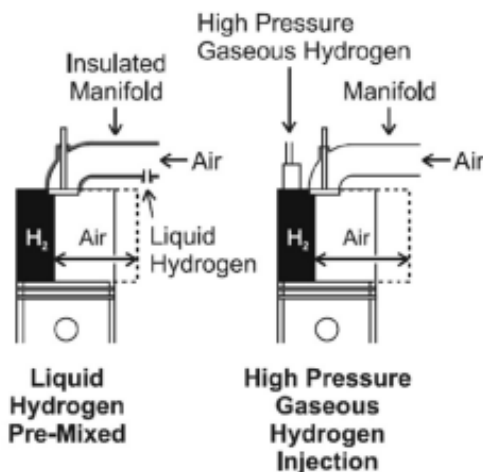
Naopak u miskových pístů, používaných ve vodíkových motorech, jsou menší rozdíly v konstrukci. Takové písty jsou navrženy pro omezení víření, díky čemuž dochází k intenzivnějšímu a rychlejšímu spalování. To může při správném časování zvýšit účinnost. Oproti čistě dieselové variantě je v případě přístřikování vodíku k naftě, kvůli nižšímu kompresnímu poměru u pístu, zvětšena spalovací miska. (Obr. 24) Materiály využívané pro výrobu pístů jsou nejčastěji hliník nebo ocel. Oba materiály mají výhody i nevýhody a záleží na vhodnosti použití. Hliníkové písty jsou lehčí, lépe odvádějí teplo, snižují riziko předzápalu a vyžadují méně intenzivní chlazení. Jejich nevýhodou je nižší tepelná odolnost a větší požadovaná vůle v horní úvrati kvůli tepelnému roztažení. Ocelové písty mají vyšší hmotnost, ale vydrží vyšší teplotní zatížení a jejich tuhost umožňuje zmenšit vůli v horní úvrati. Vyšší teploty však vyžadují účinnější chlazení. Pokud není chlazení dostatečné, zvyšuje se riziko předzápalu. Vysoká teplota samovznícení vodíku umožňuje zvýšení kompresního poměru motoru, to vede ke zvýšení účinnosti. Optimalizováním chlazení hlavy motoru lze snížit riziko předzápalu nebo přehřívání. Důležitými komponenty motoru jsou sací a výfukové ventily, které jsou v kontaktu se samotnou palivovou směsí, ale i se zplodinami. Proto je důležité jejich chlazení, například pomocí sodíku. Vodíkové palivo je, oproti benzínu nebo naftě, chudé na maziva (v případě čistého vodíku), to zvyšuje opotřebení pohyblivých komponent, které jsou u běžných spalovacích motorů mazány palivem. Kvůli únikům skrz pístní kroužky dál, je nutné upravit i klikovou skříň. Je třeba zajistit dostatečné odvětrávání a opatřit ji přetlakovým ventilem, aby bylo minimalizováno riziko vznícení zbytkového vodíku.[74][85]



Obr. 23 Porovnání geometrie kovových pístů dieselového a vodíkového motoru [74]

## 7.4 OPTIMALIZACE VSTŘIKOVÁNÍ A ZAPALOVÁNÍ

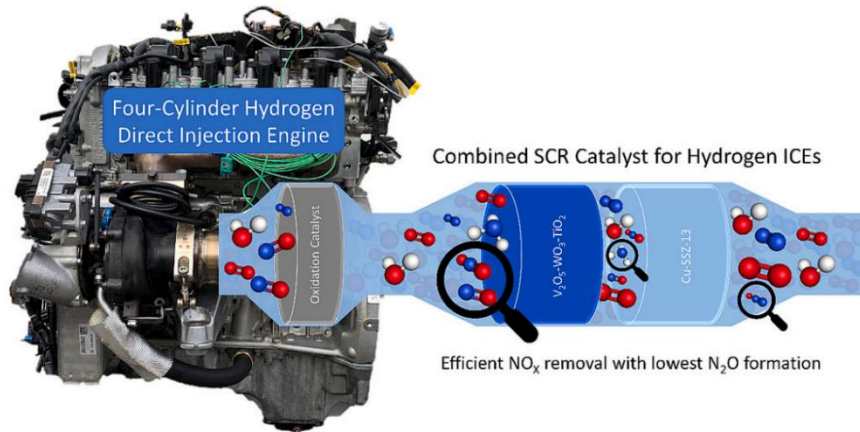
Vhodné vstřikovací systémy jsou přímé a nepřímé vstřikování. (Obr. 25) Obě varianty mají své výhody i nevýhody. Přímé vstřikování umožňuje přesné řízení množství paliva, vyšší výkon, minimalizaci rizika předčasného vznícení a backfiringu. Nevýhodou je komplikovanější provedení oproti portovému vstřikování. To je sice jednodušší, ale naopak zvyšuje riziko zpětného zášlehu, které je způsobené umístěním vstřiku. U přímého vstřikování je vstřík umístěn přímo do spalovacího prostoru, ke vstřiku paliva může tedy docházet až po uzavření sacího ventilu, čímž se značně snižuje riziko backfiringu. U portového vstřikování se palivo se vzduchem směšuje již v sacím potrubí, v případě špatného načasování může dojít ke zpětnému zášlehu. Proto je důležité správné načasování otevírání a zavírání ventilů. V obou případech je hmotnostní směšovací poměr 34:1 (vzduch:H<sub>2</sub>). Pro zapalování směsi jsou využívány svíčky studeného typu (cold plug), které díky nižší zapalovací teplotě snižují riziko předzápalu a backfiringu. Komponenty vstřikovacích systémů musí být těsné, odolné vůči opotřebení a vodíkové difuzi. Výhodnou strategií je vícenásobné vstřikování během jednoho cyklu, které pomáhá regulovat průběh spalování a regulovat tvorbu emisí, při zachování stejné účinnosti motoru.[77][85][87]



Obr. 25 Rozdíl konstrukce přímého a nepřímého vstřikování paliva [77]

