



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

VODÍK A BEZPEČNOST V DOPRAVĚ

HYDROGEN AND SAFETY IN TRANSPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Rostislav Rusek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matěj

Pouliček

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Rostislav Rusek**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Matěj Pouliček**
Akademický rok: 2023/24

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:

Vodík a bezpečnost v dopravě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika vodíku a bezpečnosti v dopravě se zaměřuje na zkoumání rizik a bezpečnostních aspektů spojených s využitím vodíku jako alternativního paliva v dopravních prostředcích a infrastruktuře. Použití vodíku v palivových článcích nebo spalovacích motorech vyžaduje pečlivé a komplexní opatření pro minimalizaci možných bezpečnostních rizik. Téma je klíčové pro úspěšný a udržitelný rozvoj vodíkové dopravy a zajištění bezpečného provozu vozidel poháněných vodíkem pro cestující, posádky a širší veřejnost.

Cíle bakalářské práce:

Identifikace potenciálních bezpečnostních rizik a výzev v souvislosti s použitím vodíku v dopravě.
Analýza bezpečnostních opatření a normativů v oblasti vodíkové dopravy.
Hodnocení technologických inovací a bezpečnostních prvků s ohledem na ekonomickou stránku a vliv na životní prostředí.
Vytvoření srovnávací analýzy s jinými alternativními palivy.

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 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce identifikuje rizika spojená s úniky, skladováním a manipulací s vodíkem, jakožto slibným nízkoemisním palivem budoucnosti. Úvodem udává základní charakteristiky vodíku, či jeho způsoby skladování a přepravy. Dále analyzuje stávající bezpečnostní opatření, popisuje vodíkovou dopravu a technologické inovace z ekonomické stránky a s ohledem na životní prostředí. Závěrečná část porovnává vodík s alternativními palivy, konkrétně se stlačeným zemním plynem a zkapalněným ropným plynem. Tato práce je zpracována na základě rešerše relevantní literatury, shrnuje aktuální poznatky a zdůrazňuje potřebu dalšího výzkumu pro zajištění bezpečné budoucnosti vodíku jako alternativního paliva v dopravních prostředcích i infrastruktuře.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, rizika v dopravě, bezpečnostní opatření, inovace, ekonomika, životní prostředí, srovnání alternativních paliv.

ABSTRACT

This bachelor thesis identifies the risks associated with the leakage, storage and handling of hydrogen as a promising low-emission fuel of the future. It starts by giving the basic characteristics of hydrogen, or its storage and transport methods. It then analyses existing safety measures, describes hydrogen transport and technological innovations from an economic and environmental perspective. The final section compares hydrogen with alternative fuels, namely compressed natural gas and liquefied petroleum gas. This thesis is based on a search of the relevant literature, summarises current knowledge and highlights the need for further research to ensure a secure future for hydrogen as an alternative fuel in transport vehicles and infrastructure.

KEYWORDS

Hydrogen, transport risks, safety measures, innovation, economics, environment, comparison of alternative fuels.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUSEK, Rostislav. *Vodík a bezpečnost v dopravě* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157454>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Matěj Pouliček.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 22. května 2024

.....

Rostislav Rusek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mým přátelům a rodině za podporu po celou dobu studia i při psaní bakalářské práce. Zároveň děkuji Ing. Matějovi Poulíčkovi za vedení a rady v průběhu jejího zpracovávání.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Charakteristika vodíku	12
2 Skladování a přeprava vodíku.....	14
2.1 Skladování	14
2.1.1 Stlačený vodík	14
2.1.2 Kapalný vodík	15
2.1.3 Kryo komprese	16
2.1.4 Hydridy	16
2.2 Přeprava	17
2.2.1 Čerpací stanice.....	19
3 Rizika skladování a přepravy vodíku	20
3.1 Únik a difúze vodíku	20
3.1.1 Vysokotlaký plynný vodík	20
3.1.2 Kapalný vodík	21
3.2 Samovolné hoření při úniku vysokotlakého vodíku	22
3.2.1 Mechanismus iniciace únikového spalování	22
3.3 Poškození materiálů vodíkem.....	24
3.4 Návrhy na další výzkum bezpečnosti	26
3.5 Bezpečnost vodíkových dopravních prostředků.....	27
3.5.1 Vozidla s palivovými články	27
3.5.2 Železniční doprava	28
4 Bezpečnostní opatření	30
4.1 Bezpečnostní prvky	30
4.2 Předpisy a normativy	33
4.2.1 ISO normy	33
4.2.2 IEC normy	35
5 Technologické inovace, náklady a emise	37
5.1 Náklady na skladování vodíku	37
5.2 Náklady na přepravu vodíku	38
5.3 Emise skladování a přepravy	38
5.4 Vodíkové palivové články – emise a náklady	39
5.5 Tankování vodíku do vozidel	41
5.5.1 Proces doplňování paliva a nárůst teploty během tankování.....	41
5.5.2 Strategie pro řízení teploty	42
5.5.3 Nejnovější technologický pokrok - mobilní čerpací stanice	43
5.5.4 Perspektivy budoucího výzkumu.....	43
6 Srovnání s alternativními palivy CNG a LPG	45
6.1 Stlačený zemní plyn (CNG)	45
6.2 Zkapalněný ropný plyn (LPG).....	45
6.3 Vodík a CNG	45
6.3.1 Míchání vodíku a zemního plynu	46
6.4 Celkové srovnání	47

Závěr	52
Použité informační zdroje	54
Seznam použitých zkratk a symbolů	61
Seznam obrázků a tabulek	63

ÚVOD

V současné době svět čelí nevyhnutelné potřebě přemýšlet nad alternativními zdroji energie pro dopravu, které by minimalizovaly negativní dopady na životní prostředí, ale také poskytly spolehlivé a udržitelné možnosti pohonu. V této souvislosti se vodík stal jedním z nejvýznamnějších kandidátů pro budoucnost dopravy, protože má při správné výrobě téměř nulové emise skleníkových plynů a nabízí potenciál revoluční změny v oblasti energetiky a mobility.

Téma vodíku a bezpečnosti v dopravě vzbuzuje značný zájem ze strany odborníků i veřejnosti obecně. Je to téma, které nesouvisí pouze s technickými a technologickými inovacemi, ale také s aspekty bezpečnosti, které jsou klíčové pro úspěšné zavádění vodíkových systémů do dopravního sektoru. Využití vodíku v palivových článcích nebo spalovacích motorech však s sebou přináší specifická bezpečnostní rizika – spojená s produkcí, skladováním, manipulací a distribucí vodíku – a ty je třeba důkladně zhodnotit a řešit. Mezi nejvýznamnější rizika patří hořlavost a výbušnost vodíku, riziko úniku a tvorby výbušných směsí, křehký charakter materiálů používaných v nádržích na vodík a potenciální dopady na lidské zdraví a životní prostředí v případě havárie.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na komplexní analýzu problematiky vodíku a bezpečnosti v dopravě. Úvodem udává charakteristiku vodíku, jeho způsoby skladování a přepravy. Jejím cílem je identifikovat potenciální bezpečnostní rizika a výzvy spojené s využitím vodíku v dopravních prostředcích a infrastruktuře. Práce dále prozkoumává existující bezpečnostní prvky, opatření a normativy v této oblasti a posuzuje vodíkovou dopravu i technologické inovace s ohledem na jejich ekonomickou stránku a dopad na životní prostředí. V závěru práce je provedena srovnávací analýza vodíku s alternativními palivy, konkrétně se stlačeným zemním plynem a zkapalněným ropným plynem.

Využití vodíku jako alternativního paliva přináší mnoho výhod a představuje nadějný klíčový prvek budoucí mobility, ale zároveň pro dosažení úspěšného a udržitelného rozvoje tohoto odvětví vyžaduje důkladné a pečlivé plánování a implementaci bezpečnostních opatření a aspektů do praxe. Tato práce klade důraz na minimalizaci možných bezpečnostních rizik a zajištění bezpečného provozu vozidel poháněných vodíkem, taktéž se pokusí přispět k lepšímu porozumění této problematice a poskytnout podklady pro potřebný další výzkum a diskusi v oblasti vodíkové dopravy.

1 CHARAKTERISTIKA VODÍKU

Vodík je nejrozšířenější prvek ve vesmíru a po kyslíku a křemíku 3. nejrozšířenější prvek na planetě Zemi. Nachází se na prvním místě v periodické tabulce prvků – je to nejjednodušší a nejlehčí plyn, který má v jádru jeden proton a v obalu jeden elektron. Samostatně se téměř nevyskytuje, díky jeho reaktivnosti se váže na ostatní prvky a tvoří sloučeniny nejčastěji s uhlíkem a kyslíkem (např. voda, zemní plyn, metanol, uhlí, ropa). Při úniku se okamžitě rozptýluje do vzduchu, avšak nijak neznečišťuje životní prostředí – je bezbarvý, bez chuti i zápachu, není toxický, ale je hořlavý a výbušný. [1], [2]

Tabulka 1: Vybrané chemicko-fyzikální informace o vodíku [2], [3]

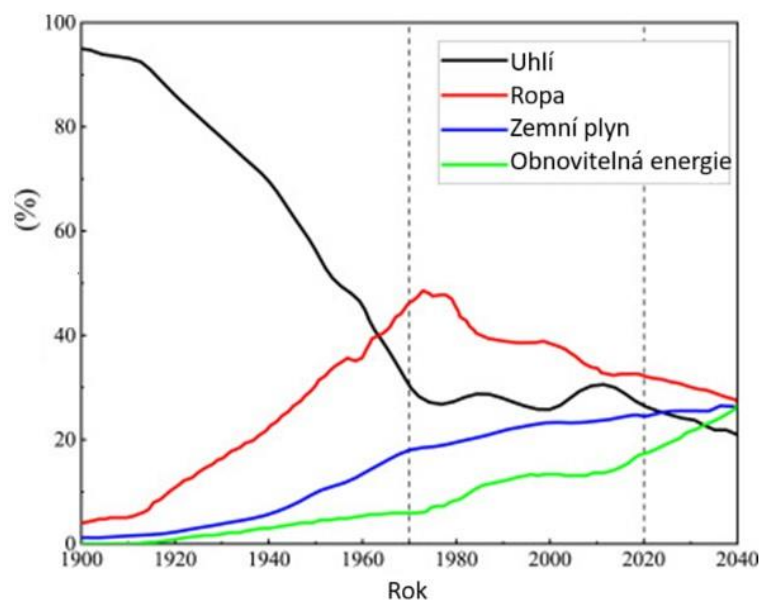
Značení	H
Mezinárodní název	Hydrogenium
Protonové číslo	1
Molová hmotnost	$1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Teplota varu	$- 252,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota tání	$- 259,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota samovznícení	$585 \text{ }^\circ\text{C}$
Minimální energie k zapálení	$0,02 \text{ mJ}$
Hustota	$0,084 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Výhřevnost	$120\text{-}142 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Rozsah zápalnosti	$4\text{-}75 \text{ } \%$
Koeficient difuze	$0,63 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Kromě výskytu v základním tvaru tzv. protiu se vyskytuje v dalších dvou izotopech a to deuteriu (má navíc 1 neutron) a radioaktivním tritiu (má navíc 2 neutrony). Vodíkové dvouatomové molekuly často obsahují kovalentní vazbu, avšak mezimolekulárně vzniká důležitá vodíková vazba, v důsledku které se zesílí přitažlivé síly a tím se zvýší teplota tání dané sloučeniny. Díky tomu se na Zemi za běžných teplot vyskytuje voda v kapalném skupenství. [2]

Vodík objevil v roce 1776 britský vědec Henry Cavendish, ale kvůli tehdy výhodnějším fosilním palivům nenašel v průmyslu moc uplatnění. Využití našel ve 20. století jako palivo pro vesmírné rakety i například pro misi Apollo nebo v ČR jako složka svítivplynu, který byl poté nahrazen zemním plynem. V dnešní době slouží jako nosič energie a má široké uplatnění v dopravě, energetice a průmyslu. V dopravě se využívá jako bezemisní konkurence

elektromobilů ve vodíkových automobilech, v energetice k ukládání energie a v průmyslu například jako nástroj k redukci železa, kde může nahradit fosilní paliva, či k výrobě amoniaku, který se používá ke zpracování hnojiv. [1]

Globální oteplování a energetická krize jsou dva závažné problémy, kterým lidstvo ve 21. století čelí. V posledních letech státy napříč světem vypracovaly obecné řešení této krize a v rámci OSN se například zavázaly obracet se k obnovitelným energiím a snižovat emise uhlíku. EU si již na rok 2050 stanovila cíl dosáhnout klimatické neutrality. Do vodíku jsou v tomto ohledu vkládány značné naděje – doufá se, že vodík k tomu dopomůže a poslouží jako úschovna čisté energie. [1], [19]



Obrázek 1: Vývoj spotřeby energie od 20. století [19], upraveno

2 SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVA VODÍKU

2.1 SKLADOVÁNÍ

Vodík lze fyzicky skladovat zejména jako plyn nebo kapalinu. Skladování vodíku v plynném stavu obvykle vyžaduje vysokotlaké nádrže o tlaku 35-100 MPa. Skladování vodíku v kapalném stavu vyžaduje kryogenní teploty, protože bod varu vodíku při tlaku jedné atmosféry je $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vodík lze také skladovat na povrchu pevných látek (adsorpci) nebo uvnitř pevných látek (absorpci). Ideální skladovací médium by mělo umožňovat vysokou objemovou hustotu energie, rychlý příjem a uvolňování paliva, provoz při pokojových teplotách a atmosférickém tlaku, bezpečné použití a optimální ekonomičnost. V současné době se uvádí jako nejvyspělejší technologie stlačování vodíku na plynné skupenství. [1], [4], [5]

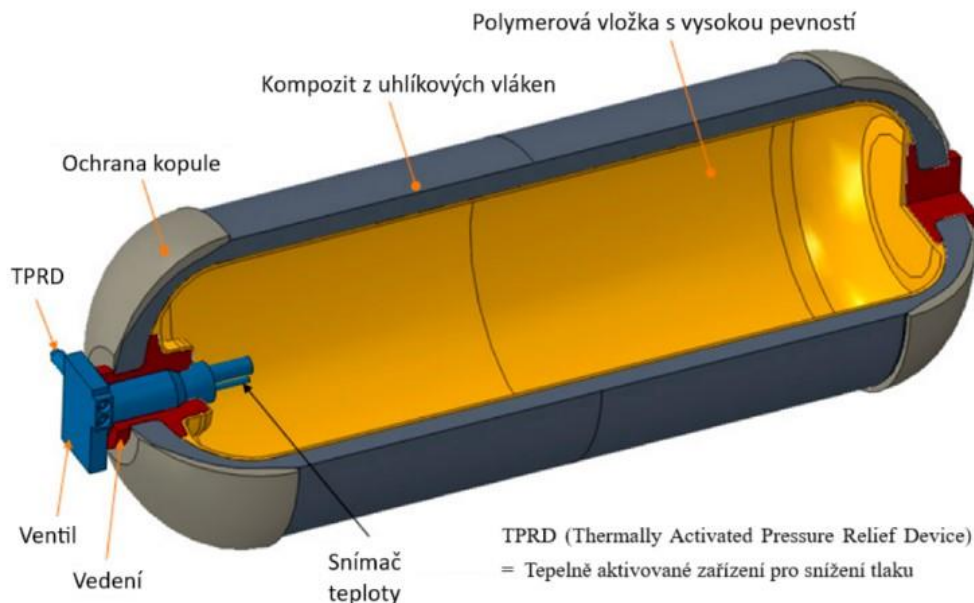
2.1.1 STLAČENÝ VODÍK

Tato metoda znamená fyzické skladování stlačeného vodíku ve vysokotlakých nádržích o tlaku až 100 MPa. Stlačený plynný vodík má dobrou hustotu energie na hmotnost, ale nízkou hustotu energie na objem ve srovnání s uhlovodíky, a proto vyžaduje větší nádrž pro skladování – ty jsou těžší než menší nádrže na uhlovodíky. Zvýšení tlaku plynu může zlepšit hustotu energie v poměru k objemu, což by vedlo k vytvoření menších, ale ne lehčích nádrží. Přestože je tato technologie jednoduchá, je tento proces objemově neefektivní. Na tlakové nádoby pro skladování vodíku na palubě automobilů spoléhají komerční elektrická vozidla s palivovými články jako je Toyota Mirai a Honda Clarity. [4], [6], [23]

Vodíkové tlakové nádoby jsou nádrže vyrobené z kovů nebo kompozitů, existuje 5 hlavních typů: [8]

- Typ I: kovová nádrž, obvykle ocelová nebo hliníková (pro tlak 17,5 až 20 MPa). [8], [9]
- Typ II: kovová nádrž ovinutá vlákny – aramidová, skleněná nebo uhlíková (tlak 26,3 až 29,9 MPa). [8], [9]
- Typ III: kompozitní nádrž vyrobená ze skleněných vláken, aramidu nebo uhlíkových vláken, obalená kovovou vložkou (podle materiálu tlak 30,5 až 70 MPa). [8], [9]
- Typ IV: kompozitní nádrž vyrobená z uhlíkových vláken nebo termoplastů s polymerní vložkou (tlak 35 až 70 MPa), viz obr. 2. [8], [9]
- Typ V: plně kompozitní nádrž bez vložky (max. tlak až 100 MPa). [8], [9]

U nádrží hrozí nebezpečí tvoření puchýřů. Ty se tvoří na plastové vložce, pokud se při vysokém tlaku vodík absorbuje a pokud je rychlost odtlačování vyšší než rychlost úniku absorbovaného plynu difuzí. Vznik puchýřů na vložce v zásobníku vodíku může mít za následek trhliny v kompozitním materiálu, který nese hlavní tlakové zatížení a v případě poruchy by mohl vést k haváriím. [22]