## 7.5 OPTIMALIZACE VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

Spalování čistého vodíku sice nevytváří žádné emise CO<sub>2</sub>, nicméně vysokou teplotou spalovacího procesu dochází k tvorbě emisí NO<sub>x</sub>. U znečištěného vodíkového paliva mohou být tvořeny uhlíkové emise, na druhou stranu kontaminanty snižují teplotu spalování, a tím snižují tvorbu NO<sub>x</sub>. Výfukové plyny je možné recirkulovat pomocí EGR ventilu zpět do sání, čímž dochází ke snížení spalovací teploty a tvorbě NO<sub>x</sub>. Požadované snížení teploty je doprovázeno i mírným snížením výkonu. Pokročilejší technologie, selektivní katalytické redukce (SCR), využívající AdBlue (směs močoviny a vody), umožňuje dodatečně upravovat spaliny přeměnou NO<sub>x</sub> na dusík a vodu. Schematické znázornění SCR katalyzátoru je vidět na obrázku 26. Využívá se speciálních katalyzátorů navržených pro vysokoteplotní prostředí. Výfukové ventily je nutné dodatečně chladit, protože jsou v kontaktu s horkými zplodinami. V případě přehřátí ventilů může dojít k předčasnému vznícení paliva. Výfukový systém by měl být navržen s ohledem na přísné emisní normy bez ztrát výkonu.[85]



Obr. 26 Systém zachytávání emisí pomocí technologie SCR [86]

## 7.6 MAZÁNÍ

Vodíkové palivo prakticky neobsahuje maziva, to zvyšuje mechanické opotřebávání součástí vstřikovacího systému. Kvůli malému obsahu maziva je nutný vhodný výběr materiálů sedel ventilů. Vodíkový motor má specifické nároky na motorový olej. Zvýšené nároky jsou způsobeny vyšším obsahem vodíku v klikové skříni, zvýšenou kondenzací vody, možnými hotspots a negativním dopadem blow-by plynů. Motorový olej musí zvládat zvýšenou vlhkost, aby nedocházelo k mísení vody s olejem. Takovou vlastnost má syntetický nebo deemulgující olej. Syntetický olej tvoří s vodou homogenní směs, zatímco deemulgující olej umožňuje separaci vody a oleje. Dále je doporučeno využití oleje bez obsahu popela, který snižuje tvorbu usazenin, a tím i riziko předzápalu. Na měřeném experimentálním jednoválcovém motoru bylo v klikové skříni naměřeno až 5 % objemového podílu vodíku v důsledku blow-by plynů, což je způsobeno nízkou hustotou vodíku a rychlým nárůstem tlaku při spalování. Tyto plyny degradují olej, a to vede ke snížení mazacích schopností. Proto je důležité klikovou skříň opatřit aktivní ventilací. Té lze docílit přívodem vzduchu o mírném přetlaku, odvětrávání je zajištěno vakuovou pumpou přes odlučovač oleje. Aktivní ventilací byla koncentrace vodíku v klikové skříni snížena pod 1 % objemového podílu.[87]

## 7.7 ADITIVA

Pro využití maximálního potenciálu vodíkových motorů je nezbytné vyvinout aditiva, která zvýší výkonnost paliva a maziv. Tato aditiva pomáhají snižovat předzápal, zabraňují korozi a zajišťují mazání za vysokého tlaku. Vlastní aditiva mohou také řešit problémy spojené s kontaminací vodou a oxidačním namáháním při vysokých teplotách spalování. Samotná aditiva mohou napomáhat snížení případných emisí.[79]

## 8 OPTIMALIZACE VÝROBY A SKLADOVÁNÍ VODÍKU

V době snižování emisí je vodík vhodnou alternativou běžných fosilních paliv. Nejvhodnější variantou bezemisního paliva je zelený vodík, který je však momentálně velmi drahý. Ke snížení ceny vodíkového paliva může pomoci i vhodná optimalizace výroby či distribuce. Optimalizace by měla splnit účel snížení ceny vodíku a následně emisí produkovaných samotnou výrobou.

### 8.1 ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY A SNÍŽENÍ CENY

Pro zvýšení efektivity produkce je možno využít několika strategií, zaměřených na technologický vývoj nebo integraci obnovitelných zdrojů energie. Využitím pokročilých materiálů v elektrolyzérch, je možné dosáhnou vysoké efektivity. Pro získání bezemisního vodíku je vhodné využívat obnovitelných zdrojů energie, a to nejlépe v kombinaci – například solární panely v kombinaci s větrnou turbínou. Tímto způsobem lze maximalizovat zisk energie. Pro stabilizaci možných výkyvů dodávek energie je možné využívat bateriových systémů. Pro potřeby optimalizace výroby se dnes stále více rozšiřuje využívání umělé inteligence. Právě využitím AI je možné optimalizovat produkci sledováním výkonosti a úpravou pracovních podmínek elektrolyzérů. Například sledováním přebytků elektrické energie v síti lze predikovat tyto výkyvy a využít tak přebytečnou elektrinu, čímž dojde ke snížení nákladů na provoz. Další možností zvýšení efektivity je kogenerace odpadního tepla nebo investicí do vývoje těchto metod – například na vývoj katalyzátorů nebo zlepšování výrobních procesů.[88]

V případě výroby vodíku z fosilních paliv je možné omezit čištění od kontaminantů. Výsledná čistota vyčištěného vodíku se pohybuje mezi 95 až 99,9 %. Právě omezení nároků na vodíková paliva určená pro spalování může přinést výrazné snížení ceny. V případě reformingu až 60 % z celkové ceny.[57][88]

Výroba tzv. biovodíku nabízí ke klasickým palivům ekologicky šetrnou a obnovitelnou alternativu. Biovodík se vyrábí z biomasy, například reformací bioplynu, fermentací nebo fotobiologickými procesy. To může výrazně přispět ke snižování emisí skleníkových plynů. Nejčastějším polutantem je oxid uhličitý a metan. Obecně je složení vyrobeného vodíku velmi podobné jako u vodíku vyrobeného z fosilních paliv. Cena vyrobeného kilogramu biovodíku se pohybuje mezi 1,96 až 18,7 \$/kg, v závislosti na metodě. Momentálně je výroba biovodíku neefektivní – v porovnání s parním reformingem zemního plynu je účinnost čtvrtinová. Nicméně technologie výroby biovodíku vyžaduje další vývoj, který může přinést ekologičtější a dlouhodobý potenciál, zejména při využití odpadů biomasy a decentralizace výroby.[89]

### 8.2 SNÍŽENÍ EMISÍ

Hlavním aspektem snižování emisí je přechod na výrobu pomocí OZE. Dnes je výroba zeleného vodíku velmi nákladná, nicméně s postupným vývojem této technologie se předpokládá snižování ceny vyrobeného vodíku. Odhaduje se, že do roku 2030 dojde k poklesu ceny zeleného vodíku na 2 \$/kg.[88][90]

U metod založených na fosilních palivech je třeba zachytávat emise využitím vhodných technologií. Například při výrobě šedého vodíku dochází k uvolnění až 9 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>. To lze v případě využití technologie zachytávání a skladování uhlíku (CCS) omezit na produkci pouhých 0,99 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>. Zachycený uhlík lze dále využívat v různých aplikacích.[88][90]

### 8.3 DISTRIBUCE

Optimalizace distribuce představuje klíčový prvek pro zvýšení hospodárnosti využití vodíku. Decentralizací výroby se výrazně sníží náklady na dopravu vodíku. Umístěním výroby blízko místa spotřeby, např. u čerpacích stanic, dochází k minimalizaci úniků nebo kontaminace vodíku. Veřejné vodíkové čerpací stanice jsou momentálně v ČR 3 – v Praze, Ostravě a Litvínově. Síť vodíkových stanic se do roku 2030 plánuje dále rozšiřovat.[90] Decentralizací se minimalizuje energetická náročnost zkapalňování, případně stlačování vodíku. V případě nutnosti přepravy jsou nejvhodnější kryogenní nádrže, které jsou schopny přepravit největší množství vodíku prakticky beze ztrát.

## ZÁVĚR

Vodík jako alternativní palivo nabízí v oblasti dopravy značný potenciál pro snížení emisí skleníkových plynů a omezení závislosti na fosilních palivech. Přestože čistý vodík při spalování produkuje převážně vodní páru a jen minimální množství škodlivin, dosažení a udržení vysoké čistoty vodíku je technologicky náročné a ekonomicky nákladné. Z tohoto důvodu je otázka využití znečištěného vodíku ve spalovacích motorech předmětem intenzivního zájmu.

V této práci byla analyzována problematika vlivu kvality vodíku na výkon a životnost spalovacích motorů. Bylo zjištěno, že znečištěný vodík s kontrolovaným množstvím polutantů může být pro spalovací motory vhodný, a dokonce v některých případech i přínosný.

Příměs oxidu uhličitého, argonu nebo dusíku může snížit teplotu hoření, a tím omezit nežádoucí jevy, jako je detonační hoření či zpětný zášleh plamene. Nižší teplota spalování také zpomaluje rychlost hoření, což přispívá ke stabilnějšímu chodu motoru a prodlužuje jeho životnost. Na druhé straně nečistoty ve vodíku mohou mít i negativní dopady. Kontaminace vodíku látkami jako je voda, kyslík, oxid uhelnatý, oxid siřičitý či permanentní částice může mít výrazně negativní dopad. Tyto polutanty mohou způsobovat korozi, zvyšovat emise škodlivých látek a urychlovat opotřebení klíčových komponent jako jsou písty, ventily či vstříkovací systémy. Proto je klíčové stanovit optimální koncentrace polutantů a přizpůsobit konstrukci motoru tak, aby byl schopen efektivně a spolehlivě pracovat se znečištěným vodíkem.

Z hlediska výroby a skladování vodíku bylo zjištěno, že nevyšší čistoty lze dosáhnout metodami jako je elektrolýza pomocí PEM technologií, avšak tento způsob je spojen s vyššími výrobními náklady. Oproti tomu reforming zemního plynu nebo zplyňování uhlí poskytují vodík s vyšším podílem polutantů, avšak za podstatně nižších nákladů. V případě využití znečištěného vodíku ve spalovacích motorech lze dosáhnout kompromisu mezi ekonomickou efektivitou a technickými požadavky na provoz motoru, pokud je konstrukce motoru vhodně optimalizována na spalování takového paliva.