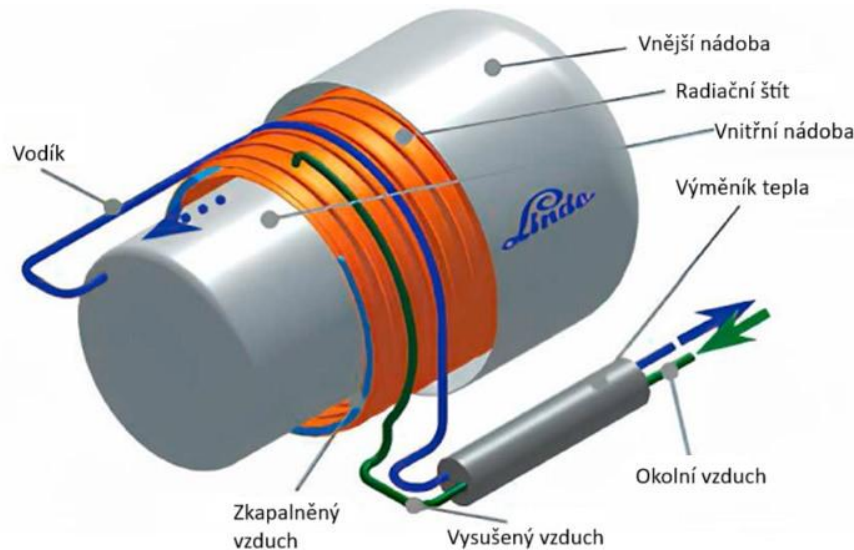


Obrázek 2: Kompozitní tlaková nádoba s vodíkovým pláštěm typu IV určená pro skladování na palubě elektrických vozidel s palivovými články [10], upraveno

2.1.2 KAPALNÝ VODÍK

Skladování kapalného vodíku je technicky složité a nákladné. Vodík musí být ochlazen na -253 °C a skladován v dobře izolovaných nádržích, aby se tato nízká teplota udržela a minimalizovalo se odpařování, což dosud omezovalo používání zkapalněného vodíku. Jeho výhodou je, že v sobě uchovává přibližně 2,6násobek energie na jednotku hmotnosti než benzín. Nevýhodou je, že potřebuje přibližně čtyřikrát větší objem pro dané množství energie, což je způsobeno jeho velmi nízkou hustotou. Mezi největší uživatele patří průmysl polovodičových čipů a také se používá jako palivo pro kosmické rakety. S rozšířením nabídky a poptávky po vodíku z obnovitelných zdrojů se predikuje zkapalňování jako životaschopnější variantou skladování a přepravy. Chemická společnost Linde vyvinula zásobník kapalného vodíku pro vozidla, který dokáže udržet kapalný vodík při nízké teplotě 23 K ($-250,15\text{ °C}$) po dlouhou dobu pod tlakem $0,3\text{--}0,5\text{ MPa}$ (viz obr. 3). [7], [22], [23]

Kvůli tomu, že jsou materiály používané v zařízeních na kapalný vodík vystaveny nízkým teplotám, je třeba při jejich výběru věnovat pozornost rozdílům ve vlastnostech materiálů. Nejdůležitějšími tepelnými vlastnostmi zde jsou nízkoteplotní tepelné smršťování a nízkoteplotní křehkost, což je snížení schopnosti materiálu absorbovat energii nárazu při snížené teplotě. [22]



Obrázek 3: Nádoba na skladování kapalného vodíku [22], upraveno

2.1.3 KRYO KOMPRESI

Stlačování vodíku za studena se považuje za hybridní metodu, která kombinuje stlačený plyn a kapalný vodík. Nádrž musí být konstruována tak, aby pojmul kryogenní kapalinu, a tudíž odolala vnitřnímu tlaku. Z hlediska účinnosti lze tuto metodu považovat za lepší než samotné skladování v kapalném stavu, protože je omezeno odpařování. Izolovaná nádrž musí být schopna přijímat kryogenní teploty 20 K (-253,15 °C) a vysoký tlak nejméně 30 MPa a skládá se z kompozitní tlakové nádoby typu III s kovovou vložkou, která je uzavřena v sekundárním izolovaném plášti, jehož úkolem je omezit přenos tepla mezi vodíkem a okolím. Z hlediska infrastruktury nabízejí tyto nádrže flexibilitu při doplňování paliva, protože jsou kompatibilní pro plyný i kapalný vodík. [4], [11]

2.1.4 HYDRIDY

Pokud má vodík ideální teplotní a tlakové podmínky, může být reverzibilně absorbován pevnými sloučeninami. Skladování vodíku v pevných látkách má ve srovnání se skladováním pod tlakem nebo v kapalném stavu určité výhody – pokud jde o objemovou hustotu. Stlačený vodík ji má 17-33 kg H₂/m³, kryo-stlačený vodík 30-42 kg H₂/m³ a kovové hydridy i více než 150 kg H₂/m³. Nevýhodou této metody je nutnost regenerace vedlejšího produktu chemickou úpravou na vhodném místě. Tato metoda je spíše vhodná pro stacionární použití, ale najdeme ji také v automobilním průmyslu. [11], [60]

Hydridy vznikají tak, že molekula vodíku je nejprve oddělena na povrchu pevné látky a poté její atomy difundují do hostitelského kovu. V závislosti na mechanismu vazby mezi vodíkem a hostitelským materiálem existují různé skupiny hydridů: iontové hydridy (iontová vazba – alkalické kovy), kovalentní hydridy (kovalentní vazba – nekovy a polokovy) a intersticiální hydridy kovů (kovová vazba – chrom a palladium). Nejdůležitější parametry pro určení vhodného materiálu pro skladování souvisejí s absorpčními termodynamickými vlastnostmi,

kteřé jsou definovány měřením za rovnovážných podmínek charakteristiky tlaku a složení vodíku při dané teplotě. [11]

2.2 PŘEPRAVA

Doprava vodíku má zásadní vliv na náklady, spotřebu energie a emise spojené s vodíkovými cestami. Je potřeba infrastruktura pro dodávku vodíku z místa, kde se vyrábí, do výdejněho stojanu v čerpací stanici nebo do stacionárního zařízení na výrobu energie. [12], [18]

Existují tři základní způsoby dodávky vodíku: [18]

- a) Nákladní automobily s přívěsy se stlačeným vodíkem v trubkách
- b) Nákladní automobily s kryogenní kapalinou
- c) Potrubí se stlačeným plynem

Volba nejlevnějšího způsobu dodávky závisí na konkrétních geografických a tržních podmínkách jako např. počet obyvatel města, hustota osídlení, velikost a počet čerpacích stanic a rozšíření vozidel s palivovými články na trhu. V různých fázích rozvoje trhu s vodíkovým palivem by se mohla používat kombinace těchto možností – dodávání stlačeného plynu nákladními automobily je ideální pro malé stanice a velmi nízkou poptávku, dodávání kapalného plynu je ideální na dlouhé vzdálenosti a střední poptávku a dodávání potrubím je ideální pro hustě osídlené oblasti s velkou poptávkou po vodíku. [12], [18]



Obrázek 4: Nákladní automobil s přívěsem se stlačeným vodíkem v trubkách [21]

Potrubí se k přepravě vodíku používá již více než 50 let a dnes je po celém světě přibližně 16 000 km vodíkových potrubí, která dodávají vodík do rafinerií a chemických závodů. Husté sítě existují například mezi Belgií, Francií a Nizozemskem, v Německu nebo podél pobřeží Mexického zálivu ve Spojených státech. V porovnání s nákladními automobily je kromě menšího dopadu na životní prostředí potrubní doprava také bezpečnější. [18], [47]

Tabulka 2: Aspekty různých metod dopravy vodíku [18], upraveno

	Potrubí	Kapalina (silniční)	Kapalina (loď)	Trubkový přívěs
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> - Velké objemy - Vysoká účinnost - Nízké variabilní náklady - Poskytuje také ukládání 	<ul style="list-style-type: none"> - Větší objemy než stlačený plyn - Vysoká účinnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Mohlo by umožnit mezinárodní dopravu - Velmi vysoké objemy 	<ul style="list-style-type: none"> - Lze nasadit v malém měřítku
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - Kapitálově náročné - Potřeba velkých objemů 	<ul style="list-style-type: none"> - Nákladnost a neefektivnost procesu zkapalňování - Ztráty při vypařování - Zvýšení silniční dopravy 	<ul style="list-style-type: none"> - Žádné zkušenosti s přepravou LH₂ - Neproveditelné, dokud nebude existovat velká nabídka a poptávka - Ztráty při vypařování jsou významnější než u silniční dopravy 	<ul style="list-style-type: none"> - Malé objemy na kamion - Energeticky neefektivní - Nemůže zvládnout velkou kapacitu - Zvyšuje provoz
Vhodnost	<ul style="list-style-type: none"> - Velká množství plynu - Na skladování v potrubí 	<ul style="list-style-type: none"> - Velké množství - Při skladování v kapalném stavu 	<ul style="list-style-type: none"> - Velmi velké množství - Mezinárodní přeprava 	<ul style="list-style-type: none"> - Malá množství plynu - Malé vzdálenosti
Kapacita	- Až 100 000 kg/h	- Až 4000 kg na vozidlo	- Potenciálně 10 milionů kg na loď	- Až 400 kg na vozidlo
Investiční náklady	<ul style="list-style-type: none"> - 200 000-1 000 000 \$/km - 0,1-2,0 \$/kg H₂ nebo více v závislosti na vzdálenosti a kapacitě 	<ul style="list-style-type: none"> - 300 000-400 000 \$ za nákladní vozidlo - 0,3 \$/kg H₂ (bez zkapalňovacího zařízení) 	- 155 milionů dolarů na loď	<ul style="list-style-type: none"> - \$300,000 za nákladní vozidlo - 0,10-0,40 \$/kg
Náklady na provoz a údržbu	<ul style="list-style-type: none"> - Náklady na energii potrubních kompresorů - 0,03 \$/kg 	<ul style="list-style-type: none"> - Práce řidiče - 0,02–0,20 \$/kg 	<ul style="list-style-type: none"> - Práce posádky a pohonné hmoty 	<ul style="list-style-type: none"> - Práce řidiče - 0,5-2,0 \$/kg
Celkové náklady \$/kg/100 km	- 0,10-1,00 \$	- 0,3-0,5 \$	- 1,8-2,0 \$	- 0,5-2,0 \$/kg
Potřebná energie	- Potrubní kompresory	- Dopravní palivo	- Dopravní palivo	- Dopravní palivo
Účinnost	- 99,2 % na 100 km	<ul style="list-style-type: none"> - 99 % na 100 km pro dopravu - 75% účinnost zkapalňování 	<ul style="list-style-type: none"> - Spotřeba paliva neznámá - Vypařování 0,3 % denně 	- 94 % na 100 km

2.2.1 ČERPACÍ STANICE

V ČR se první čerpací stanice na vodík otevřela v roce 1999 v Neratovicích, ale sloužila pouze pro neveřejné využití. Druhá čerpací stanice, která je v provozu od roku 2020, se nachází v ÚJV Řež u Prahy, ale je také neveřejná. První veřejná stanice se otevřela v roce 2022 v Ostravě Vítkovicích pod společností VÍTKOVICE, a. s. Slouží pouze pro osobní vozy s plněním do tlaku 70 MPa, má denní výkon 40 kg vodíku a naplní zhruba 8-10 aut denně (při zvětšení kapacity zásobníku až 40 denně). [15], [16]

V dnešní době se již veřejných plnicích stanic vyskytuje více. Společnost ORLEN Unipetrol rozšířila v roce 2023 svou síť čerpacích stanic ORLEN-Benzina o vodíkovou stanici v pražském Barrandově určenou pro osobní automobily, nákladní vozidla i autobusy. Tento krok reflektuje evropské i národní priority v oblasti budování infrastruktury pro čistou mobilitu. Do roku 2030 plánuje ORLEN Unipetrol provozovat 28 vodíkových stanic a dva vodíkové distribuční terminály pro železniční dopravu v Litvínově a Neratovicích. [17]

V současné době jsou nejmodernější maloobchodní vodíkové stanice schopny uspokojit relativně nízkou poptávku elektrických vozidel s palivovými články, ale do budoucna je třeba provoz zlepšit, aby bylo možné prodávat vozidla na vodíkové palivo masově. [13]

3 RIZIKA SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVY VODÍKU

Výhody vodíku jako je jeho čistota, vysoká účinnost a široká škála zdrojů, jej činí poměrně slibným v nahrazení fosilních paliv, avšak z druhého pohledu zde figuruje nekompatibilita mezi vodíkem a ocelovými materiály – tendence způsobovat křehnutí vodíku při skladování v nádobách, což může vést k jeho úniku. A dále to, že je vodík v širokém rozsahu koncentrací na vzduchu hořlavý – pokud se po úniku setká se zdrojem vznícení, snadno dojde k výbuchu vodíkového oblaku. I bez zdrojů vznícení může únik vysokotlakého vodíku způsobit samovznícení a výbuch. [14], [22]

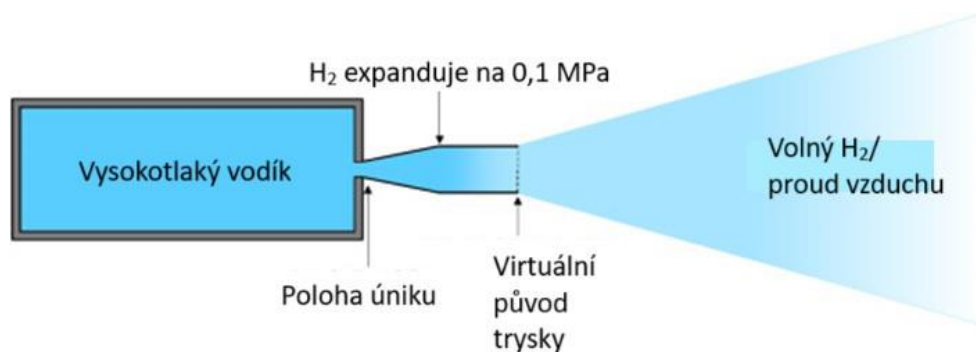
V letech 1965 až 2005 se vodíku týkalo 2,9 % nehod, při nichž byly použity vysokotlaké plyny. Pokud se výběr nehod omezí na výbuch nebo požár, poměr se zvýší na 5,6 %. Tyto statistiky naznačují, že vodík je v určitých ohledech nebezpečnější než jiné plyny. [29]

V roce 2019 došlo k několika výbuchům vodíku v Norsku, Spojených státech a Jižní Koreji. Mezi nimi si výbuch zásobníku vodíkového paliva v Jižní Koreji vyžádal 2 mrtvé a 6 zraněných. Příčinami nehod byly výbuchy vodíkového mraku a řetězové výbuchy způsobené samovznícením vodíku z důvodu chyb obsluhy a tyto nešťastné události opět vyvolaly obavy veřejnosti o bezpečnost vodíkové energie. [14], [22]

3.1 ÚNIK A DIFÚZE VODÍKU

3.1.1 VYSOKOTLAKÝ PLYNNÝ VODÍK

V důsledku rozdílných tlaků mezi zdrojem úniku plynu a okolní atmosférou může být proud úniku na výstupu v různých stavech proudění. Únik z vysokotlaké skladovací nádrže nebo potrubí obecně vytváří vysokotlaký nerozšířený proud. Koncentrační pole tohoto proudu se obvykle zjednodušuje metodou virtuální trysky, aby se mohlo lépe studovat. Protože tlak proudu vzduchu na ekvivalentním výstupu (výstupu virtuální trysky) je roven tlaku okolí, lze jej považovat za nízkotlaký únik (znázorněno na obr. 5). Na vytvořeném modelu tohoto úniku byly zkoumány změny koncentračního a rychlostního pole v blízkosti zdroje úniku o tlaku 10 až 100 MPa. Vysokotlaký nerozšířený vodíkový proud má vysoké Machovo číslo (poměr rychlosti pohybu tělesa prostředím k rychlosti šíření zvuku v tom samém prostředí) a kvůli tomu je numerický výpočet velmi nestabilní. [14], [63]



Obrázek 5: Výstup virtuální trysky při úniku. [14], upraveno

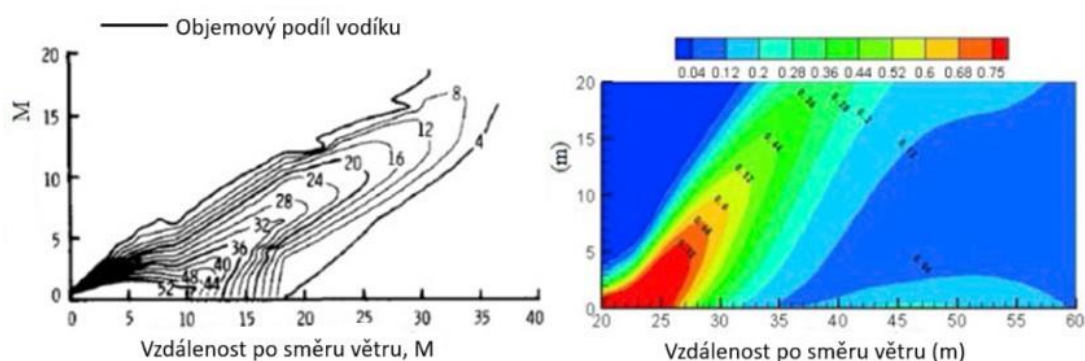
Při simulaci úniku vodíku ze zásobníků vozidel s vodíkovými palivovými články při různých rychlostech větru se zjistilo, že koncentrace vodíku uvnitř vozidla je výrazně ovlivněna rychlostí větru. Bez větru a překážek patří únik vodíku do okolního prostoru do kategorie volných proudů. Obecně je výstupní rychlost úniku vodíku vyšší, takže se jedná o turbulentní proud. [14]

Hlavní náplní výzkumu vysokotlakých plynových trysek je měření parametrů proudění plynu jako je koncentrace, rychlost a teplota trysky, vizualizace struktur rázových vln, vznícení a výbuch způsobený únikem vodíku. Stávající modely jsou dobře použitelné pro úniky v otevřeném prostoru. Po úniku vysokotlakého vodíku jsou doporučené bezpečné vzdálenosti v polouzavřeném prostoru 11,9 m a ve zcela otevřeném prostoru 2,25 m. [14], [63]

3.1.2 KAPALNÝ VODÍK

Proces difúze kapalného vodíku po jeho přetečení ze zdroje úniku zahrnuje především dvě části: proces tvorby bazény kapalného vodíku na zemi a proces expanze a ředění nízkoteplotních vodíkových mraků v atmosféře. Byly provedeny rozsáhlé simulace zaplavení kapalným vodíkem v otevřeném prostoru a výsledky ukázaly, že teplota vodíkového mraku se po zaplavení kapalným vodíkem rychle zvyšuje, hustota plynného mraku je menší než hustota atmosféry na začátku zaplavení a v procesu difúze vodíkového mraku hrají důležitou roli jak turbulence vnesené zaplavením, tak atmosférické turbulence. [14], [64]

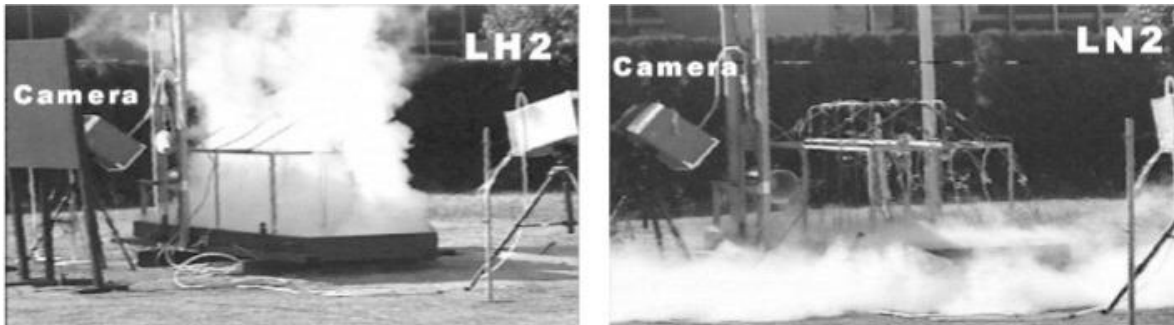
Při studiích se zjistilo, že zvyšující se rychlost větru snižuje výšku plynového mraku, zvyšující se teplota větru brzdí difúzi, teplo vnášené ze země ovlivňuje následné charakteristiky chování mraku a rozsah difúze mraku se snižuje s rostoucí teplotou země. Výsledky simulace koncentrace difúze jsou porovnány s experimentálními výsledky na obr. 6. Vliv drsnosti terénu na zaplavení kapalným vodíkem nemá téměř žádný vliv na difúzi. [14]



Obrázek 6: Srovnání simulovaných a experimentálních výsledků při difúzních koncentracích, závislost nadmořské výšky na vzdálenosti po směru větru [14], upraveno

Zvýšení rychlosti větru podporuje difúzi vzdušných mraků, zatímco zvýšení atmosférického tlaku brzdí difúzi plynových mraků, průběh difúze plynových mraků se liší v různých ročních obdobích a vliv na trajektorii šíření vodíkového oblaku má i tvar a umístění různých budov a zařízení. [14], [64]

Experimenty s kapalným vodíkem se prováděly již v 50. letech 20. století ve Spojených státech. NASA provedla na experimentální základně Whitesands rozsáhlý experiment s přeléváním kapalného vodíku, jehož cílem bylo studovat vznik a difúzi oblaků hořlavých par, včetně difúze kapalně fáze a rychlosti vzniku vodíkových oblaků či rychlosti stoupání vodíkových oblaků. Také se porovnávaly zákonitosti difúze a vypařování kapalného vodíku s kapalným dusíkem – var kapalného vodíku je prudší a nepravidelnější. Z hlediska tvorby plynného oblaku a difúze se dusík šíří po povrchu nádoby, zatímco kapalný vodík se rychle vypařuje a expanduje směrem vzhůru, jak lze vidět na obr. 7. [14]

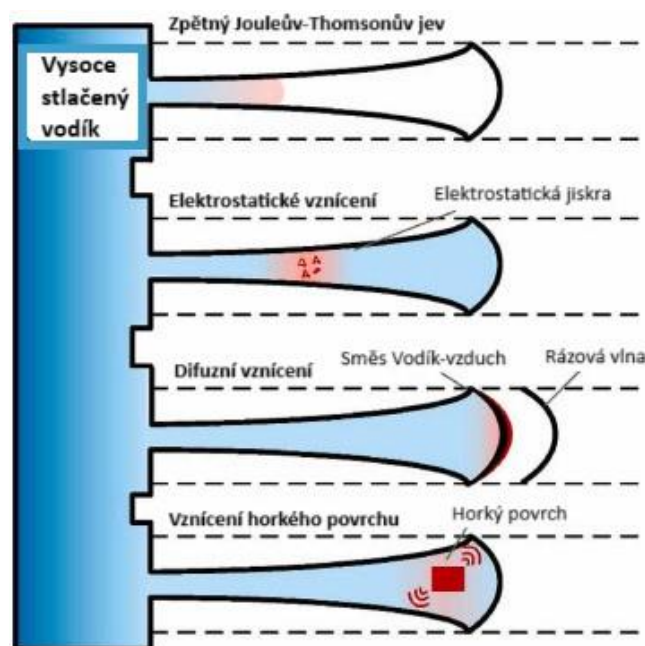


Obrázek 7: Charakteristiky chování kapalného vodíku (LH2) a kapalného dusíku (LN2) po přetečení ze skladovací nádrže [14]

3.2 SAMOVOLNÉ HOŘENÍ PŘI ÚNIKU VYSOKOTLAKÉHO VODÍKU

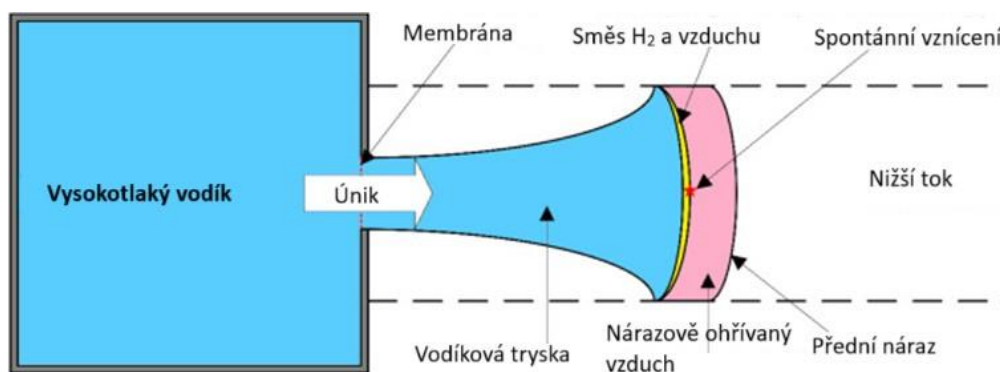
3.2.1 MECHANISMUS INICIACE ÚNIKOVÉHO SPALOVÁNÍ

Přibližně v 70 % případech nehod se vznícením vodíku nelze najít jeho zdroj – dochází ke spontánnímu vznícení vodíku. V minulosti bylo navrženo pět možných mechanismů samovznícení: zpětný Jouleův-Thomsonův jev, elektrostatické generování náboje, difúzní vznícení, náhlá adiabatická komprese a vznícení horkým povrchem. [14]



Obrázek 8: Schéma principů samovznícení vodíku. [22], upraveno

1. **Zpětný Jouleův-Thomsonův jev:** Při tomto jevu vede zvýšení teploty vodíku ke snížení jeho zápalné energie a ke snížení spouštěcích podmínek pro elektrostatische vznícení či adiabatické vznícení. Když vysokotlaký vodík difunduje do atmosféry za podmínek pokojové teploty, podléhá zpětnému Jouleovu-Thomsonovu jevu, a jeho teplota se zvyšuje. Vysokotlaký vodík se uvolňuje za počátečních podmínek o tlaku 50 MPa a 9 °C a teplota se zvýší pouze o 9-18 K (teplota samovznícení vodíku je 585 °C). To naznačuje, že velikost nárůstu teploty vodíku způsobená tímto jevem je nízká a nestačí k vyvolání samovznícení vodíku. [14], [22]
2. **Generování elektrostatische náboje:** Vzhledem k velmi nízké minimální zápalné energii vodíku postačují i slabé zdroje vznícení (jako jsou jiskry z elektrických zařízení, elektrostatische jiskry a jiskry způsobené třením) k tomu, aby způsobily vznícení hořlavých směsí vodíku a vzduchu. Tři hlavní typy elektrostatische výbojů jsou jiskrový výboj, třecí výboj a koronový výboj. Čistý vodík obvykle nemá statickou elektřinu, takže při vysokotlakých únicích nezpůsobí elektrostatische vznícení. Při skutečné výrobě však může dojít ke vznícení, protože plynný vodík může nést nabitě částice nečistot, které mají při nadzvukovém proudění dostatečnou kinetickou energii (nárazem nebo třením vzniká statická elektřina). Rozpadem kapiček a bublinek mohou také vznikat elektrostatische náboje, a i tyto náboje jsou dostatečné k zapálení plynného vodíku. [14], [65]
3. **Difuzní vznícení:** Když vysokotlaký vodík prorazí membránu a uvolní se do trubice, vznikne rázová vlna ještě dříve, než se vodíkový proud stihne plně rozpínat, a vzduch před ním se rázovou vlnou ohřeje na vyšší úroveň. Samovolné vznícení se může spustit, pokud teplota směsi vodíku a vzduchu překročí kritickou teplotu samovznícení (schéma difuzního vznícení je znázorněno na obr. 9). Experimentální studie a počítačové simulace se shodují, že tento mechanismus s největší pravděpodobností způsobuje samovznícení při úniku vysokotlakého vodíku. [14]



Obrázek 9: Schéma difuzního vznícení [14], upraveno

4. **Náhlá adiabatická komprese:** Pokud je ideální plyn stlačován adiabaticky – tlak se zvyšuje v procesu izentropické komprese, je adiabatická rovnice uvedena ve vzorci (1): [14], [66]

$$p \cdot V^\gamma = k \quad (1)$$

Rovnice ideálního stavu plynu je uvedena ve vzorci (2):

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Kombinací vzorců (1), (2) získáme rovnici (3):

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad (3)$$

kde p je tlak, n je počet molů plynu, R je molární plynová konstanta, k je konstanta, γ je adiabatický index plynu, T_1 a V_1 jsou teplota a objem stavu 1, T_2 a V_2 jsou teplota a objem stavu 2. [14]

Podle vzorce (3) je kompresní poměr potřebný k přechodu z teploty 300 K na 1050 K 80,2. Při vysokotlakém úniku vodíku působí současně i jiné mechanismy vznícení než mechanismus okamžitého vznícení při adiabatické kompresi. Experimenty prokázaly, že u adiabaticky stlačených směsí vodíku, kyslíku a hélia, které byly při atmosférickém tlaku 300 K vyzdviženy na teplotu 1050 K s kompresními poměry mezi 35 a 70, došlo k samovolnému vznícení. [14], [66]

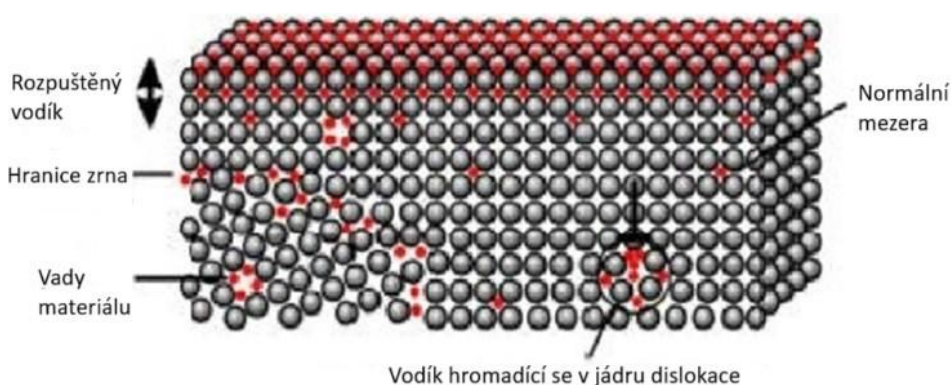
- 5. Vznícení horkým povrchem:** Minimální teplota vznícení souvisí s objemem a plochou povrchu, přičemž čím menší je plocha povrchu, tím vyšší je teplota samovznícení. Kromě toho vznícení souvisí také s koncentrací směsi, teplotou okolí, materiálem, či tvarem horkého povrchu. Tento mechanismus je spíše teoretický, protože vysokotlaký vodík obvykle uniká přímo do atmosféry a s horkými povrchy se téměř nesesetká, takže není dostatečný pro iniciaci samovznícení unikajícího vodíku. [14]

Lze shrnout, že samovznícení při úniku vysokotlakého vodíku není vyvoláno žádným konkrétním mechanismem. Pravděpodobnější je samovznícení vyvoláno společným působením více mechanismů. [14], [66]

3.3 POŠKOZENÍ MATERIÁLŮ VODÍKEM

Ve vodíkovém potrubí a ocelových zásobnících jsou molekuly vodíku náchylné k reakci s kovy, což může způsobit poruchu potrubí nebo zásobníku. Tři hlavní typy poruch způsobených vodíkem jsou vodíková křehkost (HE), vodíkem indukované praskání (HIC) a vysokoteplotní útok vodíku (HTHA). Z nichž je vodíková křehkost nejrizikovější a může vyvolat nejzávažnější škody. [14]

1. **Vodíková křehkost (HE):** Nejčastější případ poškození potrubí a skladovacích nádob. Je to proces, při kterém vodík tvoří s kovovým potrubím pevné roztoky, což oslabuje vazebnou sílu hranic kovových zrn a vytváří koncentrátoři napětí, které vedou ke křehkému lomu nebo mikroskopickému praskání či důlkové trhlině. Proces praskání potrubí vyvolaného vodíkem zahrnuje šest kroků: vznik atomu vodíku, adsorpci atomu vodíku na vnějším povrchu oceli potrubí, absorpci atomu vodíku na vnitřním povrchu oceli potrubí, difúzi atomu vodíku do mřížky oceli, lokální agregaci atomu vodíku a iniciaci praskání vyvolaného vodíkem. Výskyt vodíkové křehkosti může ovlivnit tlak vodíku, čistota, okolní teplota, úroveň pevnosti potrubí, rychlost deformace a mikrostruktura. Obecně platí, že riziko vodíkové křehkosti se zvyšuje s rostoucím tlakem a životností potrubí. [14], [22]



Obrázek 10: Schéma defektů materiálu a míst akumulace vodíku [14], upraveno

2. **Vodíkem indukované praskání (HIC):** Běžná forma poškození mokřým sulfanem (sirovodíkem) způsobená iniciací a šířením malých trhlin, které jsou obvykle orientované rovnoběžně s povrchem oceli. K HIC obvykle dochází v důsledku účinků vodíku difundujícího do oceli v mokřém prostředí rafinérských procesů. Může se vyskytovat při relativně nízkých teplotách, převážně v důsledku atomárního vodíku z mokřích korozních reakcí sulfanu, který se shromažďuje na vměstcích nebo nečistotách v oceli. Obvykle je kvůli sulfanu doprovázeno korozním praskáním pod napětím, které způsobuje poruchu potrubí. V důsledku společného působení vodíku a napětí v potrubí dochází k praskání oceli, což následně vede k závažnému vodíkovému křehnutí. [14], [37]
3. **Vysokoteplotní útok vodíku (HTHA):** K tomuto mechanismu dochází, když absorbovaný vodík reaguje se slitinou nebo nečistotami v mikrostruktuře při teplotě vyšší než 200 °C za vzniku nerozpustných, obvykle plynných produktů. Vodík rozpuštěný v kovu je mobilní a průběžně se hromadí na hranicích zrn nebo jiných pórech s defektem mikrostruktury. V pórech se rozpuštěné atomy vodíku rekombinují za vzniku molekul vodíku, které reagují s uhlíkem za vzniku metanu. Ten působí vnitřním tlakem a vytváří v kovu boule až trhliny nebo podlouhlé otvory. HTHA je jev závislý na čase, teplotě a tlaku – čím déle je zařízení vystaveno teplotám a parciálním

tlakům vodíku nad hranicí odolnosti, tím více se poškození oceli hromadí; a čím více teplota stoupá nad hranici odolnosti oceli, tím rychleji k poškození dochází. Při přepravě vodíku v potrubí není teplota pro tento typ mechanismu dostatečná. [14], [67]

Pro vodíkové potrubí se upřednostňují trubky z nekvalitní oceli. Před zavedením vodíkových směsí do plynovodů je třeba plně prokázat přizpůsobivost plynovodů. Podle mechanických vlastností a zákona o zhoršování vlastností materiálů potrubí při různých poměrech vodíkových směsí by měly být zkoumány ukazatele jako třída oceli, tlak, chemické složení či houževnatost. [14]

3.4 NÁVRHY NA DALŠÍ VÝZKUM BEZPEČNOSTI

Přestože několik aspektů vodíkové bezpečnosti bylo zmíněno výše, stále existuje několik problémů, které shrnují následující návrhy. [14]

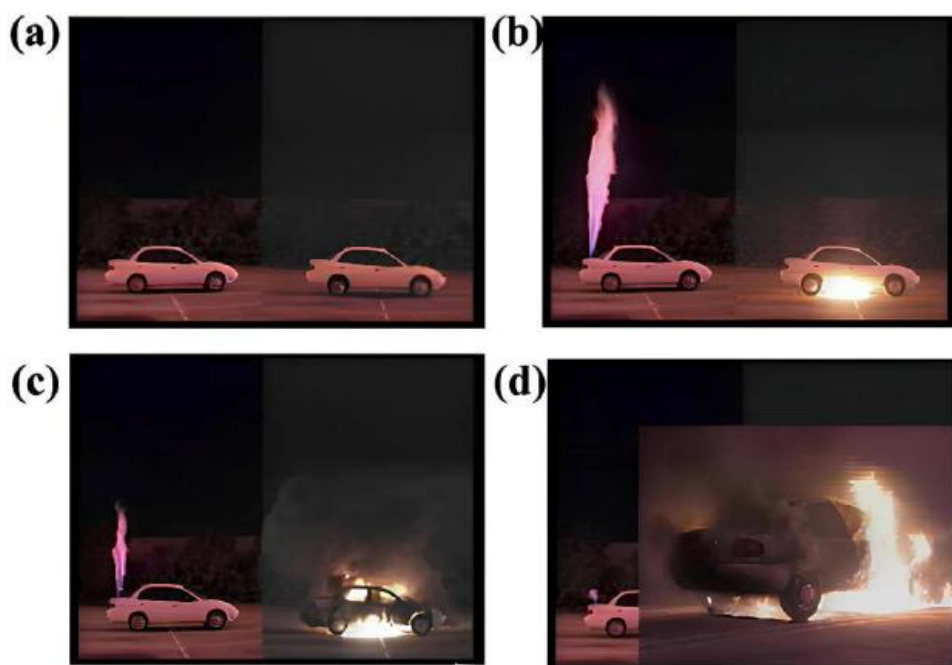
1. V laboratoři je obtížné se přiblížit průmyslovému měřítku vzhledem k omezení bezpečnosti a nákladů na experimenty s únikem vodíku. Numerická simulace úniku a difúze musí být rovněž dále optimalizována z hlediska mřížky, modelu turbulence a podmínek reakční kinetiky a měla by být stanovena univerzální teorie pro různé scénáře úniku a difúze vodíku za vysokého tlaku. [14]
2. Studie difúze vodíkového mraku po zaplavení kapalným vodíkem byla značně zjednodušena z důvodu náročných experimentálních podmínek, takže tyto modely jsou stále nedostatečné a je nutné je dále studovat. [14]
3. Výzkum mechanismu samovznícení při vysokotlakém úniku vodíku je většinou založen na samovznícení v rázové trubici. Chybí podpora samovznícení při spojení jiných mechanismů a nebylo dobře zkoumáno únikové samovznícení v otevřeném prostoru. [14]
4. V současné době se většina studií provádí na čistém vodíku, směsi vodíku a zemního plynu nebo dusíku, přičemž se málo zohledňují společně působící účinky složek, jako jsou sulfidy, oxid uhelnatý a oxid uhličitý, které mohou existovat při skutečné výrobě. Předpovědi poškození a preventivní opatření pro poškození vodíkem budou užitečné při procesu výstavby vodíkových potrubí. [14]
5. Důležitým tématem dalšího výzkumu je proces vodíkových proudů a růst trhlin, ke kterému dochází po poškození materiálu, vznik místa úniku působením napětí a vliv vysokotlakého vodíkového proudu na materiál. [14]