Celkově lze konstatovat, že spalovací motory mohou za určitých podmínek využívat vodík s nižší čistotou bez zásadního snížení spolehlivosti či výkonu. Klíčovým faktorem je správné nastavení motoru, optimalizace vstříkovací a zapalovací strategie a volba vhodných materiálů odolných vůči vlivu nečistot. Vzhledem k omezenému množství dostupných studií a praktických experimentů v oblasti spalovacích motorů na vodík s obsahem polutantů je však nezbytné provést další výzkum, který by přesně stanovil limity přípustných koncentrací jednotlivých kontaminantů a jejich dlouhodobý vliv na životnost a výkon motoru. V budoucnu se očekává rozvoj technologií a konstrukčních řešení, které umožní efektivní spalování vodíku s nižší čistotou, což povede ke snížení nákladů a usnadní širší nasazení vodíkových pohonů v dopravě.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VOKÁČ, Luděk. První vodíkové auto je starší než všechna na benzin, je mu 205 let  
Zdroj: [https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/prvni-vodikove-auto-je-starsi-nez-vsechna-na-benzin-je-mu-205-let.A120221\\_011818\\_automoto\\_vok](https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/prvni-vodikove-auto-je-starsi-nez-vsechna-na-benzin-je-mu-205-let.A120221_011818_automoto_vok). IDnes.cz [online]. 2012, 22. února 2012 [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/prvni-vodikove-auto-je-starsi-nez-vsechna-na-benzin-je-mu-205-let.A120221\\_011818\\_automoto\\_vok](https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/prvni-vodikove-auto-je-starsi-nez-vsechna-na-benzin-je-mu-205-let.A120221_011818_automoto_vok)
- [2] KRÁLOVÁ, Magda. Čtyřdobý zážehový motor. Techmania Science Centre [online]. [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/plyny/tepelne-motory/ctyrdoby-zazehovy-motor>
- [3] MOHAMED IBRAHIM, M. a A. RAMESH. Investigations on the effects of intake temperature and charge dilution in a hydrogen fueled HCCI engine. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2014, 39(26), 14097-14108 [cit. 2025-02-02]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2014.07.019
- [4] CHITRAGAR, P.R., K.V. SHIVAPRASAD, Vighnesh NAYAK, P. BEDAR a G.N. KUMAR. An Experimental Study on Combustion and Emission Analysis of Four Cylinder 4-Stroke Gasoline Engine Using Pure Hydrogen and LPG at Idle Condition. *Energy Procedia* [online]. Elsevier, 2016, 90, 525-534 [cit. 2025-02-02]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2016.11.220
- [5] HYRESPONDER. Vodík: vlastnosti, bezpečnostní aspekty a reakce na incidenty [online]. Brusel: HyResponder, 2023 [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: [https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L2\\_HyResponder\\_Level4\\_CZ.pdf](https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L2_HyResponder_Level4_CZ.pdf)
- [6] YIP, Ho Lung, Aleš SRNA, Anthony Chun Yin YUEN, Sanghoon KOOK, Robert A. TAYLOR, Guan Heng YEOH, Paul R. MEDWELL a Qing Nian CHAN. A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied sciences* [online]. BASEL: Mdpi, 2019, 9(22), 4842 [cit. 2025-02-02]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9224842
- [7] STILL RUNNING STRONG. *Gasoline Direct Injection* [online]. [cit. 2025-03-07]. Dostupné z: <https://stillrunningstrong.com/car-technology/gasoline-direct-injection/>
- [8] Ve zkratce. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2024-10-25]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [9] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. Centrální výroba vodíku. *Chemické listy* [online]. 2017, **111**(2), 121-128 [cit. 2024-10-25]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: [https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN\\_cdi\\_scopus\\_primary\\_2\\_s2\\_0\\_85012023993](https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN_cdi_scopus_primary_2_s2_0_85012023993)
- [10] Tocháčková, A., Laciok, A. a Šilhan, M. Nákladová cena vodíku z elektrolýzy s využitím obnovitelných zdrojů energie. *Chemické listy*. [online] Praha: Česká společnost chemická, 2021. ISSN 0009-2770. [cit. 2024-10-25]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3956>

- [11] CHEN, Ying-Pin, Sajid BASHIR a Jingbo Louise LIU. *Nanostructured Materials for Next-Generation Energy Storage and Conversion: Hydrogen Production, Storage, and Utilization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2017, 363 s. ISBN 3662535122. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-53514-1
- [12] MELICHOVÁ, Zuzana, Iveta NAGYOVÁ a Ján REGULI. Elektrolýza v jednoduchom zariadení v školskom laboratóriu. *Chemické listy* [online]. 2009, **103**(5), 419-423 [cit. 2024-10-26]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/1540/1540>
- [13] DROBNÝ, Josef. Výroba vodíku elektrolýzou vody. *HydroRACE4SCHOOLS* [online]. 2019, 2019-11-19 [cit. 2024-10-26]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Výroba-vodíku-elektrolýzou-vody>
- [14] KUMAR, S. Shiva a Hankwon LIM. Recent advances in hydrogen production through proton exchange membrane water electrolysis - a review. *Sustainable energy & fuels* [online]. London: Royal Society of Chemistry, 2023, **7**(15), 356-3583 [cit. 2024-10-26]. ISSN 2398-4902. Dostupné z: doi:10.1039/d3se00336a
- [15] AHMAD KAMARODDIN, Mohd Fadhzir, Nordin SABLİ, Tuan Amran TUAN ABDULLAH, Shamsul Izhar SIAJAM, Luqman Chuah ABDULLAH, Aishah ABDUL JALİL a Arshad AHMAD. Membrane-based electrolysis for hydrogen production: A review. *Membranes (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2021, **11**(11), 810 [cit. 2024-10-26]. ISSN 2077-0375. Dostupné z: doi:10.3390/membranes11110810
- [16] LEE, Jason K.; LEE, Chunghyuk; FAHY, Kieran F.; ZHAO, Benzhong; LAMANNA, Jacob M. et al. Critical Current Density as a Performance Indicator for Gas-Evolving Electrochemical Devices. Online. *Cell reports physical science*. 2021, roč. 2, č. 5, s. 100440. ISSN 2666-3864. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100440>. [cit. 2024-10-26].
- [17] How Proton Exchange Membrane (PEM) Cells Power Hydrogen On Demand. *Hydrogen On Demand Technologies* [online]. 2023, 2023-08-11 [cit. 2024-10-26]. Dostupné z: <https://hodtec.com>
- [18] ŞAHİN, Mustafa Ergin. An Overview of Different Water Electrolyzer Types for Hydrogen Production. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2024, **17**(19), 4944 [cit. 2024-10-26]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en17194944
- [19] BANERJEE, Atindra Mohan, Rajini P. ANTONY, Mrinal R. PAI, Asheesh KUMAR a Arvind K. TRIPATHI. Investigations on a platinum catalyzed membrane for electrolysis step of copper-chlorine thermochemical cycle for hydrogen production. *International journal of energy research* [online]. Chichester, UK: John Wiley, 2021, **45**(4), 5912-5921 [cit. 2024-10-27]. ISSN 0363-907X. Dostupné z: doi:10.1002/er.6211
- [20] KOJ, Jan Christian, Christina WULF, Andrea SCHREIBER a Petra ZAPP. Site-Dependent Environmental Impacts of Industrial Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis. *Energies (Basel)* [online]. BASEL: Mdpi, 2017, **10**(7), 860 [cit. 2024-11-06]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en10070860

- [21] Výroba vodíku: Jak se vodík vyrábí a co to je? Atlas Copco [online]. [cit. 2025-02-04]. Dostupné z: <https://www.atlascopco.com/cs-cz/compressors/air-compressor-blog/what-is-hydrogen-and-how-is-it-produced>
- [22] UDDIN MONIR, Minhaj, Azrina ABD AZIZ, Mohammad TOFAYAL AHMED a Md. YEASIR HASAN, KHAN, Imran, ed. Chapter 11 - Hydrogen energy–Potential in developing countries. *Renewable Energy and Sustainability* [online]. 2022, 1.7.2022, 2022(11), 299-325 [cit. 2025-02-04]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88668-0.00013-9>
- [23] BACQUART, Thomas; ARRHENIUS, Karine; PERSIJN, Stefan; ROJO, Andrés; AUPRÊTRE, Fabien et al. Hydrogen fuel quality from two main production processes: Steam methane reforming and proton exchange membrane water electrolysis. Online. *Journal of power sources*. 2019, roč. 444, s. 227170. ISSN 0378-7753. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227170>. [cit. 2025-03-08].
- [24] DROBNÝ, Josef. Výroba vodíku z fosilních paliv. HydroRACE4schools [online]. 2019, 26.10.2019 [cit. 2025-02-04]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Výroba-vodíku-z-fosilních-paliv>
- [25] DOUCEK, Aleš, Daniel TENKRÁT a Petr DLOUHÝ. VODÍKOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ A MOŽNOSTI VYUŽITÍ VODÍKU K REGULACI OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE. Paliva [online]. 2010, 2011(3), 1-7 [cit. 2025-02-04]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiv956x-aqLAXUVxgIHHV1nHm0QFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fpaliva.vscht.cz%2Fdownload.php%3Fid%3D36&usg=AOvVaw3N7PGrkU7fnRAn7gTk6jzt&opi=89978449>
- [26] CHAI, Siqi, Guojie ZHANG, Guoqiang LI a Yongfa ZHANG. Industrial hydrogen production technology and development status in China: a review. *Clean technologies and environmental policy* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, 23(7), 1931-1946 [cit. 2025-02-04]. ISSN 1618-954X. Dostupné z: doi:10.1007/s10098-021-02089-w
- [27] WANG, Xun. Hydrogen Production by Coal Gasification Coupled with *in Situ* CO<sub>2</sub> Capture. *Energy and Power Engineering* [online]. 2012, 04(04), 210-217 [cit. 2025-03-25]. ISSN 1949-243X. Dostupné z: doi:10.4236/epe.2012.44029
- [28] Very High Temperature Reactor (VHTR). Generation IV International Forum [online]. 2023 [cit. 2025-02-05]. Dostupné z: <https://pp.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/very-high-temperature-reactor-vhtr>
- [29] CHART INDUSTRIES. Hydrogen Fueling Stations. *Chart Industries* [online]. © 2025 [cit. 2025-02-06]. Dostupné z: <https://www.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Fueling-Stations>

- [30] Vodík umožňuje propojení čisté energie s aplikacem. *TŮV SŮD CZECH* [online]. © 2025 [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/temata/vodik/zjistete-vice-o-hodnotovem-retezci-vodiku/skladovani-a-distribuce-vodiku>
- [31] BARTHELEMY, H. Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2011, roč. 36, č. 3, s. 2750-2758. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.029>. [cit. 2025-03-09].
- [32] ZHENG, Jinyang, Xianxin LIU, Ping XU, Pengfei LIU, Yongzhi ZHAO a Jian YANG. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2012, **37**(1), 1048-1057 [cit. 2025-02-21]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijhydene.2011.02.125](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.125)
- [33] Renewable H2 Projects Will Raise Pressure Vessel Demand. FIBA TECHNOLOGIES, INC. *FIBAtech* [online]. © 2001-2023 [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://www.fibatech.com/renewable-h2-projects-will-raise-pressure-vessel-demand/>
- [34] Physical Hydrogen Storage. *U.S. Department of Energy* [online]. [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [35] HLH2 VEHICLE TANKS: LIQUID HYDROGEN VEHICLE TANK SYSTEMS. In: *Chart Industries* [online]. © 2023 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Energy>
- [36] LH2 TRANSPORT TRAILER: ST-18600H 155 PRESSURE TRANSFER SYSTEM. In: *Chart Industries* [online]. © 2023 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Energy>
- [37] LIQUID HYDROGEN FUEL STATIONS: LH2 VEHICLE FUELING. In: *Chart Industries* [online]. © 2024 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Energy>
- [38] ACEVES, Salvador M.; ESPINOSA-LOZA, Francisco; LEDESMA-OROZCO, Elias; ROSS, Timothy O.; WEISBERG, Andrew H. et al. High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2010, roč. 35, č. 3, s. 1219-1226. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.069>. [cit. 2025-02-22].
- [39] NIERMANN, Matthias, Alexander BECKENDORFF, Martin KALTSCHMITT a Klaus BONHOFF. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2019, **44**(13), 6631-6654 [cit. 2025-02-22]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ijhydene.2019.01.199](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.199)
- [40] SCHLAPBACH, Louis a Andreas ZÜTTEL. Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature (London)* [online]. LONDON: Springer Nature, 2001, **414**(6861), 353-358 [cit. 2025-02-22]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: [doi:10.1038/35104634](https://doi.org/10.1038/35104634)