3.5 BEZPEČNOST VODÍKOVÝCH DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ

3.5.1 VOZIDLA S PALIVOVÝMI ČLÁNKY

Jako čistý, tichý a účinný generátor energie je palivový článek považován za jednu z alternativních technologií ke spalovacím motorům. Všeobecně se uznává, že vodíkové palivové články budou v budoucnu hlavním pohonem pro dopravu. Vzhledem k zapojení vodíku a složitosti systémů palivových článků je však třeba řešit jejich bezpečnost. [22]

V současné době většina vozidel s palivovými články používá metodu vysokotlakého skladování plynného vodíku. Aby vůz dosáhl dojezdu 400 km, musí být možné přepravovat dostatek vysokotlakého plynu a zásobník musí být vyroben z kompozitního materiálu, který vydrží tlak až 70 MPa. Úkolem systému zásobování vodíkem je distribuovat vodík z vysokotlakého zásobníku vodíku na palubě do zásobníku palivových článků prostřednictvím redukčního ventilu a potrubí. [22]



Obrázek 11: Vývoj požáru na vozidle s palivovým článkem (vlevo) a na vozidle s benzínovým motorem (vpravo) v případě úniku paliva v čase a) 0 s, b) 30 s, c) 60 s a d) 90 s [22]

Benzínové vozidlo na obr. 11 zcela shořelo a zůstal z něj jen rám, zatímco vozidlo s palivovými články bylo po požáru mírně poškozeno – vozidlo s palivovými články je v případě úniku paliva bezpečnější než tradiční benzínové vozidlo. Jsou ale nutná určitá bezpečnostní opatření pro vodíkovou nádrž – měla by mít dostatečnou konstrukční pevnost a měla by být pevně uchycena. Kromě vodíkové nádrže jsou vysokotlaká potrubí a ventily upevněny ocelovými pásy, aby se zabránilo posunu polohy při nárazu. Dalšími klíčovými prvky pro zvýšení bezpečnosti systémů poháněných vodíkovým palivem jsou senzory pro detekci úniku vodíku ve vozidle. Ty se používají v hnacím ústrojí palivových článků (anodový snímač vodíku, výfukový snímač vodíku a snímač vodíku ve ventilačním potrubí) a

jako bezpečnostní snímač ve vozidle (snímače vodíku v kabině pro cestující a v systému podvozku a nádrží vozidla). [22], [68]

3.5.2 ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA

Zájem o železniční dopravu na vodíkový pohon celosvětově roste a některá taková železniční vozidla jsou již v současné době v provozu nebo jsou vyvíjena – více než 10 zemí plánuje zavést železniční vozidla na vodíkový pohon a očekává se, že první vrchol dodávek těchto vozů nastane v roce 2025. Německo bylo v roce 2022 první zemí na světě, která uvedla do komerčního provozu vlaky poháněné vodíkem (viz obr. 12). Tyto vozidla jsou spojena s provozem vodíkového tankování, skladováním vodíku a reakcí vodíku, kde také hrozí nehody jako je únik vodíku a výbuch. V současné době neexistují žádné platné předpisy a normy pro skladování vodíku ve vozidlech železniční dopravy, ale lze využívat kombinaci stávajících předpisů v jiných aplikacích vodíku pro železnici. [19]



Obrázek 12: Německá vlaková souprava na vodíkový pohon [20]

Určité nebezpečí hrozí během procesu doplňování paliva – rychlé plnění vodíku může vést k nárůstu teploty ve vodíkové zásobní nádrži, díky čemuž může dojít k selhání nádrže při nadměrném tlaku, což vyvolá únik vodíku. Nádrže na skladování vodíku jsou také náchylné k nehodám způsobeným lidskou manipulací, či problémy s materiálem (vodíková křehkost). [19]

Většina systémů skladování vodíku v železničních vozidlech je instalována na střeše – pokud dojde k úniku vodíkového palivového článku do volného prostoru, uvolněný plynný vodík se rozptýlí směrem vzhůru a nemůže se hromadit. Problémem jsou tunely, kde se vodík nad vlakem může snadno nahromadit a vzhledem k jeho povaze je zde možnost, že způsobí hoření a vznikne požár nebo výbuch. [19]

Jako prevence nehod se nasazují systémy pro sledování stavu palivových článků v reálném čase, které mohou při detekování vyšší teploty nebo zdroje otevřeného plamene ochladit a uhasit oheň a současně vyvolat poplach. Další opatření může být použití technologie

zpomalující hoření, použití částečně nehořlavých materiálů na povrchu vlaku nebo přísná kontrola velikosti přirozené rychlosti větru v tunelu. [19]

4 BEZPEČNOSTNÍ OPATŘENÍ

Stejně jako u ostatních paliv se bezpečnostní postupy pro vodík soustředí na zabránění kombinace tří hlavních faktorů hoření – zdroje vznícení (jiskra nebo teplo), oksylichovadla (vzduch) a paliva. Díky důkladné znalosti vlastností paliva se dají navrhnout palivové systémy s vhodnými technickými kontrolami a stanovit pokyny umožňující bezpečné zacházení s palivem a jeho používáním. Vzhledem k řadě vlastností vodíku je manipulace s ním a jeho používání bezpečnější než u dnes běžně používaných paliv. Vodík například není toxický, je mnohem lehčí než vzduch, takže se při úniku se rychle rozptýlí. [24], [25]

Některé vlastnosti vodíku vyžadují dodatečné technické kontroly, které umožní jeho bezpečné používání. Konkrétně má vodík široký rozsah hořlavých koncentrací ve vzduchu a nižší zápalnou energii než benzin nebo zemní plyn, což znamená, že se může snadněji vznítit. Proto jsou důležitými prvky při navrhování bezpečných vodíkových systémů odpovídající ventilace a detekce úniků. Protože vodík hoří téměř neviditelným plamenem, jsou zapotřebí speciální detektory plamene. [25]

4.1 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY

Bezpečnostní prvky jsou důležitá oblast, kterou se při přepravě vodíku musí zabývat. Níže je přehled bezpečnostních opatření používaných v různých fázích přepravy.

Skladování

- **Nádrže s vysokou odolností:** Nádrže na skladování vodíku jsou vyrobeny z několika vrstev a pevných materiálů, aby odolaly vysokému tlaku až 100 MPa a také korozi. Tyto vrstvy mohou zahrnovat kovovou vložku, kompozitní materiály a ochranný plášť. Vnitřní vložka z plastu nebo kovu chrání nádrž před nízkými teplotami, zatímco vnější vrstva z uhlíkových vláken pomáhá udržovat stabilní teplotu uvnitř nádrže. Nádrže na vodík z kompozitních materiálů běžně fungují v teplotním rozsahu od -250 °C do 80 °C. [9], [25]
- **Přetlaková zařízení:** Nádrže jsou vybaveny přetlakovými ventily (PRV), které v případě přehřátí nebo přeplnění automaticky vypouštějí nadměrný tlak a zabráňují tak prasknutí. Jakmile jsou obnoveny normální podmínky pracovního tlaku, pojistný ventil se uzavře a dalšímu odtoku média je zabráněno. Parametry se u každého zařízení liší, například vodíkový pojistný ventil řady 492 společnosti Goetze KG Armaturen má nastavitelný rozsah tlaku od 5 do 150 MPa a provozní teploty od -60 °C do +200 °C. Vzhledem k vztlakové povaze vodíku by mělo být upřednostňováno odvodušňování vodíku s orientací nahoru, protože se snadno rozptýlí a zředí za předpokladu, že k úniku dojde v otevřeném prostředí. Klíčovým prvkem bezpečnosti je velikost zařízení pro uvolňování tlaku. Mělo by být navrženo tak, aby omezilo tvorbu hořlavého oblaku, zejména v uzavřených prostorech. [32], [36], [41]



Obrázek 13: Vodíkový přetlakový ventil – řada 492, Goetze KG Armaturen [41]

- Bezpečnostní disky: U některých nádrží se jako poslední bezpečnostní opatření používají lámavé disky. Tyto disky prasknou při předem stanoveném tlaku a v případě selhání PRV bezpečně a kontrolovaně uvolňují vodík. Musí zvládnout pracovat při velmi nízkých teplotách a ve vakuu, musí být odolné proti křehnutí, zabránit vyvařování a být těsné (nepropustné). [32]

Příklady dalších důležitých ventilů jakožto bezpečnostních prvků:

- Uzavírací ventily: Tyto ventily izolují části potrubního systému v případě úniku nebo jiného problému. Funguje podobně jako elektrický spínač, který průtok buď zcela zastaví, nebo plně propustí. Využívají se u skladování a přepravy vodíku. [34], [44]



Obrázek 14: Vodíkový uzavírací ventil [44]

- Ventily pro nadměrný průtok: Z hlediska funkčnosti podobný jehlovému ventilu, což znamená, že jej lze použít k přesné regulaci průtoku. V uzavřeném stavu zabráňuje průtoku a při postupném otevírání ventilu se průtok rovněž zvyšuje. Hlavní rozdíl mezi jehlovým ventilem a ventilem pro regulaci průtoku spočívá v tom, že v případě

jehlového ventilu je průtok řízen v obou směrech, zatímco ventil pro regulaci průtoku řídí průtok pouze v jednom směru (umožňuje volný průtok v opačném směru). Využívají se u testovacích systémů vodíkových palivových článků, systémů pro tankování, skladování a výrobu vodíku. [34], [44]

- Vodíkové zpětné ventily: Jednosměrné ventily, které umožňují průtok kapaliny pouze jedním směrem a zabraňují tak zpětnému toku kapaliny v systému. Aby se zpětný ventil otevřel a umožnil průtok kapaliny, musí být mezi vstupem a výstupem minimální tlak ("trhací tlak"). Pokud tlak proti proudu klesne pod trhací tlak nebo pokud se objeví protitlak, dojde k uzavření zpětného ventilu. Využívá se u plnicích stanic, palivových článků, či u řízení a vypínání procesních systémů. [44]

Potrubí

- Vysokopevnostní ocel: Vodíkové potrubí je vyrobeno z vysokopevnostní oceli (vysoká pevnost v tahu, odolnost proti korozi a nízkým teplotám, tvárnost), která je navržena tak, aby zvládla tlak při přepravě plynného vodíku. Jedná se například o oceli X70 (pevnost v tahu 570 MPa), X80 (pevnost v tahu 620 MPa), 316L (nerezová ocel s korozní odolností). [33], [42]
- Systémy detekce úniku: Sofistikované systémy detekce úniků, které dokáží rychle identifikovat a izolovat případné úniky. To umožňuje rychlou reakci, která zabrání případným nehodám. Příkladem měřicího zařízení může být mikroprocesorový detektor plynu s výstupním signálem 4-20 mA, alarmovým a poruchovým relé pro monitorování okolního vzduchu za účelem detekce toxických plynů a koncentrace kyslíku pomocí elektrochemického sensorového prvku. Katalytický sensorový prvek slouží k detekci hořlavých par a plynů a infračervený sensorový prvek k detekci oxidu uhličitého. Dále existují také akustické senzory pro detekci ultrazvukových vln a optické senzory pro detekci změn optických vlastností potrubí jako je změna indexu lomu světla z důvodu úniku vodíku. [33], [43]

Čerpací stanice

- Dávkovací systémy: Vodíkové čerpací stanice používají výdejní systémy navržené tak, aby minimalizovaly riziko úniku při tankování. Tyto systémy často obsahují odpojovací spojky, které se automaticky odpojí v případě nadměrného tlaku nebo napětí. Během tankování by mělo být vozidlo uzemněno uzemňovacím kabelem, aby se zabránilo jiskření způsobenému statickou elektřinou. [35], [46]
- Ventilační systémy: Aby se zabránilo hromadění vodíku ve stanici, používají se výkonné ventilační systémy. Tyto systémy nepřetržitě odvádějí veškerý plynný vodík, který může unikat z vozidel během tankování, a zajišťují tak bezpečné prostředí pro personál. Ventilace v garážích by měla dosahovat alespoň 10 ACH (Air Changes per Hour – výměna vzduchu za hodinu). [35], [36]

- Bezpečnostní kontroly: Čerpací stanice jsou vybaveny automatickými bezpečnostními kontrolními systémy, které mohou zastavit celý proces tankování, pokud jsou zjištěny jakékoli abnormální podmínky, jako jsou úniky nebo kolísání tlaku. [35]

Nákladní automobily a přívěsy

Tato vozidla musí během přepravy dodržovat přísné bezpečnostní protokoly, včetně určených tras, školení řidičů o výbušných vlastnostech vodíku a správných postupů údržby. [25]

Důležité kroky pro zvýšení bezpečnosti jsou: omezit maximální velikost jednotlivých trubkových zásobníků; omezit maximální tlak v přívěsech s trubkami na nejvýše 25 MPa; zajistit obal vodíkové lahve tak, že zůstane za nepříznivých podmínek upevněn na přepravním přívěsu; označit vodíková vozidla výstražnými značkami k upozornění záchranných složek. [36]

V případě nehody vodíkových vozidel by se první zasahující měli k vozidlu přiblížit až dvě minuty po aktivaci přetlakového ventilu (syčivý zvuk), s ohledem na bezpečnost veřejnosti se doporučuje držet odstup v okruhu 100 metrů, pokud není slyšet syčivý zvuk – jakmile je, lze obvod zmenšit na 10 metrů. [36]

Nehody v silniční vodíkové dopravě se většinou týkají buď úniku vodíku z tlakové nádoby v důsledku poruchy zařízení nebo nedostatečné údržby součástí, prasknutí nádrže v důsledku přetlakování nebo úniku přes přetlakové zařízení (PRD) způsobeného vnějšími faktory (požár nebo náraz). Malé úniky mohou být způsobeny lokální korozí. Katastrofické selhání ochranného obalu může být také způsobeno konstrukčními vadami, zejména špatnou kvalitou svarů. [36]

Většina hlášených nehod spojených s dopravou vodíku a vozidly na vodíkový pohon byla způsobena dopravními nehodami. Ve 37 % případů nedošlo k žádnému úniku, ve 31 % došlo k nezapařenému úniku a ve 32 % k požáru nebo výbuchu. [36]

4.2 PŘEDPISY A NORMATIVY

Bezpečnostní normy jsou základem pro zavádění a rozvoj vodíkového průmyslu. Existuje mnoho předpisů a norem pro vozidla s vodíkovými palivovými články, stacionární i přenosné aplikace palivových článků. Kromě předpisů a norem pro výrobky vodíkové technologie existují předpisy a normy pro bezpečnost vodíku, pro bezpečné zacházení s vodíkem a pro skladování vodíku. Normy ISO jsou zaměřeny na obecné bezpečnostní normy a bezpečnostní normy výroby vodíku. Normy IEC jsou zaměřeny na bezpečnostní normy palivových článků a jejich aplikací. Níže jsou zmíněny některé předpisy a normy. [26], [27]

4.2.1 ISO NORMY

- **ISO/TR 15916:2015** – Základní úvahy o bezpečnosti vodíkových systémů. [27]
Obsahuje pokyny pro používání vodíku v plynné a kapalně formě a pro jeho

skladování i v jiných formách (např. hydridy). Pojmenovává základní bezpečnostní problémy, nebezpečí a rizika a popisuje vlastnosti vodíku, které jsou důležité pro bezpečnost. Podrobné bezpečnostní požadavky spojené s konkrétními aplikacemi vodíku jsou zpracovány v samostatných normách. [28]

- **ISO 16111:2018** – Přepravitelná zařízení pro skladování plynu – Vodík absorbovaný v reverzibilním hydridu kovu. [26]
Definuje požadavky na materiál, konstrukci, provedení a zkoušení přepravitelných systémů pro skladování plynného vodíku (označují se „soustavy s hydridem kovu“), které využívají pláště o vnitřním objemu nejvýše 150 l a jejichž maximální vyvinutý tlak nepřesahuje 25 MPa. [28]
- **ISO 19880-1:2020** – Plynný vodík – čerpací stanice – část 1: Obecné požadavky. [26]
Definuje minimální požadavky na konstrukci, instalaci, uvedení do provozu, provoz, kontrolu a údržbu, bezpečnost a případně výkonnost veřejných a neveřejných čerpacích stanic, které využívají plynný vodík pro lehká silniční vozidla (např. elektrická vozidla s palivovými články). [28]
- **ISO 19881:2018** – Plynný vodík – Zásobníky paliva pro pozemní vozidla. [26]
Obsahuje požadavky na materiál, konstrukci, výrobu, značení a zkoušení sériově vyráběných znovuplnitelných zásobníků určených pro skladování stlačeného vodíkového plynu pro provoz pozemních vozidel. Tyto zásobníky jsou trvale připevněny k vozidlu mají kapacitu až 1 000 l vody a mají max. pracovní tlak 70 MPa. Oblast působnosti dokumentu je omezena na palivové zásobníky obsahující vodík třídy A pro pozemní vozidla s palivovými články a se spalovacími motory, dále i pro lehká užitková vozidla, těžká užitková vozidla a průmyslové vozíky. [28]
- **ISO 19882:2018** – Plynný vodík – Tepelně aktivovaná zařízení pro uvolnění tlaku v zásobnících stlačeného vodíku pro vozidla. [26]
Stanovuje minimální požadavky na přetlaková zařízení určená pro použití na zásobnících paliva pro vozidla na vodík. Působnost normy je omezena na tepelně aktivovaná přetlaková zařízení instalovaná na palivových zásobnících používaných s vodíkem třídy A pro pozemní vozidla s palivovými články a vozidla se spalovacími motory, dále i pro lehká užitková vozidla, těžká užitková vozidla a průmyslové vozíky. [28]
- **ISO 13984:1999** – Kapalný vodík – rozhraní palivového systému pozemních vozidel [26]
Specifikuje vlastnosti systémů pro doplňování a výdej kapalného vodíku do pozemních vozidel všech typů s cílem snížit riziko požáru a výbuchu během doplňování paliva, a tím zajistit přiměřenou úroveň ochrany před ztrátami na životech a majetku. Popisuje systém určený k výdeji kapalného vodíku do vozidla, včetně té