- [41] DURBIN, D.J. a C. MALARDIER-JUGROOT. Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2013, **38**(34), 14595-14617 [cit. 2025-02-22]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.07.058
- [42] TEICHMANN, Daniel, Wolfgang ARLT, Eberhard SCHLÜCKER, Peter WASSERSCHIED, Prof. Dr. Detlef STOLTEN a Dr. Bernd EMONTS. Transport and Storage of Hydrogen via Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Systems. In: *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. 2. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch33>. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2016, s. 811-830. ISBN 3527332383. Dostupné z: doi:10.1002/9783527674268.ch33
- [43] LAN, Rong a Shanwen TAO. Ammonia as a suitable fuel for fuel cells. *Frontiers in energy research* [online]. Frontiers Media S.A, 2014, **2** [cit. 2025-02-22]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2014.00035
- [44] LIU, Jianjun, Lei SUN, Jinggang YANG, Dongliang GUO, Dabing CHEN, Liheng YANG a Peng XIAO. Ti-Mn hydrogen storage alloys: from properties to applications. *RSC advances* [online]. England: Royal Society of Chemistry, 2022, **12**(55), 35744-35755 [cit. 2025-02-22]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/d2ra07301c
- [45] LI, Xinfeng, Xianfeng MA, Jin ZHANG, Eiji AKIYAMA, Yanfei WANG a Xiaolong SONG. Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention. *Acta metallurgica sinica: English letters* [online]. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2020, **33**(6), 759-773 [cit. 2025-02-23]. ISSN 1006-7191. Dostupné z: doi:10.1007/s40195-020-01039-7
- [46] DRÁPALA, Jaromír. DIFUZNÍ PROCESY V PEVNÝCH LÁTKÁCH SE ZAMĚŘENÍM NA RŮST A LEGOVÁNÍ KRYSTALŮ. *Škola růstu krystalů* [online]. Ostrava, 2004, 37-47 [cit. 2025-02-23]. Dostupné z: [https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2004\\_37Drapala.pdf](https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2004_37Drapala.pdf)
- [47] DWIVEDI, Sandeep Kumar a Manish VISHWAKARMA. Hydrogen embrittlement in different materials: A review. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2018, **43**(46), 21603-21616 [cit. 2025-02-23]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2018.09.201
- [48] MARÍN ARCOS, Jose M. a Diogo M.F. SANTOS, 2023. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases* [online]. **3**(1), 25–46. Dostupné z: doi:10.3390/gases3010002. [cit. 2025-03-22]
- [49] LEE, Dong-yeon a ELGOWAINY, Amgad. By-product hydrogen from steam cracking of natural gas liquids (NGLs): Potential for large-scale hydrogen fuel production, life-cycle air emissions reduction, and economic benefit. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2018, roč. 43, č. 43, s. 20143-20160. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.039>. [cit. 2025-03-22].

- [50] Autogefühl Checks Out The New Toyota Mirai Hydrogen Fuel Cell Car. In: KIVIAC [online]. 2021, 02.14.2021 [cit. 2025-03-22]. Dostupné z: <https://kiviac.com/2021/02/14/autogefuhl-checks-out-the-new-toyota-mirai-hydrogen-fuel-cell-car/>
- [51] WOODTLI, Jarmila a Rolf KIESELBACH. Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking. *Engineering failure analysis* [online]. OXFORD: Elsevier, 2000, 7(6), 427-450 [cit. 2025-02-23]. ISSN 1350-6307. Dostupné z: doi:10.1016/S1350-6307(99)00033-3
- [52] ČSN ISO 14687 (656520) A Kvalita vodíkového paliva - Specifikace produktu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [53] ČSN ISO 19880-8 (656525) A Plynný vodík - Čerpací stanice. Část 8, Kontrola kvality paliva = Gaseous hydrogen - Fuelling stations. Part 8, Fuel quality control. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [54] SAE INTERNATIONAL. *Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles* [online]. 3. 2023, 108 s. [cit. 2025-02-26]. Dostupné také z: [https://doi.org/10.4271/J2579\\_202301](https://doi.org/10.4271/J2579_202301)
- [55] SAE INTERNATIONAL. *Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles* [online]. 5. 2020, 11 s. [cit. 2025-02-26]. Dostupné z: [https://doi.org/10.4271/J2719\\_202003](https://doi.org/10.4271/J2719_202003)
- [56] Aman, Suyash YADAV, Kshitij SINGH, Ajay Singh VERMA a Sandeep CHHABRA. Study of utilization of hydrogen as fuel in internal combustion engine. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 2022(64), 1211-1216 [cit. 2025-03-12]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.660
- [57] GURBUZ, Habib. The effect of H<sub>2</sub> purity on the combustion, performance, emissions and energy costs in an SI engine. Online. *Thermal science*. 2020, roč. 24, č. 1 Part A, s. 37-49. ISSN 0354-9836. Dostupné z: <https://doi.org/10.2298/TSCII80705315G>. [cit. 2025-03-12].
- [58] UEDA, Akihiro; NISIDA, Keiya; MATSUMURA, Yukihiro; ICHIKAWA, Takayuki; NAKASHIMADA, Yutaka et al. Effects of hydrogen and carbon dioxide on the laminar burning velocities of methane-air mixtures. Online. *Journal of the Energy Institute*. 2021, roč. 99, s. 178-185. ISSN 1743-9671. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.09.007>. [cit. 2025-03-12].
- [59] WRÓBEL, Kamil; WRÓBEL, Justyna; TOKARZ, Wojciech; LACH, Jakub; PODSADNI, Katarzyna et al. Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review. Online. *Energies (Basel)*. 2022, roč. 15, č. 23, s. 8937. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en15238937>. [cit. 2025-03-12].
- [60] WANG, Lei; LI, Haiyu; HUANG, Zhaoming; WANG, Li a CHEN, Weiguo. Impact of hydrogen direct injection on engine combustion and emissions in a GDI engine. Online. *Advances in mechanical engineering*. 2023, roč. 15, č. 9. ISSN 1687-8132. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/16878132231189117>. [cit. 2025-03-26].