části systému, která zpracovává studený plyný vodík pocházející z nádrže vozidla (systému umístěného mezi pozemním vozidlem a zásobníkem). [28]

- **ISO/WD 13985** – Kapalný vodík – Palivové nádrže pozemních vozidel. [26]
Specifikuje požadavky na konstrukci zvonaplntelných palivových nádrží na kapalný vodík používaných v pozemních vozidlech a zkušební metody požadované k zajištění přiměřené úrovně ochrany před ztrátami na životech a majetku v důsledku požáru a výbuchu. Platí pro palivové nádrže určené k trvalému připevnění k pozemním vozidlům. [28]
- **ISO/AWI 17268-3** – Připojovací zařízení pro tankování plyného vodíku do pozemních vozidel – Část 3: Kryostlačený plyný vodík. [26]
Definuje konstrukční, bezpečnostní a provozní charakteristiky konektorů pro tankování kryostlačeného vodíku do pozemních vozidel. Vztahuje se na konektory pro doplňování paliva o max. tlaku 40 MPa. Nachází se stále ve vývoji. [28]
- **ISO/DIS 19887** – Plyný vodík – součásti palivového systému pro vozidla na vodíkové palivo [26]
Nachází se ve fázi vývoje. [28]
- **ISO 23273:2013** – Silniční vozidla na palivové články – Bezpečnostní specifikace – Ochrana před nebezpečím vodíku pro vozidla poháněná stlačeným vodíkem. [27]
Specifikuje základní požadavky na vozidla s palivovými články (palivo musí být stlačený vodík) s ohledem na ochranu osob a životního prostředí uvnitř i vně vozidla před nebezpečím souvisejícím s vodíkem. Nevztahuje se na výrobu, údržbu a opravy. [28]

4.2.2 IEC NORMY

- **IEC 62282-2-100:2020** – Technologie palivových článků – Část 2-100: Moduly palivových článků – Bezpečnost. [27]
Stanovuje bezpečnostní požadavky na konstrukci, provoz a zkoušení modulů palivových článků. Zabývá se podmínkami, které mohou způsobit ohrožení osob a poškození mimo moduly palivových článků. Ochrana proti poškození uvnitř modulů palivových článků zde není řešena. [30]
- **IEC 62282-4-101:2022** – Technologie palivových článků – Část 4-101: Napájecí systémy palivových článků pro elektricky poháněná průmyslová vozidla – Bezpečnost. [27]
Zabývá se bezpečností energetických systémů na palivové články pro pohon jiných než silničních vozidel a pomocných energetických jednotek, také bezpečnostními požadavky na napájecí systémy s palivovými články určené pro použití v elektricky

poháněných průmyslových vozidlech. Týká se systémů napájených palivovými články na plynný vodík a systémy napájení palivovými články na přímý metanol. [30]

- **IEC 62282-5-100:2018** – Technologie palivových článků – Část 5-100: Přenosné napájecí systémy na palivové články – Bezpečnost. [27]
Zahrnuje požadavky na konstrukci, značení a zkoušky přenosných (jsou pohyblivé a nejsou upevněny určitým místě) napájecích systémů na palivové články. Účelem přenosného napájecího systému na palivové články je výroba elektrické energie. Vztahuje se na články typu AC a DC se jmenovitým výstupním napětím nepřesahujícím 600 V AC nebo 850 V DC pro vnitřní a venkovní použití. [30]

5 TECHNOLOGICKÉ INOVACE, NÁKLADY A EMISE

Tato kapitola se zabývá nedávným technologickým pokrokem v oblasti skladování a distribuce vodíku spolu s jejich náklady a souvisejícími emisemi skleníkových plynů. Dále taky metodami doplňování vodíku a identifikací problémů spojených s rychlým doplňováním paliva. [31]

Jednou z klíčových výzev pro celosvětové zavedení vodíku a umožnění globálního vodíkového hospodářství je vývoj bezpečné, levné, účinné a vysoce husté technologie skladování a přepravy vodíku. Skladování vodíku pomocí komprese spotřebuje přibližně 1,7-6,4 kWh/kg H₂ s účinností skladování energie 81-95 % v závislosti na typech kompresorů. Naopak zkvalitňování vodíku vyžaduje zhruba 10-13 kWh/kg H₂, což odpovídá energetické účinnosti 61-70 % v závislosti na velikosti zkvalitňovací jednotky. [31]

5.1 NÁKLADY NA SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Skladování vodíku ve výrobním zařízení nebo na čerpací stanici (mimo vozidlo) a ve vozidlech je pro široký dojezd výzvou. Proto jsou vyrovnané náklady na skladování jedním z rozhodujících faktorů, které je třeba zohlednit při výběru vhodné metody skladování. Obecně lze říci, že náklady na dlouhodobé skladování (1 měsíc) plynného i kapalného vodíku jsou vyšší než ty krátkodobé (1-3 dny), a také že náklady se snižují se zvyšováním skladovací kapacity. Vyrovnané náklady na podzemní skladování jsou nejnižší s ohledem na ostatní technologie a dají se seřadit takto: [31], [69]

podzemní (0,12-0,3 USD/kg H₂) < stlačený vodík (0,15-0,6 USD/kg H₂) < kapalný vodík (1-1,5 USD/kg H₂) < hydrid kovu (0,4-4 USD/kg H₂). [31]

Nižší náklady na podzemní skladování vodíku jsou způsobeny jeho nižšími investičními a provozními náklady. [31], [69]

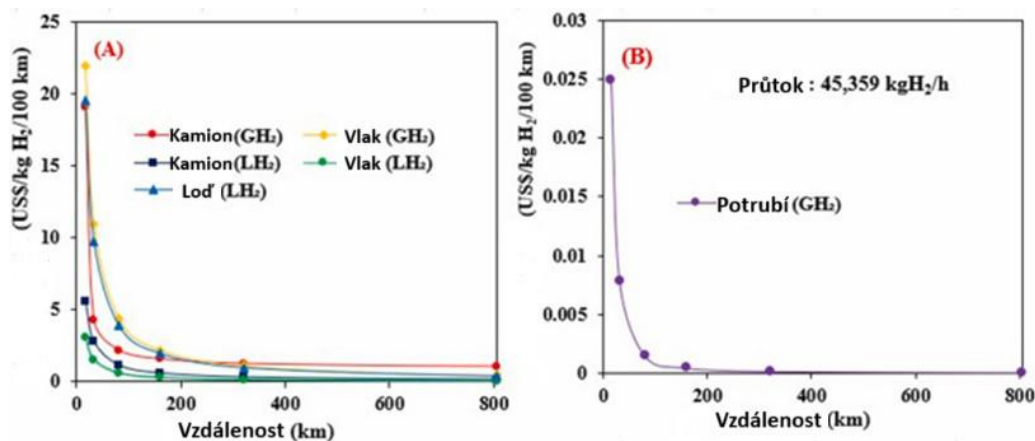
- Náklady na skladování vodíku v malém měřítku na krátkou dobu (denně) ve formě stlačeného plynu činí přibližně 0,19 USD/kg H₂, což se zvyšuje až na 1,9 USD/kg H₂ v případě sezónního skladování velkého objemu. [31]
- Náklady na skladování stlačeného vodíku pro skladovací systém o kapacitě 5000 tun v roce 2020 byly 0,33 USD/kg H₂ a náklady pro denní a čtyřměsíční cyklus skladování byly uvedeny 25,20 USD/kg H₂. [31]
- Náklady na denní skladování vodíku v solných jeskyních činily 0,14 USD/kg H₂. [31]
- Náklady na skladování malých až středních objemů kapalného vodíku na dny až týdny činí přibližně 4,57 USD/kg H₂. Při přepravě nákladními automobily nachází využití spíše pro krátkodobé (např. denní) skladování jako vyrovnávací paměť. [31], [69]

5.2 NÁKLADY NA PŘEPRAVU VODÍKU

Doprava vodíku z výrobního zařízení do čerpací stanice hraje důležitou roli v ekonomické proveditelnosti dopravního systému. Nejekonomičtější způsob přepravy plynného vodíku ve velkém množství je přeprava potrubím (díky nízkým nákladům na údržbu). Ve Spojeném království byly odhadnuty náklady na přepravu vodíku takto: [31], [69]

- Potrubí (plynný vodík) na 0,1-1 USD/kg H₂/100 km. [31]
- Nákladní automobil (kapalný vodík) na 0,3-0,5 USD/kg H₂/100 km. [31]
- Trubkový přívěs (plynný vodík) na 0,5-2 USD/kg H₂/100 km. [31]
- Loď (kapalný vodík) na 1,8-2 USD/kg H₂/100 km. [31]

Nákladní automobil převážející plyn je levnější než železnice na krátkou vzdálenost (do 300 km), ale drahý pro přepravu na dlouhou vzdálenost (nad 300 km). Železniční přeprava kapaliny je pro větší množství vodíku levnější než přeprava nákladními automobily. Přepravní vzdálenost má malý vliv na náklady přepravy plynného vodíku potrubím – výrazně se však snižují z 320,4 USD za kg H₂ na pouhých 0,1 USD za kg H₂ při zvýšení průtoku vodíku z 5 kg H₂/h na 45 359 kg H₂/h. Plynovody tedy mohou být efektivní pro dopravu vodíku na krátké i dlouhé vzdálenosti s vysokým průtokem. Náklady na přepravu (\$/kg H₂/km) plynného i kapalného vodíku prostřednictvím nákladního automobilu, železnice nebo lodi se do určité vzdálenosti prudce snižují podle exponenciální závislosti na vzdálenosti a poté se vzdáleností nevýznamně klesají (obr. 15). [31], [69]



Obrázek 15: Náklady na přepravu vodíku různými technologiemi (GH₂ – plynný vodík, LH₂ – kapalný vodík [31], upraveno

5.3 EMISE SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVY

Skladování a přeprava vodíku po silnici s použitím nafty nebo benzínu jako paliva je spojena se značným množstvím emisí skleníkových plynů. Odhaduje se, že při silniční přepravě 1 kg vodíku vzniká 12,3 g CO₂ na vzdálenost 100 km. Při zohlednění emisí ze skladování byly celkové emise skleníkových plynů odhadnuty na 718 g CO₂/kg H₂ na vzdálenost 100 km.

Analýza pro vzdálenost 100-500 km naznačila, že emise skleníkových plynů se lineárně zvyšují s rostoucí přepravní vzdáleností. Silniční přeprava vodíku vykazovala vyšší emise skleníkových plynů, následovala železniční přeprava a přeprava potrubím pro jakoukoli přepravní vzdálenost (ta se jeví jako nejšetrnější k životnímu prostředí). Skladování a přeprava se mohou podílet 35 % na celkových emisích skleníkových plynů při výrobě vodíku. [31], [70]

- Při podzemním skladování v solné jeskyni a přepravě plynného vodíku potrubím vznikaly emise 50-500 g CO₂ na 100 km a při silniční přepravě 83-665 g CO₂. Vyšší emise skleníkových plynů u silniční dopravy souvisí s vyšší spotřebou energie při stlačování. [31]
- Při skladování kapalného vodíku v nádrži a přepravě po silnici vzniklo 336-3332 g CO₂/kg H₂ na 100 km. Přeprava kapalného vodíku představuje ještě vyšší zátěž pro životní prostředí v důsledku vyšší spotřeby elektrické energie pro zkapalnění vodíku. [31], [70]
- Při skladování v solné jeskyni produkovala potrubní doprava 108 g CO₂/kg H₂, zatímco silniční doprava s použitím trubkového přívěsu 361 g CO₂/kg H₂ na 100 km. Kapalným vodík se skladováním v cisternách je spojen s 255 g CO₂/kg H₂. [31]

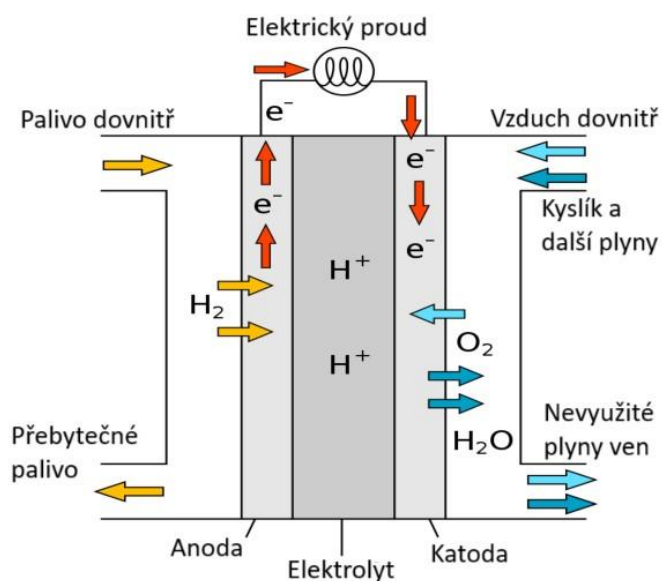
Reakce teploty na budoucí vodíkové hospodářství

Globální průměrné reakce teploty vzduchu na povrchu v letech 2020 až 2050 lze rozdělit na 3 scénáře spotřeby vodíku. Pro scénář č. 1 (vodík bude v roce 2050 celosvětově pokrývat ~20 % konečné poptávky po energii) by se dopady na povrchovou teplotu v roce 2050 způsobené samotným únikem vodíku mohly pohybovat od $0,005 \pm 0,001$ °C pro 1% únik do $0,05 \pm 0,01$ °C pro 10% únik. Pro scénář č. 2 (vodík bude v roce 2050 celosvětově pokrývat ~50 % konečné poptávky po energii) by se dopady při stejných podmínkách mohly pohybovat od $0,01 \pm 0,02$ °C pro 1% únik do $0,12 \pm 0,03$ °C pro 10% únik. V případě scénáře č. 3 (vodík bude v roce 2050 pokrývat celou konečnou poptávku po energii na světě) by se dopady mohly pohybovat v rozmezí od $0,02 \pm 0,04$ °C při 1 % úniku do $0,27 \pm 0,05$ °C při 10 % úniku. I když je scénář č. 3 teoretickým maximem, poskytuje představu o tom, jak významně by mohl únik vodíku přispět ke zvýšení teploty Země, pokud bychom se na vodíkové technologie ve velké míře spoléhali a únikům nevěnovali pozornost. Pokud by byly úniky středně vysoké, může i ekologický vodík zpočátku přinést větší oteplení, než by přineslo použití systému na fosilní paliva. [45]

5.4 VODÍKOVÉ PALIVOVÉ ČLÁNKY – EMISE A NÁKLADY

Základním principem vodíkového palivového článku je přeměna chemické energie uložené ve vodíkovém palivu na elektrickou energii. Tento proces představuje reakci vodíkového paliva s kyslíkem ze vzduchu za vzniku elektrické energie, tepla a vody jako jediného vedlejšího produktu. Srdcem vodíkového palivového článku je membránová elektrodová soustava

(MEA), která se skládá z protonové výměnné membrány (PEM) umístěné mezi dvěma elektrodami – anodou a katodou. Do záporné anody se přivádí vodíkové palivo a do kladné katody se přivádí kyslík. Jakmile je vodíkové palivo přivedeno na anodu, je katalytickým procesem rozštěpeno na protony (H^+) a elektrony (e^-). Protony jsou poté transportovány přes PEM ke katodě, zatímco elektrony jsou nuceny vzít si vnější okruh a generovat elektrický proud. Na katodě protony, elektrony a kyslík ze vzduchu reagují za vzniku vody a uvolňují teplo. Celkovou chemickou reakci ve vodíkovém palivovém článku lze znázornit rovnicí (4). Elektrolyty v článku mohou být polymerní, na bázi pevných oxidů, alkalické, s kyselinou fosforečnou, či s roztaveným uhličitanem. [38], [60]



Obrázek 16: Základní princip vodíkového palivového článku [38], upraveno

Vodíkové palivové články mají vyšší účinnost (60-80 %) a neprodukují emise skleníkových plynů v porovnání se spalováním fosilních paliv, čímž snižují znečištění a zlepšují kvalitu ovzduší. Také neprodukují hluk jako jiné obnovitelné zdroje energie (např. větrné elektrárny) a podobně jako elektromobily jsou i vozidla na vodíkový pohon mnohem tišší než vozidla využívající spalovací motory. [38], [39], [60]

Procesy získávání vodíku elektrolyzou z vody či dalšími ekologickými postupy vyžadují značné množství energie. Tato energie může být vyšší než energie získaná ze samotného vodíku a je také drahá. Avšak spotřeby energie se s postupujícím časem a zlepšováním technologií snižují – průměrná míra poklesu za 10 let činí 10,88 %. Ze srovnání nákladů ve fázi výroby vozidla s vodíkovými palivovými články během 10 let vyplývá, že náklady výrazně klesly, z nichž náklady na výrobu vodíku elektrolyzou z vody mají nejzřetelnější klesající tendenci a podíl poklesu v závislosti na způsobu skladování a přepravy může dosáhnout hodnot kolem 50 %. Získávání vodíku z fosilních paliv je ekonomicky výrazně výhodnější, ale při absenci systému zachycování CO_2 podkopává ekologičnost vodíku. V

palivových článkách se jako katalyzátory obvykle používají drahé kovy (platina a iridium), což znamená vysoké počáteční náklady. Vyšší náklady jsou i na skladování a přepravu a ty je třeba snížit, aby se vodíkové palivové články staly proveditelným zdrojem paliva. [39], [40]