- [61] ALRBAI, Mohammad; AHMAD, Adnan Darwish; AL-DAHIDI, Sameer; ABUBAKER, Ahmad M.; AL-GHUSSAIN, Loiy et al. Effect of hydrogen sulfide content on the combustion characteristics of biogas fuel in homogenous charge compression ignition engines. Online. *Case studies in thermal engineering*. 2022, roč. 40, s. 102509. ISSN 2214-157X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102509>. [cit. 2025-03-25].
- [62] KOUSHESHI, Navid; YARI, Mortaza; PAYKANI, Amin; SABERI MEHR, Ali a DE LA FUENTE, German F. Effect of syngas composition on the combustion and emissions characteristics of a syngas/diesel RCCI engine. Online. *Energies (Basel)*. 2020, roč. 13, č. 1, s. 212. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13010212>. [cit. 2025-03-17]
- [63] MENG, Hao; JI, Changwei; LIU, Siqi; YANG, Jinxin; XIN, Gu et al. Research on the behavior of CO<sub>2</sub> on hydrogen-fueled Wankel rotary engine performance. Online. *Fuel (Guildford)*. 2023, roč. 335, s. 127036. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127036>. [cit. 2025-03-13].
- [64] NASIM, Md Nayer; NAWAZ, Behlol; DAS, Shubhra Kanti; SUBLABAN, Amina; GONZÁLEZ, Luis Miguel García-Cuevas et al. Manipulating hydrogen oxy-combustion through carbon dioxide addition. Online. *Fuel (Guildford)*. 2024, roč. 357, s. 129844. ISSN 0016-2361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129844>. [cit. 2025-04-02].
- [65] MOHAMED, Mohamed, Abinash BISWAL, Xinyan WANG, Hua ZHAO, Anthony HARRINGTON, Jonathan HALL a Mark PECKHAM, 2024. Exploring the benefits of hydrogen-water injection technology in internal combustion engines: A rigorous experimental study. *International Journal of Engine Research* [online]. Dostupné z: [doi:10.1177/14680874241288624](https://doi.org/10.1177/14680874241288624). [cit. 2025-03-17].
- [66] YAO, Qinghe; LU, Hongbo; CHEN, Junyi a KWAN, Trevor Hocksun. Numerical Investigation of the Combustion Characteristics of a Hydrogen-Fueled Engine with Water Injection. Online. *Fire (Basel, Switzerland)*. 2024, roč. 7, č. 8, s. 289. ISSN 2571-6255. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fire7080289>. [cit. 2025-03-17].
- [67] RUEDA-VÁZQUEZ, J.M.; SERRANO, J.; JIMÉNEZ-ESPADAFOR, F.J. a DORADO, M.P. Experimental analysis of the effect of hydrogen as the main fuel on the performance and emissions of a modified compression ignition engine with water injection and compression ratio reduction. Online. *Applied thermal engineering*. 2024, roč. 238, s. 121933. ISSN 1359-4311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121933>. [cit. 2025-03-17].
- [68] HUANG, Zhaoming; WANG, Liangmo; PAN, Hao; LI, Jianping; WANG, Tao et al. Experimental Study on the Impact of Hydrogen Injection Strategy on Combustion Performance in Internal Combustion Engines. Online. *ACS omega*. 2023, roč. 8, č. 42, s. 39427-39436. ISSN 2470-1343. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05104>. [cit. 2025-03-17].

- [69] FU, Zhen; LI, Yuhuai; WU, Weilong; LI, Yong a GAO, Wenzhi. Experimental study on the combustion and emission performance of the hydrogen direct injection engine. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2024, roč. 61, s. 1047-1059. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.276>. [cit. 2025-03-17].
- [70] WU, Taoyang; LIU, Jixu; WU, Chunling; JING, Xiaojun; LIU, Jiajia et al. Experimental study on the factors influencing performance and emissions of hydrogen internal combustion engines. Online. *E3S web of conferences*. 2024, roč. 522, s. 1009. ISSN 2555-0403. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452201009>. [cit. 2025-03-17].
- [71] FELAYATI, Frengki Mohamad, Hadi PRASUTIYON, Sholikhatul JANAH, Dimas Hadi WIJAYA, Mukhammat Bayu SAPUTRA a Semin SEMIN, 2024. Performance and carbon emissions of a diesel/oxy-hydrogen dual-fuel engine with oxy-hydrogen injection variation under low and medium load conditions. *International Journal of Renewable Energy Development* [online]. Dostupné z: [doi:10.61435/ijred.2024.57983](https://doi.org/10.61435/ijred.2024.57983). [cit. 2025-03-17].
- [72] DING, Weiqi, Renjie DENG, Jun DENG, C. P. WANG a Liguang LI, 2024. Combustion characteristics optimization and thermal efficiency enhancement by stratified charge of hydrogen direct injection for argon power cycle hydrogen engine. *International Journal of Engine Research* [online]. Dostupné z: [doi:10.1177/14680874241233218](https://doi.org/10.1177/14680874241233218). [cit. 2025-03-17].
- [73] ESLAMI, Mohammad Javad, Bahram HOSSEINZADEH SAMANI, Sajad ROSTAMI, Rahim EBRAHIMI a Alireza SHIRNESHAN, 2023. Investigating and optimizing the mixture of hydrogen-biodiesel and nano-additive on emissions of the engine equipped with exhaust gas recirculation. *Biofuels* [online]. **14**, 473–484. Dostupné z: [doi:10.1080/17597269.2022.2148877](https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2148877)
- [74] MESKE, Prof. Ralf, Klaus SCHMIDT, Hiroyuki SHIBA, et al. *Component and Combustion Optimization of a Hydrogen Internal Combustion Engine to Reach High Specific Power for Heavy-Duty Applications* [online]. 2023 [cit. 2025-03-17]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2023-32-0038>. [cit. 2025-03-17].
- [75] RAMEEZ, P.V. a MOHAMED IBRAHIM, M. A comprehensive review on the utilization of hydrogen in low temperature combustion strategies: Combustion, performance and emission attributes. Online. *Journal of the Energy Institute*. 2024, vol. 113, s. 101511. ISSN 1743-9671. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101511>. [cit. 2025-04-27].
- [76] MASURIER, Jean-Baptiste; LOW-KAME, Jean; OUNG, Richard a FOUCHER, Fabrice. *Piston Geometries Impact on Spark-Ignition Light-Duty Hydrogen Engine*. 2024. ISSN 0148-7191. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2024-01-2613>.

- [77] AKAL, Dinçer; ÖZTUNA, Semiha a BÜYÜKAKIN, Mustafa Kemalettin. A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2020, roč. 45, č. 60, s. 35257-35268. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.001>. [cit. 2025-03-17].
- [78] Toyota: The GR Yaris H2 that completed a demo run during the ninth round of the World Rally Championship in Belgium. In: *TOYOTA MOTOR CORPORATION* [online]. 2022, 2022-08-21 [cit. 2025-03-19]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/album/images/37888377/>
- [79] The Impact of Hydrogen Combustion on Engine Durability. *PCS INSTRUMENTS* [online]. 2024, December 12, 2024 [cit. 2025-04-22]. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/articles/hydrogen-as-a-fuel/>
- [80] GARRETT, Beauregard. Findings of Hydrogen Internal Combustion Engine Durability. *Electric Trans Engineering Corporation* [online]. 2010, 1-65 [cit. 2025-04-22]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.2172/1031548>
- [81] BIENEMAN, Jason, Fabio ARAUJO, Nikhil NACHAPPA a Kushalappa IYCHODIANDA, 2023. Hydrogen Internal Combustion Engine Component Investigation and Development for Heavy Duty Truck Applications [online]. Dostupné z: doi:10.1115/icef2023-110098. [cit. 2025-03-20]
- [82] AZEEM, Naqash, Carlo BEATRICE, Alberto VASSALLO, Francesco Concetto PESCE a Azka KHALID, 2023. Review and evaluation of metals and alloy's compatibility with hydrogen-fueled internal combustion engines. *International Journal of Engine Research* [online]. Dostupné z: doi:10.1177/14680874231184981. [cit. 2025-03-20]
- [83] FREHN, Andreas, David KRUS a Steffen MACK, 2023. High-Performance Alloys for Conventional ICE and Hydrogen ICE Applications [online]. Dostupné z: doi:10.1115/icef2023-110018. [cit. 2025-03-20]
- [84] LOTT, Patrick, K. SCHÄFER, Olaf DEUTSCHMANN, Manuel WERNER, Philipp WEINMANN, Lisa ZIMMERMANN a H. TOEBBEN, 2024. Reducing Emissions from Lean-Burn Hydrogen Combustion Engines Using a State-of-the-Art Oxidation Catalyst and a VWTi-Based SCR Catalyst: Potentials and Challenges. *SAE technical paper series* [online]. Dostupné z: doi:10.4271/2024-01-2634. [cit. 2025-03-20]
- [85] STĘPIEŃ, Zbigniew, 2021. A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. *Energies* [online]. **14**(20), 6504. Dostupné z: doi:10.3390/EN14206504. [cit. 2025-03-21]
- [86] ÖZYALCIN, Can; STERLEPPER, Stefan; ROISER, Sebastian; EICHLSEDER, Helmut a PISCHINGER, Stefan. Exhaust gas aftertreatment to minimize NOX emissions from hydrogen-fueled internal combustion engines. Online. *Applied energy*. 2024, roč. 353, s. 122045. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122045>. [cit. 2025-03-22].

- [87] VERHELST, Sebastian a WALLNER, Thomas. Hydrogen-fueled internal combustion engines. Online. *Progress in energy and combustion science*. 2009, roč. 35, č. 6, s. 490-527. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>. [cit. 2025-03-23].
- [88] RIERA, Jefferson A.; LIMA, Ricardo M. a KNIO, Omar M. A review of hydrogen production and supply chain modeling and optimization. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2023, vol. 48, no. 37, s. 13731-13755. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.242>. [cit. 2025-04-05].
- [89] SINGH, Anoop; RATHORE, Dheeraj; RATHORE, Dheeraj a SINGH, Anoop. *Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective*. New Delhi: Springer India, 2016. ISBN 9788132235750. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3577-4>.
- [90] Vodíková strategie ČR aktualizace 2024 schválena vládou. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2024, 18.7.2024 [cit. 2025-04-05]. Dostupné z: <https://mpo.gov.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-aktualizace-2024-schvalena-vladou--282165/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AWE	Alkaline Water Electrolysis; Alkalická elektrolýza vody
AI	Artificial intelligence; Umělá inteligence
ANSI	American National Standards Institute; Americký národní normalizační institut
Ar	Argon
ASME	American Society of Mechanical Engineers; Americká společnost strojních inženýrů
CCS	Carbon Capture and Storage; Zachytávání a ukládání uhlíku
CNG	Compressed natural gas; Stlačený zemní plyn
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
CuCl	Chlorid měďný
CuCl <sub>2</sub>	Chlorid měďnatý
ČSN	Česká technická norma
DOT	The Department of Transportation; Ministerstvo dopravy
EGR	Exhaust Gas Recirculation; Recirkulace výfukových plynů
H <sub>2</sub>	Vodík
H <sub>2</sub> O	Voda
H <sub>2</sub> S	Sirovodík
HCl	Kyselina chlorovodíková
HE	Hydrogen embrittlement; Vodíková křehkost
HEDE	hydrogen-enhanced decohesion mechanism; Vodíkem posílená dekoheze
HELP	Hydrogen-enhanced localized plasticity mechanism; Lokální plasticita zvýšená vodíkem
HESIV	Hydrogen-enhanced strain-induced vacancies; Vodíkem zesílené vakance vyvolané deformace
HIPT	Hydrogen-induced phase transformation; Vodíkem indukovaná fázová přeměna
HTGR	High temperature gas cooled nuclear reactor; Vysokoteplotní plynem chlazený jaderný reaktor
CH <sub>2</sub> O	Formaldehyd
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Kyselina mravenčí
CH <sub>4</sub>	Metan
CH <sub>x</sub>	Uhlovodíky
IEC	International Electrotechnical Commission; Mezinárodní

	elektrotechnická komise
ISO	International Organization for Standardization; Mezinárodní organizace pro normalizaci
LNG	Liquefied natural gas; Zkapalněný zemní plyn
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers; Kapalný organický nosič vodíku
MHD	Městská hromadná doprava
N <sub>2</sub>	Dusík
NFPA	National Fire Protection Association; Národní asociace požární ochrany
NH <sub>3</sub>	Amoniak
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
O <sub>2</sub>	Kyslík
OH	Hydroxid
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PEM	Proton exchange membrane; Proton-výměnná membrána
SAE	Society of Automotive Engineers; Společnost automobilových inženýrů
SCR	Selective Catalytic Reduction; selektivní katalytická redukce
SMR	Steam Methane Reforming; parní reformingu metanu
USA	United States of America; Spojené státy americké
VHTR	Very-High Temperature reactor; Vysokoteplotní reaktor