5.5 TANKOVÁNÍ VODÍKU DO VOZIDEL

5.5.1 PROCES DOPLŇOVÁNÍ PALIVA A NÁRŮST TEPLoty BĚHEM TANKOVÁNÍ

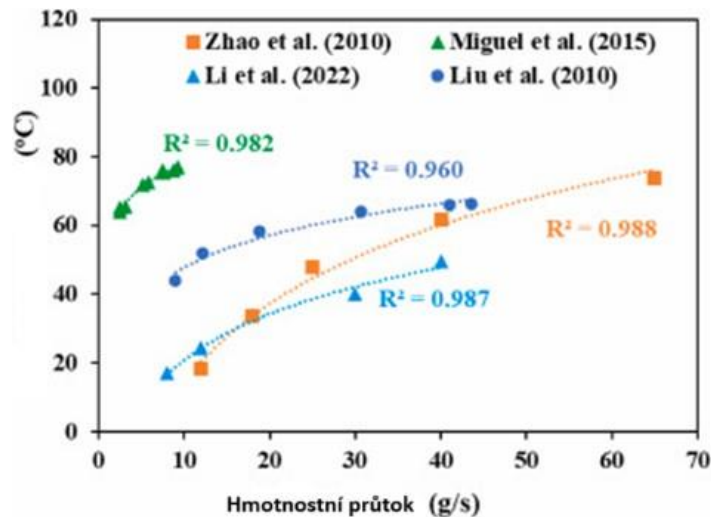
Čerpací stanice s externě dodávaným vodíkem se skládá z kompresoru, zásobní nádrže, výdejního stojanu, elektrického a potrubního ovládání a bezpečnostního monitorovacího systému. Proces doplňování stlačeného vodíku je podobný jako u CNG – vozidlo se plní přepadem z vysokotlaké stacionární skladovací nádrže. Objem a tlak stacionární skladovací nádrže se obvykle udržuje na úrovni nejméně desetinásobku maximálního očekávaného objemu palivové nádrže a 1,2násobku cílového tlaku. Podle norem SAE J2601 se čerpací stanice řídí standardizovaným postupem doplňování paliva. [31]

Aby bylo tankování konkurenceschopné s vozidly se spalovacími motory, výrobci automobilů chtěli udržet dobu tankování vodíku do osobních automobilů maximálně 3 minuty. Společnost automobilových inženýrů (SAE) proto vypracovala protokol SAE J2601 pro doplňování 5-7 kg vodíku během 3-5 min. SAE J2601-2 navrhuje doplnění 20-30 kg vodíku do těžkých nákladních vozidel během 5-10 min. [31]

Při tankování rychlé plnění vysokotlakým vodíkem výrazně zvyšuje teplotu ve vodíkové nádrži v důsledku izoentaltické expanze vysokotlakého plynu ve škrticím systému výdejního stojanu a palivové nádrži. Tento jev změny teploty při škrcení se označuje jako Jouleův-Thomsonův jev. Zvýšení teploty při doplňování paliva způsobuje několik problémů, včetně možného selhání zásobníku vodíku a snížení objemu paliva v palivové nádrži (až o 20 % ve srovnání s vozidlem na CNG) s následným snížením dojezdu vozidla. Experimentálně byl zkoumán vliv několika procesních parametrů (počáteční teploty, počátečního tlaku, rychlosti plnění hmoty a vstupní teploty) na nárůst teploty u lahví typu III a typu IV, ale mohou ji ovlivnit i další faktory (např. typy a rozměry válců). [31], [71]

- **Vliv počátečního tlaku:** Zvýšení počátečního tlaku v palivové nádrži má negativní vliv na nárůst teploty. Nižší nárůst teploty s vysokým počátečním tlakem je s největší pravděpodobností způsoben omezením průtoku při plnění vodíkem. Nárůst teploty během doplňování paliva je vyšší pro adiabatický stav ve srovnání s neadiabatickým stavem. [31], [71]
- **Vliv teploty vstupního plynu a okolní teploty:** Počáteční teplota tlakové láhve, teplota vstupního plynu a okolní teplota ovlivňují maximální nárůst teploty v tlakové láhvi při doplňování vodíku. Nárůst teploty při doplňování vodíku se zvyšuje s nárůstem teploty vstupního plynu i teploty okolí a existuje mezi nimi lineární závislost. Doplnění paliva při vyšší vstupní teplotě snižuje hustotu vodíku, a tím snižuje množství vodíkové hmoty do lahve, což zvyšuje nárůst teploty plynu ve válci. [31]

- **Vliv hmotnostního průtoku:** Doba doplňování paliva se může zkrátit zvýšením průtoku vodíku, to avšak zkrátí dobu přenosu tepla z vodíku do tlakové láhve, což vede ke zvýšení teploty v tlakové láhvi (i nad horní hranici 85 °C). Zvýšení nárůstu teploty se zvýšením hmotnostního průtoku lze pozorovat na obr. 17. Nárůst teploty se zvyšuje nelineárně s nárůstem hmotnostního průtoku, rychlost nárůstu teploty má však klesající tendenci. Údaje z těchto studií vykazovaly logaritmickou korelaci mezi hmotnostním průtokem a maximálním nárůstem teploty. [31], [71]



Obrázek 17: Vliv průtoku vodíku na nárůst teploty podle různých přístupů [31], upraveno

5.5.2 STRATEGIE PRO ŘÍZENÍ TEPLoty

Zvýšení teploty plynu ve válcích při rychlém doplňování paliva může způsobit bezpečnostní problémy a výzvy pro vývoj vozidel. Konečnou teplotu plynu v tlakové láhvi a energetickou náročnost stlačování vodíku lze snížit řízením průtoku vodíku, předchlazením vstupní teploty a doplňováním paliva při vícestupňovém počátečním tlaku. [31], [71]

- **Strategie řízení hmotnostního průtoku:** Je třeba řídit hmotnostní průtok v mezích nárůstu teploty, aby se dosáhlo optimální doby doplňování paliva. V počáteční fázi procesu doplňování paliva lze teplotu plynu udržovat v doporučených mezích díky nízkému hmotnostnímu průtoku a v pozdější fázi procesu doplňování jej lze zvýšit, protože na začátku teplota roste nejrychleji a pak se růst zpomaluje. Řízení průtoku vykazuje přibližně 62% zkrácení doby doplňování paliva a snížení nárůstu teploty plynu ve srovnání s doplňováním konstantním průtokem. [31]
- **Strategie nastavení teploty před chlazením:** Snížení teploty vstupního vodíku pomocí vhodného chlazení je nejúčinnějším a nejreálnějším řešením. Předchlazení může pomoci udržet maximální teplotu plynu pod 85 °C během vysokotlakého rychlého doplňování paliva. Mezi konečnou teplotou a teplotami předchlazování je lineární vztah, kdy se konečná teplota plynu snižuje s poklesem teploty předchlazování v důsledku snížení vnitřní energie vstupního vodíku. Teplota

předchlazení však nesmí být nižší než $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby byly zachovány standardní teplotní hranice dodávky paliva (-40 až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$). Předchlazením při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze dosáhnout cílové doby doplňování paliva přibližně 3 min. [31], [71]

- **Vícestupňová strategie počátečního tlaku:** Tato metoda byla zkoumána za účelem snížení spotřeby energie na stlačení vodíku a objemu plynu při maximálním tlaku, což se v poslední době setkalo se zájmem čerpacích stanic vzhledem k její účinnosti pro více vozidel. Při třístupňovém procesu doplňování paliva se palivová láhev plní vodíkem ze tří stacionárních zásobníků vodíku (nizkotlaký, středotlaký a vysokotlaký) namísto jednoho, což snižuje požadavky na stlačování vodíku. Na začátku při nizkotlakém procesu doplňování prudce narůstá teplota plynu v lahvi kvůli poklesu počátečního tlaku. Když se rozdíl mezi tlakem v aktivním stupni a tlakem v tlakové lahvi sníží na kritickou hodnotu, láhev se naplní středotlakou nebo vysokotlakou zásobní nádrží a nárůst teploty v lahvi se sníží. [31]

5.5.3 NEJNOVĚJŠÍ TECHNOLOGICKÝ POKROK - MOBILNÍ ČERPACÍ STANICE

Současné vysoké náklady na stacionární infrastrukturu pro doplňování paliva jsou považovány za jeden z hlavních problémů při rozšiřování vodíkové dopravy. Mobilní vodíková čerpací stanice nabízí několik výhod oproti stacionární čerpací stanici jako je kompaktní konstrukce, nízké investiční náklady a náklady na instalaci, rychlé nasazení, nenáročná údržba a spolehlivost. [31], [72]

Konstrukce mobilní čerpací stanice se u jednotlivých společností liší. Mezi hlavní součásti mobilní čerpací stanice patří propojené trubky s tlakovou nádobou pro skladování vodíku, pneumatically poháněné posilovače místo kompresoru (ve stacionární stanici) pro zvyšování tlaku vodíku, dusíkový systém pro pohon posilovačů, výdejní systém včetně ovládacího panelu a chladičového zařízení a různé bezpečnostní systémy (regulátor teploty a tlaku, detektor vodíku, bezpečnostní ventily, nouzová ovládací zařízení). Demonstrace ukázala, že přenosné čerpací stanice úspěšně vydaly 15 204 kg vodíku při 20 302 čerpáních bez jakýchkoli závažných incidentů. V Číně byl vypracován standardní bezpečnostní a provozní protokol, který má zajistit bezpečný a rychlý provoz mobilních vodíkových čerpacích stanic s plnicím tlakem mezi 15 MPa a 70 MPa. Pracovní tlak vodíkového skladovacího systému musí být 1,25-1,5násobkem tankovacího tlaku. [31]

5.5.4 PERSPEKTIVY BUDOUCÍHO VÝZKUMU

Výzkumu výroby vodíku pro jeho využití v dopravě byla v posledních letech věnována značná pozornost, což vedlo k technologickému pokroku. Stále však existuje několik výzev, které je třeba řešit: [31], [71]

- Výroba vodíku v malém až středním měřítku na místě s využitím vyspělé výrobní technologie jako je elektrolýza (využití obnovitelné elektrické energie) může zabránit přepravě z místa výroby do čerpací stanice, a tím snížit náklady na vodík pro zákazníka. Některé společnosti vyvinuly jednotky pro výrobu vodíku elektrolýzou

přímo na místě s výrobní kapacitou od 20 kg/den do 1000 kg/den a několik z nich je již ve fázi realizace v Evropě, USA a Kanadě. [31]

- Použití sladké vody pro elektrolýzu může být kontraproduktivní vzhledem k nedostatku vody, proto může být mořská voda novou alternativou, avšak elektrolýza mořské vody je stále v rané fázi vývoje. Mezi hlavní problémy spojené s používáním mořské vody v procesu elektrolýzy patří například koroze a produkce chlóru, kterou lze potlačit pomocí předběžného odsolování, které stojí přibližně 0,7-2,5 USD na m³ vody. [31]
- Jednotlivé strategie řízení nárustu teploty mají každá určitou nevýhodu. Spojení řízení rychlosti doplňování paliva se strategií předchlazení může snížit spotřebu energie a zároveň dosáhnout cílové teploty plynu a doby doplňování paliva. Proto by bylo zajímavé zkoumat výkonnosti spojení dvou nebo více strategií a posoudit jejich ekonomické proveditelnosti. [31], [71]

6 SROVNÁNÍ S ALTERNATIVNÍMI PALIVY CNG A LPG

6.1 STLAČENÝ ZEMNÍ PLYN (CNG)

Zemní plyn se skládá převážně z metanu, ale obsahuje také uhlovodíky (etan a propan) a další plyny (dusík, helium, oxid uhličitý, sloučeniny síry a vodní pára). Je získáván z plynových vrtů buď samostatně nebo společně s ropou, a do domácností a podniků je dodáván potrubím. Díky svým chemickým vlastnostem je stlačen na méně než 1 % svého objemu a ve vozidle se skladuje ve vysokotlakých nádržích o tlaku 20 až 25 MPa. Do CNG se obvykle přidává pachová látka na bázi síry, která usnadňuje detekci úniku. Zemní plyn je lehčí než vzduch, a proto se v případě úniku obvykle rozptýlí, což mu oproti LPG poskytuje významnou bezpečnostní výhodu. Podle statistik je CNG o 30 % účinnější než benzin, přičemž vozidlo je schopno ujet stejnou vzdálenost na 6-7 litrů CNG (avšak prodává se po kg, 1 kg CNG je 1,4 m³ a 1 m³ odpovídá energeticky 1 litru benzínu) jako na 10 litrů benzínu a zároveň snižuje emise oxidu uhelnatého o 90 až 97 %. [48], [57]

6.2 ZKAPALNĚNÝ ROPNÝ PLYN (LPG)

Skládá se především z propanu, propylenu, butanu a butylenu v různých směsích a vyrábí se jako vedlejší produkt při zpracování zemního plynu a rafinaci ropy. Složky LPG jsou za normálních teplot a tlaků plyny, které se odpařují – z tohoto důvodu se skladuje v tlakových ocelových nádržích o tlaku nižším než 2 MPa. Jedním z problémů LPG je, že se jeho složení může značně lišit, což vede k proměnlivému výkonu motoru a jeho studeným startům. Na rozdíl od zemního plynu je těžší než vzduch, a proto proudí po podlahách a má tendenci se usazovat v nízkých místech – např. ve sklepech. Takové hromadění může způsobit nebezpečí výbuchu, což je důvod, proč by se jako palivo nemělo používat v uzavřených prostorech s malým větráním. Pro správné spalování LPG vyžaduje poměr vzduchu k plynu přibližně 25:1. [48], [58]

6.3 VODÍK A CNG

Vodík i CNG mohou být skvělým způsobem, jak snížit emise. Obě palivové varianty vykazují podobnosti i rozdíly v celé řadě oblastí. Například vodík i zemní plyn se ve vozidlech používají převážně v plynné formě. To vede k podobnostem v některých komponentech, ale na druhou stranu existuje značný rozdíl v jejich dostupnosti. [49]

Motory na zemní plyn i vodíkové motory jsou zážehové. Mnoho jejich součástí je tedy podobných, včetně bloku motoru, hlavy válců a zapalovacího systému. Stejně jako u všech vozidel je i zde důležitým hlediskem bezpečnost. Vozidla na vodík i zemní plyn mají vysokotlaké palivové nádrže, které splňují běžné bezpečnostní požadavky. Vozidla na CNG obvykle udržují zemní plyn pod tlakem přibližně 25 MPa, avšak vodíková vozidla skladují palivo pod tlakem až 70 MPa. Vodík musí být stlačen na vyšší tlak kvůli kompenzaci nižší energie na jednotku objemu, což komplikuje navrhování a konstrukci nádrží z hlediska bezpečnosti a výrobních nákladů. [49]

U vodíku je dolní a horní mez hořlavosti 4 a 75 %, zatímco u zemního plynu je to 7 a 20 %. Dolní a horní mez hořlavosti představuje procento paliva ve směsi paliva a vzduchu, které je nutné k tomu, aby se směs vznítla. Z toho vyplývá, že vodík bude hořet při nižším i při vyšším množství přítomného vzduchu ve srovnání se zemním plynem. Tento široký rozsah hořlavosti činí kontrolu spalování vodíku obtížnější než kontrolu spalování zemního plynu s užším rozsahem. Spolu s rychlostí plamene, kterou má vodík téměř 10krát vyšší než CNG, patří mez hořlavosti k charakteristickým konstrukčním problémům při spalování vodíku. Rychlost plamene je rychlost, jakou se plamen šíří z výchozího bodu směsi nespáleného vzduchu a paliva. Adiabatická teplota plamene vodíku je přibližně o 260 °C vyšší než teplota zemního plynu. Adiabatická teplota plamene je teplota, kterou vydává plamen v procesu hoření za předpokladu, že při tomto procesu nedochází ke ztrátám tepla. [59]

Vozidla na zemní plyn při spalování CNG stále uvolňují CO₂. Naproti tomu u vodíkových vozidel jsou emise skleníkových plynů téměř nulové, pokud jezdí na ekologický vodík – v porovnání s naftou mohou snížit emise až o 99 %. Ani jedno z těchto paliv neprodukuje žádné saze a žádné (nebo velmi nízké) množství oxidu uhelnatého a organických znečišťujících látek. Motory na zemní plyn i vodíkové motory produkují velmi nízké množství Nox (oxidy dusíku). Naproti tomu vozidla s vodíkovými palivovými články neprodukují žádné NOx ani jiné látky znečišťující ovzduší. [49], [59]

V současné době se v ČR nachází 230 čerpacích stanic nabízejících stlačený zemní plyn (v Evropě pouze 4 159 stanic). Při srovnání s jinými palivy není tak všeobecně dostupný jako benzín a nafta. Distribuční síť CNG je však stále mnohem hustší než distribuční síť vodíku. Vodíkových stanic je v současnosti v ČR pouze 5 a z toho jsou 2 neveřejné, avšak do roku 2025 jich má být 12. Lídrem na trhu s CNG je Německo, kde je toto palivo příznivé i z hlediska ceny. V závislosti na aktuálních cenách průměrné náklady na palivo činí u CNG 6,48 eur na 100 km; pro srovnání u vodíku je to 7,60 eur; 9,05 eur u nafty a 11,74 eur u benzínu. [17] [49], [50], [57]

Absence husté sítě čerpacích stanic znamená, že vodík zatím není pro mnoho případů použitím vhodnou volbou. U užitkových vozidel lze absenci stávajících možností tankování překonat snáze. Podniky, které mají zájem o přechod na vodík, mohou mít možnost vybudovat soukromé vodíkové čerpací stanice v centrálním depu vozidel. Tyto stanice mohou být vybudovány podobně jako CNG, což je současná praxe, nebo mohou umístit čerpací stanice podél pevných tras například mezi distribučními centry. [49]

6.3.1 MÍCHÁNÍ VODÍKU A ZEMNÍHO PLYNU

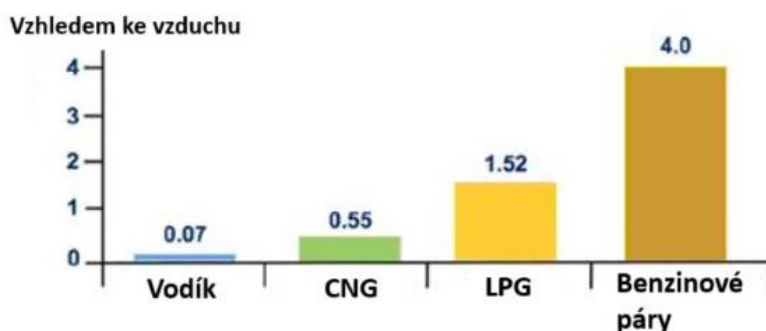
Jako potenciální alternativa pro ekonomickou i ekologickou přepravu vodíku se nabízí myšlenka přimíchávání vodíku do již stávajících plynovodů, což by ušetřilo finance vyžadované při stavění vlastní vodíkové infrastruktury. Existuje však několik potenciálních problémů, které je třeba při přimíchávání vodíku do plynovodů zohlednit. Jedním z hlavních je praskání materiálů vyvolané vodíkem – pevné kovy mohou být vodíkem snadno prostoupeny díky jeho fyzikálním a chemickým vlastnostem, které má jiné než zemní plyn.

Mísení vodíku může také snížit energetickou náročnost přenosu potrubím ve srovnání se zemním plynem. Jedním z možných řešení je zvýšení průtoku nebo tlaku při dodávce, aby se tyto ztráty při přenosu energie kompenzovaly, což může vyžadovat změny v potrubí nebo zvýšení počtu kompresorových stanic. Koncentrace vodíku až 30 % se snížením přenosu energie o 49 % lze okamžitě použít bez jakýchkoli změn (emise CO₂ by se snížily o 36,3 %), ale bylo by možné dosáhnout směsi až 60 % vodíku s 35% snížením přenosu energie. Zároveň také jeho širší hranice hořlavosti z něj činí bezpečnostní riziko v případě úniku a další výzvou pro zavádění systémů vodíkových směsí je nedostatek demonstrací a výzkumu v oblasti vodíkových směsí. I přes tyto problémy může být směsný vodík realizovaný pomocí současných technologií užitečným kompromisem do doby, než se přejde na čistý vodík. [61], [62]

6.4 CELKOVÉ SROVNÁNÍ

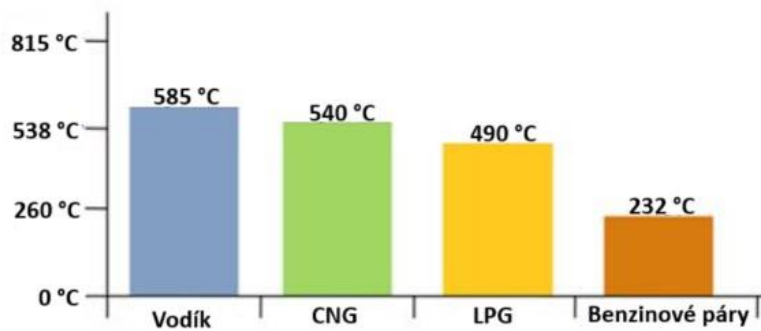
Jak již bylo napsáno, vodík v plynném stavu je bezbarvý, bez zápachu, bez chuti, není toxický ani jedovatý. Také nezpůsobuje korozi, ale může způsobovat křehnutí některých kovů. Stlačený zemní plyn (CNG) a zkapalněný ropný plyn (LPG) jsou také bez zápachu, ale průmysl přidává pachové látky obsahující síru, aby je lidé mohli detekovat. V současné době se tyto pachové látky u vodíku nepoužívají, protože nejsou známy žádné dostatečně lehké látky, které by měly s vodíkem stejnou rychlost rozptýlu, a tudíž s ním stíhaly unikat. Současné pachové látky také znečišťují palivové články, které jsou pro vodík důležitou aplikací. [51]

Vodík je přibližně 57krát lehčí než benzinové páry (viz obr. 18) a 14krát lehčí než vzduch. To znamená, že pokud se uvolní do otevřeného prostředí, obvykle rychle stoupá a rozptýluje se. To je ve venkovním prostředí bezpečnostní výhoda. [51]



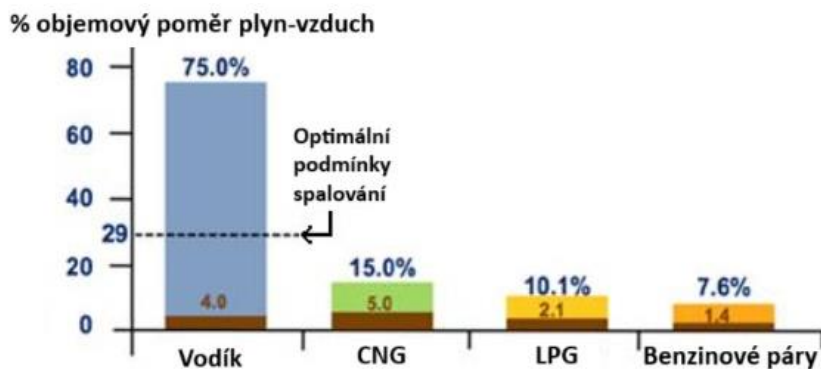
Obrázek 18: Relativní hustota par vzhledem ke vzduchu [51], upraveno

Teplota samovznícení látky je nejnižší teplota, při které se látka samovolně vznítí bez přítomnosti plamene nebo jiskry. Teploty samovznícení vodíku a zemního plynu jsou velmi podobné. Obě mají teplotu samovznícení vyšší než 538 °C, což je mnohem více než teplota samovznícení benzinových par, jak je znázorněno na obr. 19. [51]

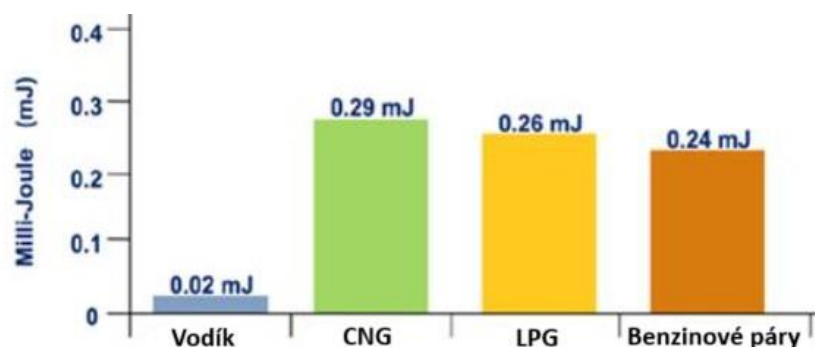


Obrázek 19: Porovnání teplot samovznícení [51], upraveno

Rozsah hořlavosti vodíku (od 4 % do 75 % na vzduchu) je ve srovnání s jinými palivy velmi široký, jak ukazuje obr. 20. Za optimálních podmínek hoření (objemový poměr vodíku a vzduchu 29 %) je energie potřebná k iniciaci hoření vodíku mnohem nižší než u jiných běžných paliv (např. k jeho zapálení stačí malá jiskra), jak ukazuje obr. 21. Při nízkých koncentracích vodíku ve vzduchu je však energie potřebná k iniciaci hoření podobná jako u jiných paliv. Avšak hoření vodíku je rychlejší než hoření jiných paliv – oblak vodíku shoří během několika sekund a uvolní se veškerá energie oblaku. [51]



Obrázek 20: Rozsah hořlavosti [51], upraveno



Obrázek 21: Minimální zápalná energie [51], upraveno

Vodík hoří bleděmodrým plamenem, který je na denním světle téměř neviditelný, takže je téměř nemožné jej detekovat lidskými smysly. Barvu do vodíkového plamene vnášejí

nečistoty, jako je sodík z oceánského vzduchu nebo jiné hořící materiály. K vodíkovým systémům se téměř vždy instalují detekční čidla, která rychle odhalí jakýkoli únik a minimalizují možnost vzniku nezjištěných plamenů. V porovnání s plamenem propanu na obr. 22 je plamen vodíku téměř neviditelný, ale lze jej vidět pomocí termokamery zobrazené v popředí. V noci jsou plameny vodíku viditelné. [51]



Obrázek 22: Plameny vodíku a LPG na denním světle a v noci [51], upraveno

Kromě toho vodíkové plameny vyzařují málo infračerveného tepla, ale značnou část ultrafialového záření. To znamená, že pokud se někdo nachází v těsné blízkosti vodíkového plamene, je teplo jen málo cítit, takže neúmyslný kontakt s plamenem představuje značné nebezpečí. Obavy vzbuzuje také nadměrné vystavení UV záření, které může mít za následek účinky podobné úpalu. [51]

LPG i CNG jsou lehčí než nafta a benzín: 1 litr nafty váží 0,850 kg, 1 litr benzínu váží 0,749 kg, 1 dm³ LPG váží 0,493 kg, 1 Litr CNG váží 0,128 kg. LPG se při přechodu z kapaliny na plyn objemově zvětší přibližně 270krát. 1 litr kapalného LPG = 270 litrů plynného LPG, tudíž 1 litr kapalného LPG se zvětší na 0,27 m³. [48]

Tabulka 3: Srovnání vlastností alternativních paliv [1], [52], [53], [54], [55], upraveno

	Vodík	Stlačený zemní plyn (CNG)	Zkapalněný ropný plyn (LPG)
Chemické složení	H ₂	CH ₄ (většina), C ₂ H ₆ a inertní plyny	C ₃ H ₈ (většina) a C ₄ H ₁₀ (menšina)
Palivový materiál (vstupní suroviny)	Zemní plyn, metanol a elektrolýza vody	Podzemní zásoby a obnovitelný bioplyn	Vedlejší produkt při rafinaci ropy nebo zpracování zemního plynu.
Ekvivalent galonu benzínu (GGE) nebo nafty (DGE) ¹⁾	1 kg = 1 GGE 1 kg = 0,9 DGE	1 kg = 0,4 GGE 1 kg = 0,35 DGE	1 litr = 2,8 GGE 1 litr = 2,5 DGE

Srovnání energií	1 kg H ₂ má stejnou energii jako 1 GGE	2,6 kg nebo 3,5 m ³ CNG má stejnou energii jako 1 GGE a 2,9 kg nebo 3,9 m ³ CNG má stejnou energii jako 1 DGE	1 galon LPG má 73 % energie v 1 GGE kvůli nižší hustotě energie LPG (1 galon = 3,78541 litru)
Energetický obsah (nižší hodnota výhřevnosti) ²⁾	33,3 kWh/kg	13 kWh/kg	54,4 kWh/kg
Energetický obsah (vyšší hodnota výhřevnosti) ²⁾	39,4 kWh/kg	14,5 kWh/kg	59 kWh/kg
Skupenství	Stlačený plyn (lehčí než vzduch) nebo kapalina	Stlačený plyn (lehčí než vzduch)	Tlaková kapalina (jako plyn těžší než vzduch)
Oktanové číslo	130+	120+	105
Bod vzplanutí ³⁾	–	-184 °C	-73,3 až -101 °C
Teplota samovznícení ⁴⁾	565–582 °C	540 °C	454,4–510 °C
Záležitosti údržby	Při použití vodíku v palivových člancích by měla být údržba minimální. Vysokotlaké nádrže vyžadují pravidelnou kontrolu a certifikaci.	Vysokotlaké nádrže vyžadují pravidelnou kontrolu a certifikaci.	–
Dopady na energetickou bezpečnost	ČR až 90 % vodíku v současnosti dováží z Polska a Německa. Malá domácí výroba se využívá převážně v petrochemickém průmyslu.	Plyn ČR z většiny dováží – v poslední době z Německa (plyn z Norska, Belgie a Nizozemska). V červenci 2023 byly zásobníky plynu naplněny nad 88 % kapacity. CNG se v ČR v menší míře vyrábí v rafinériích z ropy a zemního plynu.	LPG v ČR pochází zhruba ze 40 % z těžby zemního plynu a ze 60 % z rafinérského zpracování ropy. Až 65 % dovezené ropy do ČR pochází z Ruska.

Vysvětlení pojmů z tabulky 3:

- 1) Ekvivalent galonu benzínu nebo nafty je množství paliva, které se rovná energetickému obsahu jednoho galonu benzínu nebo nafty, přičemž jeden galon benzínu (GGE) se rovná 33,5 kWh a jeden galon nafty (DGE) se rovná 37,7 kWh (1 galon = 3,78541 litru). [56]

- 2) Výhřevnost je množství tepla uvolněného při spalování paliva. Nižší výhřevnost se stanoví odečtením výparného tepla vody od vyšší výhřevnosti pro danou látku, přičemž veškerá voda se považuje za páru. Vyšší výhřevnost se určí tak, že se všechny produkty spalování vrátí na původní teplotu před spalováním a zkondenzují se všechny vzniklé vodní páry. Tato hodnota předpokládá, že veškerá vodní složka v produktech spalování je kapalná a že teplo může být využito. [56]
- 3) Bod vzplanutí je minimální teplota, při které kapalina uvolňuje ve zkušební nádobě páry v dostatečné koncentraci, aby se vytvořila zápalná směs se vzduchem v blízkosti povrchu kapaliny. [56]
- 4) Teplota samovznícení je nejnižší teplota, při které se páry hořlavého plynu samovolně vznítí bez zdroje zapálení po několika minutách působení zdrojů tepla. [56]

ZÁVĚR

Vodík představuje slibnou alternativu k fosilním palivům v dopravě s nízkými emisemi uhlíku a potenciálem pro udržitelný rozvoj. Nicméně, jeho široké zavedení vyžaduje důkladné posouzení a řešení bezpečnostních rizik spojených s jeho produkcí, skladováním, manipulací a používáním. Začátek bakalářské práce kromě vlastností vodíku popisuje základní možnosti jeho skladování – v plynném stavu při tlaku až 100 MPa, v kapalném stavu při nízké teplotě - 253 °C, v kryo-kompresi a v pevných sloučeninách neboli hydridech. Jeho přepravu lze rozdělit na tři základní způsoby – nákladními automobily se stlačeným vodíkem v trubkách, vozidly s kryogenní kapalinou a potrubím se stlačeným plynem. Pro optimální rozvoj vodíkové dopravy je ideální tyto typy přepravy kombinovat.

Analýza ukázala, že mezi hlavní bezpečnostní rizika vodíkové dopravy patří: snadný únik a difúze (může vést k tvorbě výbušných směsí a představovat riziko pro zdraví a bezpečnost osob v okolí); samovznícení (působením více mechanismů iniciace může vzplanout a způsobit exploze); poškození materiálů vodíkem – hlavně křehnutí (snižování pevnosti a odolnosti hlavně kovových materiálů v dopravních prostředcích a infrastruktuře).

Aby se minimalizovala rizika úniku a exploze, existuje řada bezpečnostních opatření a normativů. Mezi důležité kroky patří: používání bezpečnostních prvků jako jsou ventily a přetlakové zařízení; zavádění technologií pro detekci a signalizaci úniků vodíku; vývoj a implementace bezpečnostních standardů ISO a IEC do praxe; rozvoj materiálů a konstrukcí odolných proti vodíku; vzdělávání a školení personálu v oblasti bezpečnosti vodíku.

Porovnání nákladů na skladování vodíku ukázalo, že díky nízkým investičním a provozním nákladům nejlépe vychází podzemní skladování (0,12-0,3 USD/kg H₂), následuje stlačený vodík, kapalný vodík a nejnákladnější forma je skladování v hydridech kovů. U přepravy je díky nízkým provozním nákladům ekonomicky nejvýhodnější potrubní doprava (0,1-1 USD/kg H₂/100 km), poté nákladní doprava s kapalným vodíkem, dále vozidla s plynným vodíkem a nejhůře vychází lodní doprava. Při srovnání emisí nejméně škodí životnímu prostředí skladování v jeskyních a doprava potrubím. Silniční přepravou 1 kg vodíku vzniká 12,3 g CO₂ na vzdálenost 100 km, při zohlednění emisí ze skladování byly celkové emise skleníkových plynů 718 g CO₂/kg H₂ na vzdálenost 100 km.

Do budoucna ponesou velký význam vodíkové palivové články, které mají vyšší účinnost, minimální emise a neprodukují hluk v porovnání se spalováním fosilních paliv. Jejich nevýhodou může být dražší energie při elektrolýze vody nebo drahé kovy v katalyzátorech palivových článků. Při tankování vodíku do vozidel hrozí nebezpečí nárůstu teploty, na který má vliv počáteční tlak, velikost hmotnostního průtoku a vstupní teplota plynu i teplota okolí. Za účelem minimalizovat tyto negativní účinky jsou navrhovány strategie pro řízení teploty. Nejnovější technologický pokrok se také věnuje mobilním čerpacím stanicím, které oproti stacionárním nabízí nižší investiční náklady, kompaktní konstrukci a nenáročnou údržbu.

Srovnávací analýza se stlačeným zemním plynem a zkapalněným ropným plynem ukázala, že vodík má svá specifická bezpečnostní rizika, ale zároveň nabízí řadu výhod. CNG a vodíkové systémy jsou podobné – vzhledem k hlavě válců v motoru i zapalovacího systému, liší se však skladovacím tlakem (u CNG 25 MPa a u vodíku 70 MPa). Vodík se může přimíchávat do stávajících plynovodů se zemním plynem, aby se ušetřily finance na stavění vodíkových potrubí. V porovnání s CNG a LPG má nejvyšší teplotu samovznícení, minimální velikost zápalné energie, největší rozsah hořlavosti a malou relativní hustotu par vzhledem ke vzduchu. Nejmenší energetický obsah má CNG, následovaný vodíkem a největší má LPG, který je těžší než vzduch, a tudíž nebezpečný z důvodu usazování v nízkých místech.

Návrhy na další výzkum bezpečnosti se můžou zabývat přibližováním experimentálních podmínek reálným stavům v praxi nebo zkoumáním reakcí směsí vodíku s jinými složkami jako jsou sulfidy a oxid uhelnatý. Budoucí výzkum inovací se může týkat výroby vodíku přímo na místě čerpací stanice pro snížení nákladů na přepravu, používání slané vody při výrobě vodíku elektrolýzou nebo kombinací strategií řízení nárustu teploty při tankování pro dosažení ideálního tankování.

Závěrem lze konstatovat, že vodík má potenciál stát se klíčovou součástí udržitelné dopravní infrastruktury. Je však nezbytné důkladné posouzení a řešení bezpečnostních rizik pro jeho široké zavedení a zajištění bezpečného a spolehlivého provozu vodíkových vozidel. Investice do vývoje a implementace bezpečnostních technologií a standardů jsou klíčové pro budování důvěry veřejnosti a podporu masového přijetí vodíkové dopravy.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] TICHÝ, P., c2024. Ve zkratce. *Česká vodíková technologická platforma: HYTEP* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [2] KULVEITOVÁ, Hana. *CHEMIE II (Chemie prvků)* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2024-02-13]. ISBN 978-80-248-1322-6. Dostupné z: <https://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/ChemieII/ChemieII.pdf>
- [3] CINIVIZ, Murat a Hüseyin KÖSE, 2011. *HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A REVIEW*. 42003 Konya, Turkey. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/267711346_HYDROGEN_USE_IN_INTERNAL_COMBUSTION_ENGINE_A_REVIEW. [cit. 2024-02-13]. International Journal of Automotive Engineering and Technologies. Technical Education Faculty, Mechanical Education Department, Selçuk University.
- [4] RIVARD, Etienne, Michel TRUDEAU a Karim ZAGHIB, 2019. Hydrogen Storage for Mobility: A Review. *MDPI* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1973>
- [5] Hydrogen Storage. c2024. *U.S. department of ENERGY: Hydrogen and fuel cell technologies office*. [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [6] NIAZ, Saba, Taniya MANZOOR a Altaf Hussain PANDITH, 2015. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *ScienceDirect: renewable and sustainable energy reviews* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004694?via%3Dihub>
- [7] WILLIGE, Andrea, 2022. 4 ways of storing hydrogen from renewable energy. *Spectra, MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://spectra.mhi.com/4-ways-of-storing-hydrogen-from-renewable-energy>
- [8] EBADI, N., 2023. A Guide to Hydrogen Pressure Vessels & Pipes. *ANTALA Specialty Chemicals* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.antala.uk/hydrogen-pressure-vessels/>
- [9] CHENG, Qian, Ruiqiang ZHANG, Zhusheng SHI a Jianguo LIN, 2024. Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners. *ScienceDirect: International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840423000434>
- [10] Hydrogen Storage, 2017. *U.S. department of ENERGY: FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/fcto-h2-storage-fact-sheet.pdf>
- [11] BARTHELEMY, H., M. WEBER a F. BARBIER, 2017. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspective. *ScienceDirect: International Journal of*

- Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916305559>
- [12] YANG, Christopher a Joan Ogden OGDEN, 2007. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906001765>
- [13] KURTZ, Jennifer, Sam SPIRIK a Thomas H. BRADLEY, 2019. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919309516>
- [14] LI, Hao, Xuewen CAO, Yang LIU, Yanbo SHAO, Zilong NAN, Lin TENG, Wenshan PENG a Jiang BIAN, 2022. Safety of hydrogen storage and transportation: An overview on mechanisms, techniques, and challenges. *ScienceDirect: Energy Reports* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722008332>
- [15] Vodíkové plnicí stanice, 2020. *APT* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.apr.cz/hydrogen-stations>
- [16] Otevíráme novou vodíkovou stanici, 2022. *VÍTKOVICE, a.s.* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.vitkovice.cz/otevirame-novou-vodikovou-stanici/a-364/>
- [17] ORLEN Unipetrol otevřel veřejnou vodíkovou stanici v Praze na Barrandově, 2023. *ORLEN Unipetrol* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://www.orlenunipetrol.cz/cs/Media/TiskoveZpravy/Stranky/20230310-TZ_ORLEN_Benzina-H2-Praha-Barrandov-CZ.aspx
- [18] SINGH, Sonal, Shikha JAIN, Venkateswaran PS, Avanish K. TIWARI, Mansa R. NOUNI, Jitendra K. PANDEY a Sanket GOEL, 2015. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *ScienceDirect: Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006127>
- [19] WANG, Jian, Yang GAO, Shijie SUN a Lei SHI, 2024. Safety Technologies and Challenges of Hydrogen-Powered Rail Transport. *SpringerLink* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-8631-6_11
- [20] BÁRTA, Martin, 2020. V Německu zahájili stavbu první čerpací stanice na vodík pro osobní vlaky. *EnergoZrouti.cz* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://energozrouti.cz/clanek/v-nemecku-zahajili-stavbu-prvni-cerpaci-stanice-pro-osobni-vlaky-na-vodik>
- [21] HYDROGEN TUBE TRAILER - 9 TUBES DOT 3AAX 2400 PSI 40 FT, c2024. *City Machine & Welding, Inc* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://cmwelding.com/configuration/hydrogen-h2-tube-trailer-9-tubes-dot-3aax-2400psi-40-ft>

- [22] GUO, Liejin, Jinzhan SU, Zhiqiang WANG, Jinwen SHI, Xiangjiu GUAN, Wen CAO a Zhisong OU, 2024. Hydrogen safety: An obstacle that must be overcome on the road towards future hydrogen economy. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923043021>
- [23] GAVRILYUK, Alexander, 2013. *Hydrogen Energy for Beginners*. USA: CRC Press: Taylor & Francis Group. ISBN 978-981-4364-78-2. [cit. 2024-03-01]
- [24] Hydrogen Safety Standards and Regulations, 2023. *ONE H2* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://oneh2.com/hydrogen-safety-standards-and-regulations/>
- [25] Safe Use of Hydrogen, c2024. *U.S. department of ENERGY: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>
- [26] NCSR D a INERIS, 2009. Deliverable D113 Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces – Results from InsHyde. *HYSAFE – Safety of Hydrogen As an Energy Carrier* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: http://www.hysafe.org/download/1710/HYSAFE_D113_version_1.1.pdf [cit. 2024-03-01]
- [27] YANG, Yanmei, Haigang XU, Ling LIN, Wei BAO, Bangqiang ZHANG a Bin AI, 2020. Development of Standards for Hydrogen Safety. *E3S Web of Conferences* [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/54/e3sconf_icaeer2020_02013.pdf
- [28] ISO – International Organization for Standardization. c2024. *ISO*. [Online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.iso.org/home.html>
- [29] SASAKI, Kazunari, Hai-Wen LI, Akari HAYASHI, Junichiro YAMABE, Teppei OGUR a Stephen M. LYTH, ed., 2016. Hydrogen Energy Engineering, A Japanese Perspective. *Japan: Springer Japan*. ISBN 978-4-431-56040-1. [cit. 2024-03-14].
- [30] IEC – International Electrotechnical Commission. c2024. *IEC*. [Online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.iec.ch/homepage>
- [31] HALDER, Pobitra, Meisam BABAIE, Farhad SALEK, Nawshad HAQUE, Russell SAVAGE, Svetlana STEVANOVIC, Timothy A. BODISCO a Ali ZARE, 2024. Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923036868>
- [32] Hydrogen Safety, c2021. *OsecoElfab* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.osecoelfab.com/industries/hydrogen>
- [33] CERNIAUSKAS, Simonas, Antonio Jose Chavez JUNCO, Thomas GRUBE, Martin ROBINIUS a Detlef STOLTEN, 2020. Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study. *ScienceDirect: International*

- Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920307023>
- [34] EHRHART, Brian, Austin BAIRD, Austin GLOVER a Chris LAFLEUR, 2021. Overview of Federal Regulations for Hydrogen Technologies in the U.S. *U.S. Department of Energy: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-05/042921-h2iqhour.pdf>
- [35] ZHANG, Caizhi, Xiujian CAO, Piotr BUJLO, Bin CHEN, Xiong ZHANG, Xinfu SHENG a Chen LIANG, 2022. Review on the safety analysis and protection strategies of fast filling hydrogen storage system for fuel cell vehicle application. *ScienceDirect: Journal of Energy Storage* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2101135X>
- [36] Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen, 2023. *OECD iLibrary* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/90fd6481-en/index.html?itemId=/content/component/90fd6481-en>
- [37] Overview of Hydrogen Induced Cracking (HIC), c2024. *Inspectioneering, LLC* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://inspectioneering.com/tag/hydrogen+induced+cracking>
- [38] AHMED, Hamza, Pelumi ADEBAYO a Mousab AHMED, 2023. Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cells: Environmental Impact and Sustainability. *Journal of Energy Technologies and Policy* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/369099948_Life_Cycle_Assessment_of_Hydrogen_Fuel_Cells_Environmental_Impact_and_Sustainability
- [39] WHAT ARE THE PROS AND CONS OF HYDROGEN FUEL CELLS?, c2024. *TWI Ltd* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-are-the-pros-and-cons-of-hydrogen-fuel-cells>
- [40] CHI, Yuanying, Weiyue XU, Meng XIAO, Zhengzao WANG, Xufeng ZHANG a Yahui CHEN, 2023. Fuel-cycle based environmental and economic assessment of hydrogen fuel cell vehicles in China. *ScienceDirect: Energy* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223021679>
- [41] Hydrogen Pressure Relief Valve – Series 492, c2024. *Hyfindr GmbH* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/en/shop/products/hydrogen-pressure-relief-valve-series-492>
- [42] Komplexní průvodce ocelí X70, 2023. *Epower Metals* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.epowermetals.com/cs/a-comprehensive-guide-to-x70-steel.html>
- [43] Reliable Gas Detection in H2 Research, Production and Transport, 2022. *AZO Sensors* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=2627>

- [44] Hydrogen Valve, 2023. *Hyfindr GmbH* [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/en/hydrogen-knowledge/hydrogen-valve>
- [45] OCKO, Ilissa B. a Steven P. HAMBURG, 2022. Climate consequences of hydrogen leakage. HAMBURG, Steven P. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2022-91/acp-2022-91.pdf>
- [46] SAFETY MEASURES WHILE REFUELLING AT THE HYDROGEN STATION, c2024. *Fuel Cell Electric Buses* [online]. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/safety-framework/safety-measures-while-refuelling-hydrogen-station>
- [47] STOLTEN, Detlef a Bernd EMONTS, 2016. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. Německo: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. ISBN 978-3-527-67429-9. [cit. 2024-04-20]
- [48] What's the difference between LPG, CNG, LNG, and Hydrogen ?, c2024. *Australian Micro Power Grids* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: https://www.micropowergrids.com.au/Difference_between_LPG_CNG_LNG_and_Hydrogen.html
- [49] JHAWAR, Puneet Singh, 2022. LET'S DO A FUEL COMPARISON: NATURAL GAS VS HYDROGEN. *Cummins Inc.* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/news/2022/10/21/lets-do-fuel-comparison-natural-gas-vs-hydrogen>
- [50] Stanice v zahraničí, c2024. *CNG.cz* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.cng.cz/stanice/stanice-v-zahranici>
- [51] Hydrogen Compared with Other Fuels, c2024. *Hydrogen Tools* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>
- [52] Fuel Properties Comparison, c2024. *U.S. department of ENERGY: Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>
- [53] Dovoz plynu do České republiky klesl v prvním pololetí roku 2023 na nulu. Zásoby zůstávají rekordní, 2023. *Ministerstvo Průmyslu a Obchodu* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/dovoz-plynu-do-ceske-republiky-klesl-v-prvnim-pololeti-roku-2023-na-nulu--zasoby-zustavaji-rekordni--275666/>
- [54] Co to je LPG? LPG je levné a čisté palivo s širokým využitím, 2023. *Česká asociace LPG* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://calpg.cz/lpg/>
- [55] Ropa v Česku je ze 65 procent ruská, 2023. *Plyn.cz* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.plyn.cz/ropa-v-cesku-je-ze-65-procent-ruska>
- [56] Glossary, c2024. *U.S. department of ENERGY: Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/glossary.html>

- [57] Hydrogen vs CNG vs LNG vs EV. Which is the Right Future Fuel For You?, 2023. *Dover Fueling Solutions* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.doverfuelingsolutions.com/thoughtleadership/hydrogen-vs-cng-vs-lng-vs-ev.-which-is-the-right-future-fuel-for-you%3F>
- [58] LPG vs CNG: A Comparison of Gas Fuels, 2024. *ELGAS* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.elgas.com.au/elgas-knowledge-hub/residential-lpg/lpg-vs-cng/>
- [59] KOESTNER, Jeff, 2021. 6 Things to Remember about Hydrogen vs Natural Gas. *POWER Engineers* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.powereng.com/library/6-things-to-remember-about-hydrogen-vs-natural-gas>
- [60] BASILE, Angelo a Adolfo IULIANELLI, 2014. *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*. Spojené Království: Woodhead Publishing, Elsevier. ISBN 978-0-85709-773-6. [cit. 2024-04-27]
- [61] CRISTELLO, Josmar B., Jaehyun M. YANG, Ron HUGO, Youngsoo LEE a Simon S. PARK, 2023. Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923002951>
- [62] NGUYEN, Natasha, 2023. Hydrogen Blending as a Pathway Toward U.S. Decarbonization. *NREL: Transforming energy* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/news/program/2023/hydrogen-blending-as-a-pathway-toward-u.s.-decarbonization.html>
- [63] TIAN, Ying, Chuan QIN, Zirong YANG a Dong HAO, 2024. Numerical simulation study on the leakage and diffusion characteristics of high-pressure hydrogen gas in different spatial scenes. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923054010>
- [64] RONG, Yangyiming, Jianbin PENG, Jun GAO, Xiang ZHANG, Xinkun LI, Xi PAN, Jianye CHEN a Shunyi CHEN, 2023. Numerical Investigation on the Liquid Hydrogen Leakage and Protection Strategy. *MDPI* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/4/1173>
- [65] MERILO, E.G., M.A. GROETHE, R.C. ADAMO, R.W. SCHEFER, W.G. HOUF a D.E. DEDRICK, 2012. Self-ignition of hydrogen releases through electrostatic discharge induced by entrained particulates. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912008658>
- [66] ASTBURY, G.R. a S.J. HAWKSWORTH, 2007. Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms. *ScienceDirect: International Journal of Hydrogen Energy* [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319907002091>

- [67] Overview of High Temperature Hydrogen Attack (HTHA), c2024. *Inspectioneering, LLC* [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://inspectioneering.com/tag/high+temperature+hydrogen+attack>
- [68] FOORGINEZHAD, Sahar, Masoud MOHSENI-DARGAH, Zahra FALAHATI, Rouzbeh ABBASSI, Amir RAZMJOU a Mohsen ASADNIA, 2021. Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *ScienceDirect: Journal of Power Sources* [online]. [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775321000021>
- [69] BURKE, Andrew, Joan OGDEN a Lewis FULTON, 2024. Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs. *Institute of Transportation Studies, UC Davis* [online]. [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: https://escholarship.org/content/qt83p5k54m/qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf?t=s9oa2u
- [70] HREN, Robert, Annamaria VUJANOVIĆ, Yee Van FAN, Jiří Jaromír KLEMESŠ, Damjan KRAJNC a Lidija ČUČEK, 2023. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment. *ScienceDirect: Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122009947>
- [71] LI, Mengxiao, Qiao YANG, Caizhi ZHANG, Song HUANG, Mingjun ZHANG, Guo ZHANG, Liang ZHAO a Shangfeng JIANG, 2023. Experimental and numerical study of the temperature evolution in hydrogen cylinder under fast-refueling process. *ScienceDirect: International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931023003721>
- [72] Mobile Hydrogen Refueling Station, c2023. *Linde plc*. [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.lindeus.com/industries/energy-decarbonization/mobile-refueling-station>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ACH	Air Changes per Hour = výměna vzduchu za hodinu
AWI	Agreement on Work Item = Dohoda o bodu práce
C ₂ H ₆	Ethan
C ₃ H ₈	Propan
C ₄ H ₁₀	Butan
CNG	Compressed natural gas = Stlačený zemní plyn
CO ₂	Oxid uhličitý
ČR	Česká republika
DGE	Diesel gallon equivalent = ekvivalent galonu nafty
DIS	Draft International Standard = Návrh mezinárodní normy
EU	Evropská unie
GGE	Gasoline gallon equivalent = ekvivalent galonu benzínu
H ₂	Vodík
HE	Hydrogen embrittlement = Vodíková křehkost
HIC	Hydrogen Induced Cracking = Vodíkem indukované praskání
HTHA	High temperature hydrogen attack = Vysokoteplotní útok vodíku
CH ₄	Methan
IEC	International Electrotechnical Commission = Mezinárodní elektrotechnická komise
ISO	International Organization for Standardization = Mezinárodní organizace pro normalizaci
LH ₂	Liquid hydrogen = Kapalný vodík
LN ₂	Liquid nitrogen = Kapalný dusík
LPG	Liquefied petroleum gas = Zkapalněný ropný plyn
MEA	Membránová elektrodová soustava
NASA	National Aeronautics and Space Administration = Národní úřad pro letectví a vesmír
NO _x	Oxidy dusíku
OSN	Organizace spojených národů
PEM	Protonové výměnné membrány
PRD	Pressure Relief Device = Zařízení pro snížení tlaku
PRV	Pressure Relief Valve = Přetlakový ventil
SAE	Society of Automotive Engineers = Sdružení automobilových inženýrů

TR	Technical Report = Technická zpráva
ÚJV Řež	Ústav jaderného výzkumu Řež
USD = \$	United States dollar = Americký dolar
WD	Working Draft = Pracovní verze

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj spotřeby energie od 20. století [19], upraveno.....	13
Obrázek 2: Kompozitní tlaková nádoba s vodíkovým pláštěm typu IV určená pro skladování na palubě elektrických vozidel s palivovými články [10], upraveno	15
Obrázek 3: Nádoba na skladování kapalného vodíku [22], upraveno	16
Obrázek 4: Nákladní automobil s přívěsem se stlačeným vodíkem v trubkách [21]	17
Obrázek 5: Výstup virtuální trysky při úniku. [14], upraveno	20
Obrázek 6: Srovnání simulovaných a experimentálních výsledků při difúzních koncentracích, závislost nadmořské výšky na vzdálenosti po směru větru [14], upraveno	21
Obrázek 7: Charakteristiky chování kapalného vodíku (LH2) a kapalného dusíku (LN2) po přetečení ze skladovací nádrže [14].....	22
Obrázek 8: Schéma principů samovznícení vodíku. [22], upraveno	22
Obrázek 9: Schéma difúzního vznícení [14], upraveno	23
Obrázek 10: Schéma defektů materiálu a míst akumulace vodíku [14], upraveno	25
Obrázek 11: Vývoj požáru na vozidle s palivovým článkem (vlevo) a na vozidle s benzínovým motorem (vpravo) v případě úniku paliva v čase a) 0 s, b) 30 s, c) 60 s a d) 90 s [22]	27
Obrázek 12: Německá vlaková souprava na vodíkový pohon [20].....	28
Obrázek 13: Vodíkový přetlakový ventil – řada 492, Goetze KG Armaturen [41]	31
Obrázek 14: Vodíkový uzavírací ventil [44]	31
Obrázek 15: Náklady na přepravu vodíku různými technologiemi (GH2 – plynný vodík, LH2 – kapalný vodík [31], upraveno	38
Obrázek 16: Základní princip vodíkového palivového článku [38], upraveno	40
Obrázek 17: Vliv průtoku vodíku na nárůst teploty podle různých přístupů [31], upraveno ...	42
Obrázek 18: Relativní hustota par vzhledem ke vzduchu [51], upraveno	47
Obrázek 21: Minimální zápalná energie [51], upraveno	48
Obrázek 20: Rozsah hořlavosti [51], upraveno	48
Obrázek 19: Porovnání teplot samovznícení [51], upraveno	48
Obrázek 22: Plameny vodíku a LPG na denním světle a v noci [51], upraveno.....	49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané chemicko-fyzikální informace o vodíku [2], [3]	12
Tabulka 2: Aspekty různých metod dopravy vodíku [18], upraveno	18
Tabulka 3: Srovnání vlastností alternativních paliv [1], [52], [53], [54], [55], upraveno	49